

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas

Cristiane do Bom Conselho Sales Alvarenga

***FRAMEWORK* PARA *DIGITAL TWINS*: INTEGRAÇÃO ENTRE O BIM, IoT E
PLATAFORMAS EM NUVEM PARA PROJETOS DE ESTRUTURAS DE
EDIFÍCIOS INDUSTRIAIS**

Belo Horizonte/MG

2024

Cristiane do Bom Conselho Sales Alvarenga

***FRAMEWORK PARA DIGITAL TWINS: INTEGRAÇÃO ENTRE O BIM, IoT E
PLATAFORMAS EM NUVEM PARA PROJETOS DE ESTRUTURAS DE
EDIFÍCIOS INDUSTRIAIS***

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de “Doutora em Engenharia de Estruturas”.

Orientador: Prof^o. Dr. Rodrigo Barreto Caldas

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Maria Teresa Paulino Aguilár

Belo Horizonte/MG

2024

A473f

Alvarenga, Cristiane do Bom Conselho Sales.

Framework para Digital Twins [recurso eletrônico] : integração entre o BIM, IoT e plataformas em nuvem para projetos de estruturas de edifícios industriais / Cristiane do Bom Conselho Sales Alvarenga. - 2024.

1 recurso online (153 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Rodrigo Barretos Caldas.

Coorientadora: Maria Teresa Paulino Aguiar.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 127-153.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia de estruturas - Teses. 2. Internet das coisas - Teses. 3. Modelagem de informação da construção - Teses. 4. Edifícios industriais – Teses. I. Caldas, Rodrigo Barretos. II. Aguiar, Maria Teresa Paulino III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 624(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS



**ATA DA DEFESA DE TESE DE DOUTORADO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS Nº: 103
DA ALUNA CRISTIANE DO BOM CONSELHO SALES ALVARENGA**

Às 14:00 horas do dia 06 do mês de junho de 2024, reuniu-se em ambiente virtual da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, a Comissão Examinadora indicada pelo Colegiado do Programa em 26 de abril de 2024, para julgar a defesa da Tese de Doutorado intitulada "Framework para Digital Twins: Integração entre o BIM, IoT e Plataformas em Nuvem para Projetos de Estruturas de Edifícios Industriais", cuja aprovação é um dos requisitos para a obtenção do Grau de DOUTOR EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS na área de ESTRUTURAS.

Abrindo a sessão, o Presidente da Comissão, Prof. Dr. Rodrigo Barreto Caldas, após dar a conhecer aos presentes o teor das Normas Regulamentares passou a palavra à candidata para apresentação de seu trabalho. Seguiu-se a arguição pelos examinadores, com a respectiva defesa da candidata. Logo após, a Comissão se reuniu, sem a presença da candidata e do público, para julgamento e expedição do resultado final.

Prof. Dr. Rodrigo Barreto Caldas - DEES - UFMG (Orientador)
Profa. Dra. Maria Teresa Paulino Aguiar - DEMC - UFMG (Coorientadora)
Prof. Dr. José Ricardo Queiroz Franco - DEES - UFMG
Prof. Dr. Marcelo Franco Porto - ETG - UFMG
Prof. Dr. Marcilio Sousa da Rocha Freitas - UFOP
Prof. Dr. Sérgio Scheer - UFPR

Após reunião, a Comissão considerou a candidata APROVADA, conforme pareceres em anexo.

O resultado final foi comunicado publicamente à candidata pelo Presidente da Comissão.

Nada mais havendo a tratar, o Presidente encerrou a reunião e lavrou a presente ATA, que será assinada por todos os membros participantes da Comissão Examinadora.

Belo Horizonte, 06 de junho de 2024.

Observações:

1. A aprovação da candidata na defesa da Tese de Doutorado não significa que a mesma tenha cumprido todos os requisitos necessários para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia de Estruturas;

2. Este documento não terá validade sem a assinatura do Coordenador do Programa de Pós-Graduação.



Documento assinado eletronicamente por Rodrigo Barreto Caldas, Professor do Magistério Superior, em 07/06/2024, às 15:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por Maria Teresa Paulino Aguiar, Professora do Magistério Superior, em 10/06/2024, às 10:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por Sergio Scheer, Usuário Externo, em 10/06/2024, às 12:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por Marcilio Sousa da Rocha Freitas, Usuário Externo, em 10/06/2024, às 13:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por Jose Ricardo Queiroz Franco, Servidor(a), em 13/06/2024, às 15:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por Marcelo Franco Porto, Coordenador(a) de curso de pós-graduação, em 14/06/2024, às 11:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por Felício Bruzzi Barros, Coordenador(a) de curso de pós-graduação, em 24/06/2024, às 09:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador 3234036 e o código CRC 05FE4E59.

À minha avó Nilda (*in memoriam*) e a minha mãe Rosemary,
sempre presentes.

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota d’água no mar, mas o mar
seria menor se lhe faltasse essa gota.”

Madre Teresa de Calcutá

Agradecimentos

Esta tese de doutorado não estaria concluída sem os agradecimentos a todos que contribuíram para a sua realização.

Aos meus orientadores, Prof. Dr. Rodrigo Barreto Caldas, pela confiança e apoio em todas as etapas deste trabalho. Em especial, Prof.^a Dr^a Maria Teresa Paulino Aguiar, pela disponibilidade irrestrita, e pela forma crítica e criativa de construir uma pesquisa desafiadora equilibrando teoria e prática.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas (PROPEEs) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e a todos os professores que participaram, tanto das disciplinas ministradas, como transmitindo experiência durante a elaboração desta pesquisa.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo incentivo à essa pesquisa.

Às empresas AtkinsRéalis, Verum Partners e ECM Projetos Industriais, que sempre acreditaram no meu potencial e onde tive a oportunidade de trocar conhecimentos, desenvolver e aplicar inúmeras tecnologias inovadoras em projetos de estruturas de edifícios industriais. Em especial ao Arley Costa e a Maria de Lourdes Bahia, pela parceria e dedicação ao projeto que se tornou a base dessa pesquisa. A Jessica Amaral pelo apoio na diagramação das imagens. E a toda equipe da Engenharia AtkinsRéalis por transformar ideias e projetos em realidade.

Também gostaria de expressar minha gratidão aos familiares e amigos, que, tenho certeza, rezaram e torceram por mim, muito especial ao meu marido Bruno, companheiro de vida, que assumiu com dedicação muitas das minhas responsabilidades sociais e familiares, propiciando a minha dedicação a esta pesquisa.

Aos meus queridos pais, Fernando e Rose, que não mediram esforços durante toda minha formação acadêmica. Sempre presentes e participativos, uma base forte para minha vida pessoal e profissional. A eles, minha eterna gratidão.

Finalmente aos meus queridos filhos, Davi e Heitor, motivo maior da minha vida e incentivo para meu constante crescimento.

RESUMO

A gestão do ciclo de vida das estruturas de edifícios industriais desempenha papel importante dentro das empresas e afeta diretamente a sociedade no que se refere às questões econômicas, ambientais e sociais. Existem ferramentas digitais que contribuem positivamente para essa gestão. O *Building Information Modeling* (BIM) tem o potencial de agregar diferentes tecnologias em plataformas de nuvem para o ambiente da construção. O avanço da *Internet of Things* (IoT) potencializou o uso do BIM e favoreceu o desenvolvimento de *Digital Twins* (DT) desde as fases iniciais de um projeto. Sob a ótica de um conceito holístico, a integração entre estas tecnologias pode possibilitar elevados níveis de eficiência nos projetos ao proporcionar que o desempenho futuro seja avaliado e otimizado antecipadamente. Contudo, a capacidade ofertada a partir da combinação dessas tecnologias, ainda não está sendo explorada em todo o seu potencial, visto que sua implantação é um processo lento e sujeito a uma série de barreiras culturais dentro das organizações. Soma-se a essa dificuldade o baixo grau de maturidade que envolve os processos de construção, especialmente em relação à capacidade digital, tornando-se um desafio incorporá-las no dia a dia das empresas. Assim, esta pesquisa buscou desenvolver um *framework* para *Digital Twin* fundamentada no *Design Science Research* (DSR) para auxiliar na resolução de problemas complexos do mundo real da construção industrial. Para seu desenvolvimento foram utilizadas a metodologia *Front-End Loading* (FEL) e estrutura do Modelo em V nas diversas fases do ciclo de vida. O *Business Model Canvas* (BMC) foi adotado para identificação do problema e auxiliou na criação da Proposta de Valor. Para sua implementação, foi integrada uma plataforma em nuvem, o BIM e a IoT. Os resultados do estudo mostram que o *framework-DT* proposto promoveu a virtualização do ambiente real. Porém, são necessárias ações e interações humanas provenientes da combinação de diferentes recursos tecnológicos para criação de uma proposta de valor que seja adequada para cada negócio. A implementação do *framework-DT* permite controlar, monitorar, antecipar, otimizar e analisar com maior precisão as estruturas em edifícios industriais. A incorporação das tecnologias digitais pode mudar a forma como as organizações operam e agregam valor ao seu patrimônio com transparência, interoperabilidade e reutilização dos dados em todo o ciclo de vida.

Palavras-chave: *building information modeling*, *internet of things*, plataforma em nuvem, *digital twin*.

ABSTRACT

The management of industrial building structures' life cycle plays a pivotal role within companies, directly impacting economic, environmental, and social aspects of society. Leveraging digital tools is crucial for effective management in this context. Building Information Modeling (BIM), which integrates various technologies on cloud platforms, has emerged as a powerful solution for the construction industry. Furthermore, the rise of the Internet of Things (IoT) has amplified BIM's potential and facilitated the development of Digital Twins (DT) from project inception. Taking a holistic view, the seamless integration of these technologies promises heightened project efficiency by enabling proactive assessment and optimization of future performance. However, despite their immense potential, the combined capabilities of BIM, IoT, and DT remain underutilized due to slow implementation processes and cultural barriers within organizations. Additionally, the construction industry's overall digital maturity poses challenges in incorporating these technologies into daily operations. To address these complexities, our research introduces a Digital Twin framework grounded in Design Science Research. This framework aims to tackle real-world complexities in industrial construction. For its development, the Front-End Loading (FEL) methodology and the V-Model structure were employed in various life cycle phases. The Business Model Canvas (BMC) was adopted for problem identification and assisted in creating the Value Proposition. For its implementation, a cloud platform was integrated with BIM and IoT. However, successful implementation requires human interactions and actions, tailoring the value proposition to each business context. By embracing digital technologies, organizations can revolutionize their operations, enhance asset value, and ensure transparency, interoperability, and data reuse throughout the entire life cycle.

Keywords: building information modeling, internet of things, cloud platform, digital twin.

Lista de Figuras

Figura 1 - Conceito de ESG x Conceito Sustentabilidade.....	29
Figura 2: Etapas em um Projeto de Capital	31
Figura 3: Ciclo do empreendimento na metodologia FEL	34
Figura 4: Processo de validação da metodologia FEL nos portões de aprovação.....	36
Figura 5: Usos do BIM	38
Figura 6 - Partes interessadas nas etapas de projeto e processos de construção	42
Figura 7: Dados e informações geradas ao longo do ciclo de vida.	43
Figura 8: Gestão do ciclo de vida dos documentos	44
Figura 9: Objetos conectados entre si a partir de conexões com a internet (IoT).	50
Figura 10: Funcionalidades do <i>Autodesk Construction Cloud</i> (ACC).	53
Figura 11: Plataforma em nuvem conectando as fases de projeto.....	55
Figura 12: Diretrizes para implementação de projetos.....	56
Figura 13: Metodologia de Design Centrado no Ser Humano	58
Figura 14: <i>Conceptual Ideal for PLM</i>	60
Figura 15: Diferenças entre DT, BIM e CPS.....	60
Figura 16: Evolução do BIM para <i>Digital Twin</i> no ambiente construído	61
Figura 17: Estrutura VDC seguindo conceito da <i>Stanford University</i>	72
Figura 18: Principais blocos do Business Model Canvas (BMC)	77
Figura 19: Elaboração da proposta de valor baseado em Canvas.....	78
Figura 20: Modelo Cascata.....	80
Figura 21: Modelo V com ações de verificação e validação.....	81
Figura 22: Modelo em Espiral.....	81
Figura 23: Estrutura <i>framework-DT</i> com base no <i>Design Science Research</i>	84
Figura 24: Diagrama esquemático do <i>framework-DT</i>	85

Figura 25: Estrutura para o Painel Visual Comparativo com dados na plataforma ACC	87
Figura 26: Interação por meio de telas de <i>desktop</i> , celular, <i>laptop</i> , <i>tablets</i>	88
Figura 27: <i>Softwares</i> utilizados para elaborar o modelo BIM federado	90
Figura 28: Fluxo de manutenções e modificações em estruturas de edificações industriais....	93
Figura 29: Diagrama do <i>framework-DT</i> para um Projeto de Capital	96
Figura 30: Interação para definição do <i>Canvas</i>	97
Figura 31: Resultado da interação das equipes multidisciplinares no <i>Canvas</i>	98
Figura 32: Fluxograma de aplicação do <i>framework-DT</i>	99
Figura 33: <i>Card</i> descritivo utilizado no Painel Visual Comparativo armazenado no ACC...	101
Figura 34: Inserção dos <i>Cards</i> no módulo <i>Photos</i> da plataforma ACC	102
Figura 35: Painel Visual com a localização dos <i>Cards</i> no mapa-múndi	102
Figura 36: Acesso ao Painel Visual Comparativo via aplicativo ACC	103
Figura 37: Sessão de <i>Design Review</i> presencial entre equipes multidisciplinares	105
Figura 38: Interação imersiva no <i>Autodesk Workshop XR</i>	106
Figura 39: Modelo BIM preliminar das estruturas e equipamentos	107
Figura 40: Modelo BIM das estruturas metálicas, concreto	108
Figura 41: Modelo BIM das estrutura tubulação e elétrica	109
Figura 42: Modelo BIM federado disponibilizado na nuvem da Autodesk ACC	110
Figura 43: Classificação das ações de melhoria (VIP) e Categorias Verdes	111
Figura 44: Coordenação entre equipes pelo ACC	112
Figura 45: Módulo <i>Docs</i> - Documentação de projeto	112
Figura 46: Módulo <i>Build</i> (Guia <i>Assets</i>)	113
Figura 47: Relatórios realizados no <i>tablet</i> no local do fabricante.	114
Figura 48: Módulo <i>Build</i> (Guia <i>Issues</i>) – Mapeamento de problemas	114
Figura 49: Módulo <i>Build</i> (Guia <i>Forms</i>) integrado ao Módulo Insight (Guia <i>Dashboards</i>)...	115
Figura 50: Módulo <i>Build</i> (Guia <i>RFI</i>) – Questionamentos técnicos.....	116

Figura 51: Módulo <i>Build</i> (Guia <i>Schedule</i>) Comparação entre versões de cronogramas	116
Figura 52: BIM 4D <i>timeliner Navisworks</i> e estudos de construtibilidade.....	117
Figura 53:- Módulo <i>Cost Management</i> (Guia <i>Budget</i>)	117
Figura 54: Módulo <i>Build</i> (Guia <i>Assets</i>) para manutenção de estruturas e equipamentos	119
Figura 55: Fluxograma do <i>framework-DT</i>	120
Figura 56: Modelo espiral de validação	121

Lista de Tabelas

Tabela 1: Práticas de Melhoria do Valor (VIP) e Categorias Verde	34
Tabela 2: Estudos sobre <i>Digital Twin</i> realizados entre 2016 e 2022.....	65
Tabela 3: Estudos sobre <i>Digital Twin</i> na indústria da construção.....	67
Tabela 4: Perguntas norteadoras do <i>Canvas</i> para elaborar a proposta de valor	98
Tabela 5: Resultado do <i>Canvas</i> para Etapa 1 do Planejamento do Empreendimento	100
Tabela 6: Resultado do <i>Canvas</i> para Etapa 2 Design do Empreendimento	104
Tabela 7: Resultado do <i>Canvas</i> para Etapa 3 Construção do Empreendimento	111
Tabela 8: Resultado do <i>Canvas</i> para Etapa 4 Operação do Empreendimento	118

Lista de Abreviaturas e Siglas

ACC - *Autodesk Construction Cloud*

BD - *Big Data*

BIM - *Building Information Modeling Building*

BMC - *Business Model Canvas*

CBIC - *Câmara Brasileira da Indústria da Construção*

CC - *Cloud Computing*

CPS - *Cyber-Physical Systems*

CIB - *International Council for Building Research and Innovation*

CIFE - *Center for Integrated Facility Engineering*

CRM - *Customer Relationship Management*

DSR - *Design Science Research*

DCH - *Design Centrado no Humano*

DT - *Digital Twins*

ESG - *Environmental Social and Governance*

ERP - *Enterprise Resource Planning*

FEL - *Front-End Loading*

GV - *Gestão Visual*

HBIM - *Historic Building Information Modeling*

HCPS - *Human-Cyber-Physical System*

ICE - *Integrated Concurrent Engineering*

IDC - *International Data Corporation*

IDD - *Integrated Digital Delivery*

IPD - *Integrated Project Delivery*

IPA - *Independent Project Analysis*

IST - *Institute for Software Engineering*

IoT - *Internet of Things*

IIoT - *Industrial Internet of Things*

KPI - *Key Performance Indicator*

LC - *Lean Construction*

MMA - *Ministério do Meio Ambiente*

NASA - *National Aeronautics and Space Administration*

ONU - *Organização das Nações Unidas*

PC - *Projeto de Capital*

PLM - *Product Lifecycle Management*

PMBOK - *Project Management Body of Knowledge*

PMI - *Project Management Institute*

PPM - *Project Production Management*

RFI - *Request For Information*

TI - *Tecnologia da Informação*

VDC - *Virtual Design and Construction*

VIP - *Value Improvement Practices*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
1.1	Justificativa.....	23
1.2	Objetivo geral	25
1.3	Objetivos específicos.....	25
1.4	Estrutura da pesquisa.....	26
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	27
2.1	Sustentabilidade das construções	27
2.1.1	<i>Product Lifecycle Management</i> – (PLM).....	29
2.1.2	Projetos de Capital (PC)	30
2.1.3	Metodologia <i>Front-End Loading</i> (FEL).....	32
2.2	<i>Building Information Modeling</i> (BIM).....	37
2.2.1	Normas e Regulamentações BIM.....	40
2.2.2	Construção do Modelo BIM Federado	46
2.3	Transformação da Indústria 4.0 para 5.0	47
2.3.1	<i>Cyber-Physical System</i> (CPS)	48
2.3.2	<i>Internet of Things</i> (IoT)	50
2.3.3	<i>Autodesk Construction Cloud</i> (ACC)	53
2.3.4	Design Centrado no Humano (DCH)	57
2.4	Conceito de <i>Digital Twin</i>	59
2.4.1	<i>Digital Twin</i> na construção industrial.....	63
2.4.2	Aplicações do <i>Digital Twin</i>	64
2.4.3	Custos e Benefícios das aplicações do DT	68
2.5	Modelos de Negócio Sustentáveis.....	69
2.5.1	<i>Virtual Design and Construction</i> (VDC).....	71

2.5.2	<i>Integrated Project Delivery (IPD)</i>	74
2.5.3	Gestão visual (GV).....	75
2.5.4	Business Model Canvas (BMC)	76
2.5.5	Modelos Cascata, V e Espiral.....	79
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	83
3.1	Passo 1 - Projetar o <i>framework-DT</i>	85
3.2	Passo 2 – Implementar o <i>framework-DT</i>	86
3.2.1	Fase de Planejamento	86
3.2.2	Fase de Design.....	88
3.2.3	Fase de Construção.....	91
3.2.4	Fase de Operação e Manutenção	92
3.3	Passo 3 – Validar o <i>framework-DT</i> em Projeto de Capital	94
4	RESULTADOS	95
4.1	Passo 1 - Projetar o <i>framework-DT</i>	95
4.2	Passo 2 – Implementar o <i>framework-DT</i>	99
4.2.1	Fase de Planejamento	100
4.2.2	Fase de Design.....	103
4.2.3	Fase de Construção.....	111
4.2.4	Fase de Operação e Manutenção	118
4.2.5	Fluxograma de aplicação do <i>framework-DT</i>	119
4.3	Passo 3 – Validar o <i>framework-DT</i> em Projeto de Capital	121
4.4	Considerações Finais	122
5	CONCLUSÕES	124
5.1	Propostas para pesquisas futuras	125
6	REFERENCIAS	126

1 INTRODUÇÃO

Desde as décadas de 1960 e 1970 o mundo tem se preocupado cada vez mais com os impactos sociais e ambientais decorrentes do acelerado crescimento industrial (GAO *et al.*, 2021). Em 2015, a Organização das Nações Unidas (ONU) estabeleceu os objetivos do desenvolvimento sustentável, os quais deveriam ser alcançados até 2030. Para atingir alguns dos objetivos se faz necessário construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização sustentável e fomentar a inovação (ONU, 2019). Tal preocupação é relevante uma vez que o mercado global de construção de infraestrutura é avaliado em US\$ 2,72 trilhões de dólares, devendo atingir US\$ 3,69 bilhões até 2029, com taxa de crescimento anual de 6,27% (MODOR INTELIGENCE, 2024). Associado a esse elevado desempenho econômico a indústria da construção civil é responsável por vários impactos ambientais. Neste contexto, os projetos e construções da próxima geração, devem buscar reduzir o consumo de recursos naturais, minimizar as emissões de gases de efeito estufa (*Net Zero*) de modo a proteger o ambiente natural, com boa performance econômica (ANDERSSON *et al.*, 2022). Para que o conceito de sustentabilidade seja incorporado aos processos das construções, novas práticas que apoiem uma gestão integrada com inovação, qualidade, economia, aumento de produtividade e segurança ganham força no setor da construção em todo o mundo. Isso envolve uma série de medidas que podem ser adotadas desde o planejamento até a execução da obra (CHEN, SIMIN; SONG; GAO, 2023; LIU, KEWEI *et al.*, 2022). Para lidar com as adversidades torna-se necessário desenvolver um ambiente de trabalho que seja colaborativo e que permita a troca de informações entre os envolvidos (GURGATZ; RIGONI, 2023). O processo de transformação nas empresas busca alcançar maior flexibilidade nos processos produtivos, além de responder em tempo hábil às necessidades do mercado (ALCÁCER; CRUZ-MACHADO, 2019; FELICIANO-CESTERO *et al.*, 2023; QUEIROZ *et al.*, 2020). A Gestão do Ciclo de Vida do Produto ou *Product Lifecycle Management* (PLM) surgiu da necessidade de melhorar o desempenho dos projetos e apoiar as tomadas de decisões, baseadas em soluções rápidas. Devido aos bons resultados alcançados nos setores automobilístico e aeroespacial o interesse pelo PLM se estendeu por outros setores industriais e suas aplicações ganharam atenção de pesquisadores em todo o mundo. Devido a essas características ele tem se tornado uma estratégia interessante para ser aplicado em estruturas de edifícios industriais (LI, LINGZHI *et al.*, 2021). Nesse sentido, as empresas estão se reestruturando digitalmente buscando flexibilidade e eficiência para manterem a competitividade no mercado e para continuarem na

liderança da inovação tecnológica (FELICIANO-CESTERO *et al.*, 2023; QUEIROZ *et al.*, 2020; RACHINGER; KORAJMAN; ROPPOSCH, 2019). Por esta razão, o setor está direcionando suas atividades para ferramentas de colaboração baseadas em nuvem, na gestão de projetos estruturais industriais. Considerando que cada projeto é único e que várias partes interessadas estão envolvidas ele deve ser gerenciado de modo particular (ORAEE *et al.*, 2017). Além disso as informações precisam ser atualizadas e acessíveis a todos e a segurança deve ser fator importante (HALONEN, 2022). Isso ocorre, uma vez que, os projetos estão se tornando cada vez mais complexos à medida que as tecnologias avançam, exigindo um nível bem mais elevado de conhecimentos de todas as partes envolvidas (LIU, MINGQIANG *et al.*, 2019). Dentro desse cenário de rápidas transformações tecnológicas e de informação em tempo real, o mercado de construção investe no sentido de conseguir melhorar seus investimentos em grandes empreendimentos como os Projetos de Capital (PC). Por serem investimentos de longo prazo e com altos custos, os PC's normalmente impactam a vida de milhões de pessoas, envolvendo diversas partes interessadas na sua execução. Para desenvolver um PC diferentes métodos são utilizados, contudo, esses métodos estão evoluindo e crescendo em grau de importância tanto para o meio empresarial quanto para o acadêmico (ROMERO; ANDERY, 2016). Uma abordagem usual para projetos complexos é a metodologia *Front-End Loading* FEL, desenvolvida pelo *Independent Project Analysis* – IPA dedicado à pesquisa empírica de PC e sistemas de projetos. Normalmente a abordagem FEL é utilizada em empreendimentos de grande porte, pois apresenta vantagens como a identificação de riscos potenciais pelas equipes de projeto no início do ciclo de vida e para que possam tomar decisões estratégicas para evitar atrasos, falhas ou gastos posteriores (CHENGER; WOICESHYN, 2021; SERUGGA; KAGIOGLOU; TZORTZOPOULOS, 2020; ZERJAV; MCARTHUR; EDKINS, 2021). Nesse sentido, o setor da construção civil se esforça para inovar e incorporar a seus processos as novas tecnologias digitais, como o BIM, IoT e plataformas em nuvem, de modo a melhorar os sistemas operacionais e de negócios.

O *Building Information Modeling* (BIM) engloba diversas informações para criar um modelo unificado e completo do projeto para dar suporte em todas as etapas do empreendimento desde o planejamento, projetos de arquitetura e engenharia, construção, operações, manutenção e demolição. Os modelos contêm geometria e dados precisos que apoiam as diversas atividades para além da concepção do projeto e de forma colaborativa são capazes de transferir informações das partes interessadas para auxiliar nos processos de aquisição, fabricação, montagem e nas etapas posteriores de manutenção e fim de vida dos ativos. Isso garante que

melhores análises e controles sejam alcançados, principalmente quando comparado aos processos manuais (SACKS *et al.*, 2018; TEULIER; BAGIEU, 2024). Na construção de edifícios industriais onde os projetos são multidisciplinares e requerem a utilização de diferentes fornecedores de *softwares* é necessário que a consolidação seja feita em uma plataforma com a inclusão de todas as informações em um único modelo federado. Segundo Pärn, Edwards e Sing (2018) o BIM federado se baseia em um conjunto de especificações abertas e padrões específicos que possibilitam a interoperabilidade entre diferentes *softwares* favorecendo a colaboração e uma visão holística do projeto. Além disso, ele reduz conflitos, melhora a coordenação e facilita a tomada de decisões durante todo o ciclo de vida do empreendimento. A ideia é integrar as informações provenientes de várias fontes para criar um modelo unificado e completo do projeto. Dessa forma, a integração entre diversas tecnologias pode proporcionar elevados níveis de eficiência nos projetos.

Segundo Javaid, Haleem e Suman (2023) o termo Indústria 4.0 (I4.0) refere-se à ampla gama de novas tecnologias e avanços digitais que alteram os sistemas de produção ao integrar os mundos físico e virtual via conexão de sensores, *softwares* e dispositivos para auxiliar na compilação de dados por meio da internet. O *Cyber-Physical System* (CPS) surge para iniciar uma geração de sistemas de engenharia altamente confiáveis, produzidos com eficiência e capazes de desempenhar avanços em informação, computação, comunicação e controle. Segundo Lodgaard e Dransfeld (2020) a adoção desses sistemas teve como meta conseguir que fossem interligados por meio de uma infraestrutura de Computação Ubíqua¹. Com a consolidação da *Internet of Things* (IoT) a integração de dados em tempo real com as informações estáticas fornecida pelos CPS se tornou possível. De modo geral, a IoT é definida como a interconexão de dispositivos e sensores inteligentes capazes de fornecer troca de informações em diferentes plataformas e estender sua influência além dos dispositivos de computação típicos (GARRIDO-HIDALGO *et al.*, 2019; MAGRANI, 2018). A conexão de dispositivos inteligentes, *smartphones*, visualização em nuvem, atualizações automatizadas, análises ambientais e avanços com base no *status* da construção foi possível com a integração das tecnologias inclusive para gestão de projetos complexos (DAVE *et al.*, 2018; LEE; CHA; PARK, 2016; LI, CLYDE ZHENGDAO *et al.*, 2018). Em Projetos de Capital de estruturas de edifícios industriais o acesso aos modelos digitais e às informações deve ocorrer em um

¹ O termo Computação Ubíqua foi mencionado pela primeira vez em 1991 pelo pesquisador Mark Weiser da Xerox Parc. O autor considera a ubiquidade como algo onipresente e entrelaçado no cotidiano das pessoas. Pesquisas na área, aconteceram entre os anos 2002 e 2006, a partir de então, o interesse foi substituído pelo termo Internet das Coisas (WEISER, 1991).

ambiente seguro e de fácil acesso. A plataforma em nuvem da *Autodesk Construction Cloud* (ACC), uma evolução do BIM 360, pode ser considerada como uma opção para apoiar no gerenciamento de projetos e construções. O ACC atua como uma fonte única de informações e combina o uso de *softwares* de design baseados em BIM para melhorar a colaboração, simplificar e organizar o gerenciamento de dados. Sua principal característica é conectar fluxos de trabalho, equipes e dados em todas as fases para reduzir o risco, maximizar a eficiência e a qualidade dos empreendimentos. Entretanto, as novas tecnologias devem ser manuseadas com extremo cuidado para proteger os dados mantendo a confidencialidade, além de proporcionar a interoperabilidade dos sistemas em nuvem (SUSILA; SRUTHI; USHA, 2020). Nos últimos anos, o uso de sistemas e plataformas em nuvem tem crescido, com a utilização de diferentes dispositivos o que favorece uma comunicação de forma *on-line*. Essa transição gerou demandas por *softwares* mais avançados para integrar diferentes usos e fases de projeto (HALONEN, 2022). Nesse ambiente é possível que os modelos BIM e demais informações referentes ao projeto, aos ativos e as estruturas, sejam atualizadas com dados em tempo real, seja por computadores ou aplicativos móveis conectados à internet.

Esse ambiente favoreceu a adoção de *Digital Twins* (DT) ou Gêmeo Digital no setor da construção civil com objetivo de controlar, monitorar, antecipar, otimizar e analisar com precisão as estruturas de edifícios industriais desde as fases iniciais de planejamento e design. Grieves e Vickers (2017) descrevem de forma simplificada o DT como uma representação virtual, de um objeto do mundo real, de um processo ou até mesmo de um sistema. Eles chamaram esse modelo simplificado de *Conceptual Ideal for PLM*, pois ele continha todos os elementos do *Digital Twin*, espaço real, espaço virtual, o *link* para o fluxo de dados do espaço real para o espaço virtual, *link* para o fluxo de informações do espaço virtual para o espaço real e subespaços. Para Jiang *et al.* (2021) embora a parte física e a parte virtual possam mudar, e seja difícil para a parte virtual replicar a parte física com 100% de precisão, é possível encontrar uma relação dupla entre eles. Seu foco é aumentar a produtividade, a vida útil, reduzir custos operacionais, dentre outros benefícios (JUPP, 2016). As aplicações potenciais do DT são promissoras e podem auxiliar setores como: manufatura, automotivo, saúde, aeroespacial, energia, serviços públicos, contribuindo com bons resultados nas áreas social, ambiental e econômica (SEATON *et al.*, 2022).

Contudo, observa-se uma falta de abordagens holísticas que combinem a aplicação de novas tecnologias como o DT em Projetos de Capital nas fases de planejamento, design, construção, operação e manutenção com foco na gestão dos ativos em estruturas de edifícios industriais. É

necessário que os gestores compreendam o atual estado dos seus recursos operacionais para usufruírem com competitividade das tecnologias inovadoras (REISINGER; HOLLINSKY; KOVACIC, 2021). As empresas têm adotado modelos de negócios que buscam vantagens como aumento de produtividade e lucratividade, além de atender às metas de sustentabilidade estipuladas pela ONU em 2015 (SCHALTEGGER; HANSEN; LÜDEKE-FREUND, 2016). Nosratabadi *et al.* (2019) descrevem a lógica de criar e entregar valor para as empresas de forma humana e sustentável, o que não depende apenas das tecnologias digitais inovadoras, como também de melhoria nos processos na capacitação das pessoas e das empresas. Nesse sentido, para projetos complexos ou Projeto de Capital, o *Virtual Design and Construction* (VDC) promove a integração de tecnologias digitais e práticas *Lean* para otimizar o ciclo de vida de um projeto, desde a concepção até a entrega (RAFSANJANI; NABIZADEH, 2023). O VDC utiliza ferramentas para melhorar o design, o planejamento, a construção, a gestão de recursos, bem como a visualização, quantificação e gestão de dados, principalmente em projetos de maior escala (ASLAM; GAO; SMITH, 2021). O *Integrated Digital Delivery* (IDD) é uma abordagem de entrega de projeto que integra as pessoas, sistemas, estruturas de negócios em um processo colaborativo. A sua conexão com o VDC, BIM e o *Integrated Project Delivery* (IPD) fornece a infraestrutura digital e o ambiente colaborativo necessários para sua implementação na indústria da construção (LIU, ZIWEN *et al.*, 2021). Ao adotar novos modelos de negócios, o setor da construção civil se esforça para aumentar a transparência e o acesso rápido às informações durante o ciclo de vida do empreendimento. De acordo com Sacks *et al.* (2010) os benefícios da adoção de abordagens colaborativas como IPD associadas ao conceito de *Lean Construction* e ao BIM, na indústria da construção são amplamente reconhecidos.

Dentro dessa perspectiva a Gestão Visual (GV) favorece a interação e está associada a adoção de modelos “enxutos”, como uma técnica utilizada para fazer com que a gestão de um processo seja rapidamente entendida. No entanto, para que a GV produza todos os seus benefícios, ela precisa fazer parte de um plano maior de gestão integrada (MA *et al.*, 2017; TEIXEIRA; MERINO, 2014) e necessita de modelos de negócios inovadores para alcançar seus objetivos.

Para empresas que pretendem se adequar a novos modelos de negócios, o *Business Model Canvas* pode auxiliar no direcionamento de projetos de grande complexidade. O modelo foi desenvolvido pelos professores Osterwalder e Pigneur (2011) da Universidade de *Lausanne* na Suíça para assessorar os empreendedores a visualizar e desenvolver modelos inovadores. A literatura apresenta vários estudos que exploram o tema, trazendo diferentes abordagens e realidades de pesquisa, seja por meio de proposição de modelos, concepção de negócios ou

aperfeiçoamento do próprio modelo *Canvas* (ARAÚJO *et al.*, 2017; JACKSON; SCOTT; SCHWAGLER, 2015; JOYCE; PAQUIN, 2016; MEDEIROS, 2017; TEIXEIRA; LOPES, 2016). Outras abordagens também foram apresentadas como aporte de um processo prescritivo como o Cascata, modelos em V e o Espiral. O modelo em V enfatiza a relação entre desenvolvimento e testes, enquanto o modelo Espiral enfatiza a mitigação de riscos e a adaptação contínua. Ambos os modelos em V e Espiral podem ser vistos como evoluções do modelo Cascata, incorporando elementos adicionais para melhorar o processo de desenvolvimento e a qualidade do produto (AWOTAR; SUNGKUR, 2018; PRESSMAN; MAXIM B.R., 2021).

Neste contexto, o presente estudo propõe a criação de um *framework*-DT para viabilizar o desenvolvimento de edifícios industriais com base em gêmeos digitais ao integrar o BIM, IoT e plataforma em nuvem, para monitorar, controlar e otimizar o complexo processo de construção. Para o desenvolvimento do estudo foi feita uma adaptação dos modelos V e Espiral considerando as fases de planejamento, design construção e operação presentes na metodologia FEL para o desenvolvimento de projetos complexos ou Projeto de Capital.

1.1 Justificativa

Os métodos tradicionais de gestão de projetos muitas vezes são estáticos e desempenham um papel limitado no local de trabalho. Existe uma preocupação de muitos estudiosos em produzir pesquisas de valor para as organizações (CARTON; MOURICOU, 2017; KIESER; NICOLAI; SEIDL, 2015). Brunet (2022) acredita ser necessário encontrar o equilíbrio entre teoria e prática na área de gerenciamento de projetos. Deve-se buscar uma investigação teoricamente forte, porém com níveis reais de aplicação, para melhorar a prática, o desempenho dos projetos, a qualidade de vida dos envolvidos, bem como da sociedade em geral. As empresas necessitam se adequar às novas exigências de mercado e às novas tecnologias digitais, isso requer que toda a organização esteja envolvida no processo. As práticas existentes precisam ser revisitadas e criados modelos de integração que favoreçam um ambiente de colaboração eficiente e auxilie as empresas nas mudanças requeridas, a partir de tecnologias e processos para novas propostas de valor (SKOG; WIMELIUS; SANDBERG, 2018; WESSEL *et al.*, 2021). Para Chantias, Myers e Hess (2019) a transformação digital das empresas é um assunto recente e desafiador, porém pouco dominado e com escassas informações sobre como elas contribuem na prática no nível organizacional.

Uma preocupação do setor da construção de edifícios industriais é como manter as informações digitais vivas durante todo o ciclo de vida do ativo. Segundo Enríquez *et al.* (2019) essa mudança poderia ser alcançada associando ao BIM às funcionalidades do PLM, o que permitiria integrar os dados, os processos e as pessoas além de melhorar o desempenho nas tomadas de decisões. Com a consolidação do BIM, da Internet das Coisas (IoT), do *Cyber-Physical System*, e dos serviços em nuvem tem permitido uma rápida evolução da modelagem e simulação de processos com a ascensão do conceito de *Digital Twin* (FULLER *et al.*, 2020). Contudo, a pesquisa em DT para o ambiente construído ainda está em seus estágios iniciais e se limitam, na maioria das vezes, em revisão da literatura sem mostrar uma aplicação prática (BOJE *et al.*, 2020; CIMINO; NEGRI; FUMAGALLI, 2019; DENG; MENASSA; KAMAT, 2021; HOLLER; UEBERNICKEL; BRENNER, 2016; JIANG *et al.*, 2021; KRITZINGER *et al.*, 2018; LU, QIUCHEN; CHEN; *et al.*, 2020; LU, YUQIAN; XU; WANG, 2020; OPOKU *et al.*, 2021; TAO; ZHANG; NEE, 2019). Contudo, existe uma necessidade de compreender os avanços nas tecnologias capacitadoras subjacentes e estabelecer uma convergência entre os contextos para as pesquisas em andamento e futuras (HAZRATHOSSEINI; MORADI AFRAPOLI, 2023; JAVAID; HALEEM; SUMAN, 2023; MENG; DAS; MENG, 2023; ROGAGE *et al.*, 2022; SEPASGOZAR, SAMAD *et al.*, 2023; SHAHZAD *et al.*, 2022; XIE, HAIYAN *et al.*, 2023; XIE, XIANG *et al.*, 2023; YE *et al.*, 2023). Nesse sentido, a contribuição principal dessa pesquisa foi identificar, por meio de um estudo empírico, quais são os facilitadores mais relevantes que podem impulsionar esse processo de implantação dentro da transformação da indústria I4.0 para a I5.0.

Com a intenção de confirmar a originalidade deste trabalho, foi realizada uma revisão sistemática da literatura onde foram consultados mais de 300 estudos, porém nenhum deles envolveu diretamente as contribuições pretendidas nesta tese. Isso confirma a existência de lacunas na literatura e uma oportunidade de pesquisa para explorar de forma mais profunda os temas em questão não somente para as empresas, mas para a sociedade como um todo. A criação de um *framework* pretende apresentar um caminho mais suave e menos oneroso para as organizações, por meio da identificação de bases teóricas que suportem a implantação de *Digital Twins* na indústria da construção. Buscar-se-á integrar o PLM, BIM, IoT, plataformas em nuvem, BMC, FEL, modelo em V e Espiral fornecendo informações valiosas que servirão de guia para o processo de aplicação de um *framework*-DT. A plataforma em nuvem ACC foi considerada para criar o ambiente colaborativo para articular informações, modelos, fluxos de trabalho para o desenvolvimento de estratégias e direcionamento de ações e investimentos em

recursos que facilitam o processo de adoção BIM e IoT. Com a implantação de um DT (*Digital Twins*) durante o projeto e a construção, pretende-se que os dados, modelos e todo o histórico de informações estejam organizados e disponíveis para a fase de operação e manutenção das estruturas de edifícios industriais.

1.2 Objetivo geral

O objetivo desta pesquisa é desenvolver um *framework* para implementação de *Digital Twins* em Projetos de Capital durante as etapas de planejamento, design e construção de estruturas de edifícios industriais, de forma que as informações estejam acessíveis para a fase de operação e manutenção das estruturas, fazendo uso das tecnologias BIM, IoT e plataformas em nuvem.

1.3 Objetivos específicos

Os objetivos específicos que contribuem para o alcance do objetivo geral foram:

1. identificar os processos que influenciam as decisões em Projeto de Capital e determinar as tecnologias facilitadores para o desenvolvimento de um *framework*;
2. criar o *framework-DT* associando o modelo em V e a metodologia FEL em Projetos de Capital;
3. implantar o *framework-DT* em um projeto de referência em andamento;
4. validar o *framework-DT* avaliando analiticamente os benefícios alcançados em cada fase em relação aos métodos tradicionais;

1.4 Estrutura da pesquisa

A pesquisa foi estruturada em quatro capítulos sendo o **Capítulo 1** utilizado para apresentar a introdução com a justificativa, o objetivo geral e os objetivos específicos, além da estrutura da tese. No **Capítulo 2** foi feita uma revisão da literatura, apresentando os principais conceitos que fundamentam a pesquisa. Abordou-se alguns aspectos da sustentabilidade empresarial ao longo do *Product Lifecycle Management* (PLM). A metodologia *Front-End Loading* (FEL) foi considerada visando analisar quais fatores influenciam na tomada de decisão em Projetos de Capital. O conceito do *Building Information Modeling* (BIM) foi apresentado sob diferentes visões como o BIM Federado. Foi feito um apanhado sobre as tecnologias da indústria 4.0 e 5.0 e suas tecnologias facilitadoras como a *Internet of Things* (IoT). A plataforma em nuvem da *Autodesk Construction Cloud* (ACC) foi estudada buscando compreender sua aplicação no complexo cenário das estruturas de edifícios industriais. O Design Centrado no Ser Humano (DCH) e sua relação com o *Digital Twins* (DT) foi discutido para auxiliar na definição dos critérios projetuais a partir do interesse de um grupo no qual está inserido. Os conceitos de modelos de negócios sustentáveis para compreender a lógica de se obter valor para as empresas. O *Virtual Design and Construction* (VDC) e o *Integrated Digital Delivery* (IDD) foram abordados por integrar tecnologias digitais e práticas aplicáveis desde as fases iniciais do projeto até a entrega do empreendimento. A Gestão Visual e o *Business Model Canvas* (BMC) foram descritos visto que eles podem auxiliar no direcionamento dos modelos de negócios para a construção e planejamento de projetos de grande complexidade. Finalmente os modelos em V e em Espiral foram apresentados como aporte de um processo prescritivo e tradicional para criação do *framework-DT*. No **Capítulo 3** apresenta-se a metodologia desenvolvida o planejamento das etapas de pesquisa e os métodos que foram adotados. No **Capítulo 4** estão os resultados e discussões e no **Capítulo 5** as conclusões da pesquisa.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Sustentabilidade das construções

A incorporação do conceito de sustentabilidade à realidade das construções foi introduzida pelo Conselho Internacional de Pesquisa e Inovação em Edificações, *International Council, Research, Innovation, Building Construction* (CIB). Tal conceito indica que “para sociedade alcançar o desenvolvimento sustentável e a mitigação das consequências de mudanças climáticas (em escala global e local), torna-se necessário um esforço conjunto de todas as partes envolvidas no setor da construção” (CIB, 2020). A literatura mostra que a sustentabilidade empresarial está relacionada aos esforços empreendidos pelas organizações para atuarem além da lucratividade, ele deve incluir os *stakeholders*, a cadeia de suprimentos, e todos os atores envolvidos, para gerenciarem os impactos ambiental, social e econômico do negócio (OZBEKLER; OZTURKOGLU, 2020; RAJESH; RAJENDRAN, 2020).

Segundo Mrad e Frölen Ribeiro (2022) na Europa o setor da construção industrial é responsável por 42% do consumo de energia, mais de 50% dos materiais extraídos, 30% do consumo de água e resíduos e 35% das emissões de dióxido de carbono, por essa razão, torna-se necessário reduzir o consumo de recursos naturais, minimizar as emissões e proteger o ambiente natural. Gary (2019) aponta que o desenvolvimento contínuo da economia, impulsionou as empresas a cumprirem padrões de responsabilidade social e ambiental, além de valor de mercado e rentabilidade.

Assim, a integração transdisciplinar das novas tecnologias existentes, com os requisitos de sustentabilidade das construções, torna-se fator importante para uma prática integrada e para as tomadas de decisões desde os estágios iniciais dos empreendimentos (OLÁH *et al.*, 2020). Contudo, o desafio para os gestores é avaliar o impacto dessas decisões para as partes interessadas considerando o desempenho do empreendimento. A incorporação de novos conceitos para um modelo gerencial eficiente requer a conscientização de todos os envolvidos para alavancar mudanças significativas em todas as etapas do processo produtivo (BOUJAOUDEH KHOURY, 2019). Acredita-se que tal meta só será alcançada pelo uso efetivo de metodologias que garantam apoio à tomada de decisão, baseadas em uma visão holística de investimento e de geração de valor de longo prazo. O intuito dessa integração transdisciplinar é administrar o negócio tendo como centro os clientes, os funcionários, os acionistas, os fornecedores e a sociedade (KERZNER, 2020).

Dentro dessa visão empresarial surge o conceito de *Environmental Social Governance* (ESG) que passou a ser adotado por gestores e empresas em todo o mundo, muitas vezes, de forma semelhante à sustentabilidade. O ESG surgiu como resposta aos problemas ambientais ocorridos nos países europeus e americanos, após acelerado crescimento industrial das décadas de 1960 e 1970 (GAO *et al.*, 2021). Nesse período, surgiram as primeiras campanhas públicas para proteção ambiental e como resposta o mercado de capitais passou a valorizar os investimentos ambientalmente responsáveis. Embora o conceito ESG não seja recente, somente no início de 2010, essas questões foram gradualmente incorporadas pelas empresas. Os gestores corporativos tiveram que realizar várias reformas de governança após a crise financeira de 2008 na União Europeia para retornar a confiança dos investidores. Diferentes estudos demonstram que empresas com alto desempenho do ESG possuem melhor performance financeira, menor risco de passar por crises e são mais interessantes para os investidores (AMEL-ZADEH; SERAFEIM, 2018; BUALLAY; AL-AJMI; BARONE, 2021; DUQUE-GRISALES; AGUILERA-CARACUEL, 2021; FRIEDE; BUSCH; BASSEN, 2015; SASSEN; HINZE; HARDECK, 2016).

Dentro dessa perspectiva, pode-se concluir que, enquanto a sustentabilidade está ligada ao conceito de suprir as necessidades do presente sem afetar as gerações futuras, o ESG está ligado à mensuração da performance de uma organização nas questões ambientais, sociais de transparência e eficiência (SEBRAE, 2023). A solidez das empresas estaria associada ao conceito ESG e com isso, elas não apenas atenderiam aos critérios tradicionais de desempenho financeiro, mas também estariam comprometidas com práticas sustentáveis, éticas e responsáveis em todas as áreas envolvidas.

A Figura 1 mostra algumas características que são peculiares do ESG e de sustentabilidade dentro de uma perspectiva de inovação. A adoção de um plano de gestão sustentável, traria impacto positivo no valor de longo prazo e na flexibilidade dos negócios. Pode-se, portanto, classificar o ESG como parte integrante da sustentabilidade empresarial uma vez que “para uma empresa ser sustentável é preciso implementar as melhores práticas de ESG” (SEBRAE, 2023). Nessa perspectiva, novas práticas que apoiam a gestão integrada de projetos e o uso da inovação, com economia, aumento de produtividade e sustentabilidade no setor da construção ganham força em todo o mundo.

Figura 1 - Conceito de ESG x Conceito Sustentabilidade

Environmental Social Governance (ESG)	X	Sustentabilidade
Esta relacionado ao microambiente, ou seja, às práticas internas das empresas 		Está ligada ao macro ambiente, relacionando governos, empresas, países e regiões. 
Específico e mensurável, transformando valores e propósitos em ações efetivas que garantam dados e informações precisas para investidores e consumidores.		Conceito mais amplo e de alcance de longo prazo.
Foco em diminuir riscos		Foco nas oportunidades em uma agenda ampla para a sociedade.

Fonte: Adaptado SEBRAE (2023)

Na última década, a gestão das estruturas de edifícios industriais tem passado por significativas mudanças, sendo importante implementar soluções tecnológicas para manter a competitividade e garantir o desenvolvimento sustentável ao longo de todo o ciclo de vida de um empreendimento.

2.1.1 *Product Lifecycle Management* – (PLM)

O conceito de gestão do ciclo de vida do produto ou *Product Lifecycle Management* – (PLM) surgiu na década de 1980 na indústria automobilística e aeroespacial. Seu objetivo foi, não apenas criar, armazenar, compartilhar e gerenciar dados, mas ampliar suas funcionalidades de aplicação. De acordo com Aram e Eastman (2013) as funcionalidades do PLM surgiram da necessidade de melhorar o desempenho do projeto, apoiar as tomadas de decisões baseadas em soluções rápidas e por isso tem sido utilizado em diferentes áreas. A literatura apresenta definições para o termo PLM e muitas delas são utilizadas em contextos específicos. Autores como Soto-Acosta, Placer-Maruri e Perez-Gonzalez (2016) referem-se ao conceito como o processo de gestão de todo o ciclo de vida do produto, desde sua concepção e fabrico até a sua eliminação. Os autores afirmam que o PLM é capaz de gerir as informações de forma eficiente, econômica, além de integrar os dados, processos, ferramentas, sistemas empresariais e as pessoas para assegurar a qualidade do produto. Portanto, o papel principal dos sistemas de PLM é gerenciar as informações como uma estratégia necessária para que as empresas sejam bem-sucedidas nos mercados globais. Autores como Aram e Eastman (2013); Li *et al.* (2021); Malagnino *et al.* (2017); Saaksvuori e Immonen (2008) apresentam as principais características do PLM que podem ser identificadas dentro de alguns preceitos comuns:

- O PLM amplia e cobre as fases de definição de projeto, manufatura e operações, exige que o sistema atue como um *hub* conectando dados das atividades e as informações do produto físico durante todo seu ciclo de vida;
- é uma atividade de gerenciamento de negócios de alto nível, que auxilia as empresas a obter melhorias nos negócios em aspectos como: desempenho financeiro, melhorias de qualidade e redução de tempo;
- No PLM as atividades são definidas e documentadas em processos de negócios multifuncionais e as soluções permitem que as organizações colaborem entre disciplinas de forma participativa e integrada;
- O PLM associa pessoas, processos, sistemas de negócios e informações para gerenciamento de produtos durante toda sua vida útil.

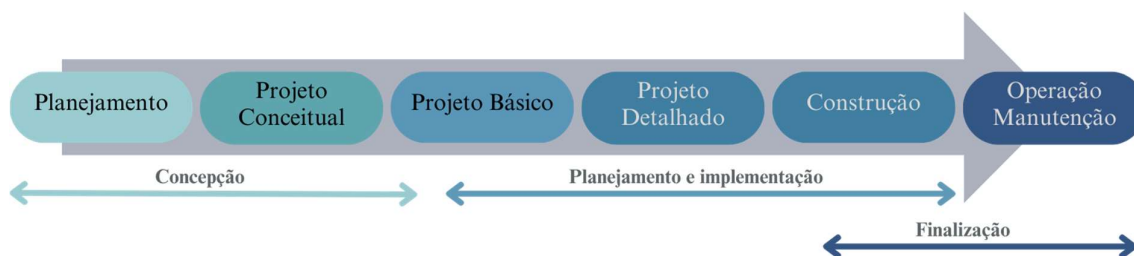
A implantação de um sistema PLM dentro de uma empresa é uma decisão importante, abrangente e complexa e tem se tornado uma estratégia interessante para ser adotada em estruturas de edifícios industriais. Ela deve iniciar e acompanhar todo o ciclo de vida do empreendimento e isso envolve o gerenciamento das informações que irão agregar conhecimento ao longo do ciclo de vida, de forma transparente e de modo a alcançar melhorias nos processos e maior competitividade nos negócios. Apesar do uso crescente de novas tecnologias para gerenciamento nas construções, o setor ainda enfrenta barreiras para sua implementação. Isso porque o sistema exige que equipes multidisciplinares estejam conectadas em um mesmo sistema de informação, e são poucos os estudos que apresentam explicitamente como obter uma integração que associe tais tecnologias (LI, LINGZHI *et al.*, 2021). Em função dos pontos positivos que pode trazer para indústria da construção e para todos os envolvidos, destacam-se em diferentes aplicações para projetos estruturais industriais aspectos ligados a sustentabilidade das construções com a melhoria da preservação ambiental, social e econômica. Particularmente, no desenvolvimento das estruturas de edifícios industriais de projetos de capital, grandes quantidades de informações estão suscetíveis a uma variedade de fatores inter-relacionados e as partes envolvidas, muitas vezes, possuem necessidades específicas e ora divergentes (ORAE *et al.*, 2017).

2.1.2 Projetos de Capital (PC)

Para desenvolver um Projeto de Capital diferentes métodos podem ser utilizados para gerenciamento do projeto. Esses métodos estão crescendo em grau de importância tanto para o

meio empresarial quanto para o acadêmico (ROMERO; ANDERY, 2016). A sua implantação pode ser dividida em etapas, conforme mostrado na Figura 2, ou seja, planejamento, projeto conceitual, projeto básico, projeto detalhado, construção, operação e manutenção. A estrutura conceitual parte de uma análise de sinergias entre um método já amplamente utilizado em grandes empresas que é o *Front End Loading* (FEL), a estrutura do *Lean Delivery Production System* e os processos propostos para gerenciamento dos projetos no âmbito do *Project Management Body of Knowledge* – PMBOK. As etapas são compostas por um conjunto de ações como a concepção, planejamento e implementação até a fase de finalização, onde são inseridas em um macroprocesso. A transição de uma fase para outra normalmente é marcada por entregas técnicas, que podem ser de documentos, formulários, solicitações, entre outros. Essas entregas passam por uma revisão, para garantir que a fase esteja satisfatória, e poderá seguir para fase seguinte (PRADO, 2014).

Figura 2: Etapas em um Projeto de Capital



O volume de informações digitais geradas ao longo do ciclo de vida de um empreendimento aumenta à medida que avançam as fases de projeto conceitual, projeto básico e detalhado. Contudo, percebe-se que ainda existe uma significativa perda de informações digitais ao longo das fases devido a diversos fatores, tais como falta de interoperabilidade entre ferramentas, mudanças de empresas contratadas entre as fases de projeto, mudanças de escopo e de *softwares*, entre outros. Ao final da fase de construção, muitas vezes, ocorre a conversão dos dados digitais em documentos físicos que não são reaproveitados, em sua forma digital, nas fases seguintes de operação e manutenção. Além disso, as plantas industriais passam por constantes alterações e as equipes de operação voltam a reconstruir seus dados sem considerar o histórico digital das informações. Percebe-se com isso, que o investimento realizado em inovação e tecnologia durante as fases de projeto e construção é menosprezado na fase de operação, por falta de uma adequada integração dos dados entre as fases ao longo do ciclo de vida. Uma das razões para essa desconexão é que muitos negócios buscam uma migração muito gradual, utilizando modelos pouco eficientes ou limitando os seus orçamentos no que tange as tecnologias. Estudo recente da McKinsey (2023) mostra que uma estratégia eficaz seria a

computação em nuvem. Ela mostra que essa tecnologia pode gerar US\$ 3 trilhões de dólares até 2030, com redução e otimização de custos, ganhos na produtividade e, principalmente, geração de novos modelos de negócios. Dessa forma, para manter as informações digitais vivas ao longo do ciclo de vida de uma construção mais esforços devem ser investidos na atualização e troca de informações eficientes. Essa gestão é importante para garantir eficiência, qualidade e conformidade dos projetos, contribuindo para o sucesso e segurança das estruturas construídas, além de facilitar a comunicação entre as equipes envolvidas. Do ponto de vista conceitual a gestão de processos de projeto pode ser definida como um conjunto de atividades controladas e coordenadas, com datas de início e conclusão, que são realizadas para alcançar um objetivo em conformidade com requisitos especificados, incluindo as limitações de prazo, custo e recursos (ABNT, 2015).

O relatório do *Project Management Institute* (PMI) em parceria com instituições de ensino do Reino Unido chama a atenção para importância de investir tempo no planejamento inicial e garantir que os projetos sejam exequíveis e acessíveis antes de serem assumidos compromissos (WILLIAMS *et al.*, 2019). Segundo Lawani *et al.*, (2023) embora os gestores de projetos apontem abordagens analíticas, são poucas as tentativas de processos que influenciam na tomada de decisão nas fases iniciais do processo. A metodologia FEL fornece uma visão detalhada do projeto antes de seu início, o que permite que as partes interessadas alinhem as ações com os objetivos do projeto desde o início (SERRÃO, 2023).

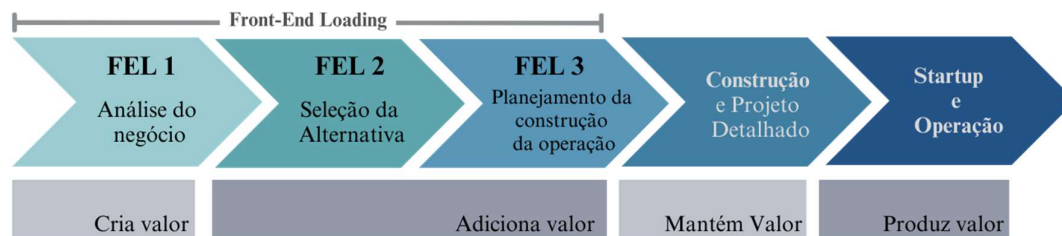
2.1.3 Metodologia *Front-End Loading* (FEL)

A metodologia FEL foi desenvolvida pelo *Independent Project Analysis* - IPA uma empresa americana cujo objetivo é comparar e analisar “Projetos de Capital” realizados em todo o mundo. A empresa possui bancos de dados detalhados e parametrizados, contendo informações do ciclo de vida de projetos, desde a sua concepção até a operação. Ressalta-se que no processo de gestão o IPA emprega a metodologia FEL para auxiliar no planejamento dos projetos buscando melhorar sua qualidade, além de aprimorar a sua execução. Dessa forma, a análise antecipada de lacunas na elaboração do projeto pode melhorar o alinhamento interno nas entregas e nos objetivos do projeto (RODRIGUES; SILVA, 2020). Para Babaei, Locatelli e Sainati (2021) trata-se de um processo exploratório para gerar as informações necessárias para moldar um conceito viável em um megaprojeto, avaliar as incertezas desses conceitos e tomar uma decisão final sobre avançar ou não avançar na consolidação do empreendimento.

Entretanto, percebe-se que os estudos sobre como as decisões reais são tomadas nos projetos ainda são escassos (NEWMAN; BEGG; WELSH, 2020). Além disso, a literatura é limitada sobre quais fatores influenciam a tomada de decisão do projeto (STINGL; GERALDI, 2021).. No Brasil os autores Romero e Andery (2016) descrevem em seu livro *Gestão de Megaprojetos: uma abordagem Lean*, as etapas da metodologia FEL. Segundo os autores o FEL deve ser desenvolvido em três fases principais: análise preliminar da empresa, análise de seus objetivos, e estruturação do planejamento do projeto, devendo obrigatoriamente ser realizadas antes das demais etapas de projeto. A metodologia FEL apresenta várias particularidades que devem ser trabalhadas, mas a grande vantagem em sua aplicação é possibilitar que os investimentos sejam conduzidos de forma disciplinada e que somente os negócios vantajosos economicamente e viáveis ambientalmente sejam efetivados. Busca-se com isso, minimizar riscos, reduzir custos e melhorar a eficiência do projeto (MENDES; POZNYAKOV, 2022). Normalmente ela é empregada em empresas de grande porte, sendo uma das principais vantagens, segundo alguns autores, permitir que as equipes de projeto identifiquem riscos potenciais no início do ciclo de vida do projeto e que tomem decisões estratégicas para evitar atrasos, falhas, ou gastos posteriores (CHENGER; WOICESHYN, 2021; SERUGGA; KAGIOGLOU; TZORTZOPOULOS, 2020; ZERJAV; MCARTHUR; EDKINS, 2021). Importante destacar que o FEL não elimina os riscos, mas evita que erros graves sejam cometidos pela falta de análises prévias, do que pode minimizar as incertezas do empreendimento. Dessa forma, a aplicação da metodologia em projetos de capital pode permitir que as decisões críticas sejam tomadas com base em informações sólidas e que o projeto seja bem planejado desde o início, o que irá resultar em um projeto mais eficiente, econômico e sustentável.

As principais características da metodologia FEL incluem a documentação detalhada sobre o progresso do projeto (documentação, avaliação de riscos, estratégias de mitigação, viabilidade, análise de custos, benefícios e retorno sobre o investimento), na tomada de decisão avalia-se o projeto para definir se ele deve avançar para a próxima fase ou se ajustes são necessários. Dessa forma, conforme descrito por Romero e Andery (2016) o FEL toma como base um processo de validação que normalmente acontece ao final de cada uma das três fases (FEL 1, FEL 2, FEL 3) conforme mostrado na Figura 3 e descritas na sequência. Ao término de cada fase de desenvolvimento, o projeto é submetido a validação nos chamados portões de aprovação (*Gates* 1, 2 e 3) de tomada de decisão.

Figura 3: Ciclo do empreendimento na metodologia FEL



Fonte: Adaptado de Romero e Andery, (2016)

Etapa (**FEL 1**): implica na definição do escopo e dos objetivos do empreendimento, que deve ocorrer de forma clara e alinhada com as estratégias empresariais. Realiza-se uma análise prévia para verificar se o projeto é economicamente viável, nessa análise prevê-se uma faixa de variação do custo entre -25% e +40%, além da análise de viabilidade do negócio. Considera-se, além dos requisitos técnicos e econômicos, os ambientais e sociais, realiza-se cálculo da taxa de retorno interna (TRI) e do valor presente líquido (VPL), dentre outros. Submete-se o projeto ao primeiro portão de aprovação *Gate 1*.

Etapa (**FEL 2**): estuda-se quais as melhores alternativas conceituais apresentadas, considera-se soluções tecnológicas e construtivas, buscando uma melhor definição do escopo. Dentre as alternativas seleciona-se as melhores soluções com as definições básicas (*briefing* de projeto), as instalações, incluindo edificações, prevendo variações de custo, que devem girar entre -15% e +25%. São avaliadas as *Value Improvement Practices* (VIPs) apresentadas na Tabela 1, que serão consideradas no desenvolvimento do projeto, assim como alternativas de gestão ambiental (ROSENGART *et al.*, 2023). Submete-se o projeto ao segundo portão de aprovação *Gate 2*.

Tabela 1: Práticas de Melhoria do Valor (VIP) e Categorias Verde

Item	Melhoria de valor	Exemplos
1	Normas	Aplicação/Exceção/Modificação de uma norma local para evitar uma conceção excessiva (por exemplo, classes de linhas rebaixadas, simplificação de esquemas típicos de instalação).
2	Locar ou Reutilizar	Reutilize equipamentos/instalações existentes ou terceirizar uma operação específica.
3	Verificar Tecnologias	Escolha das melhores tecnologias disponíveis, novos materiais e melhores práticas para adotar (aplica-se a equipamentos, procedimentos, soluções de fabricação).
4	Simplificar os Processos	Verificar o fluxograma para eliminar redundâncias, funções/manuseio/transportes não essenciais. Combinar mais operações em uma só. Reduzir a instrumentação duplicada.

5	Otimizar Instalações	Verificar a estrutura do equipamento para facilitar a operação. Concentrar-se em equipamentos ou materiais especiais/difíceis de obter/caros e verificar a existência de alternativas.
6	Dimensionar até a Capacidade	Verificar a existência de equipamento/estruturas/linhas com especificação excessiva (projeto excessivo). Investigue se as tolerâncias de projeto e os fatores de segurança podem ser reduzidos (VIP).
7	Melhoria da capacidade de construção	Verificar a clareza dos desenhos/planos/especificações para evitar mal-entendidos/trabalhos/atrasos. Considerar antecipadamente as questões de construção ao projetar (operação, acessibilidade, etc.). A modularização ou pré-montagem é uma vantagem. Explorar ferramentas de projeto BIM, 3D e Cad.

Classes de impacto ecológico para a indústria de transformação

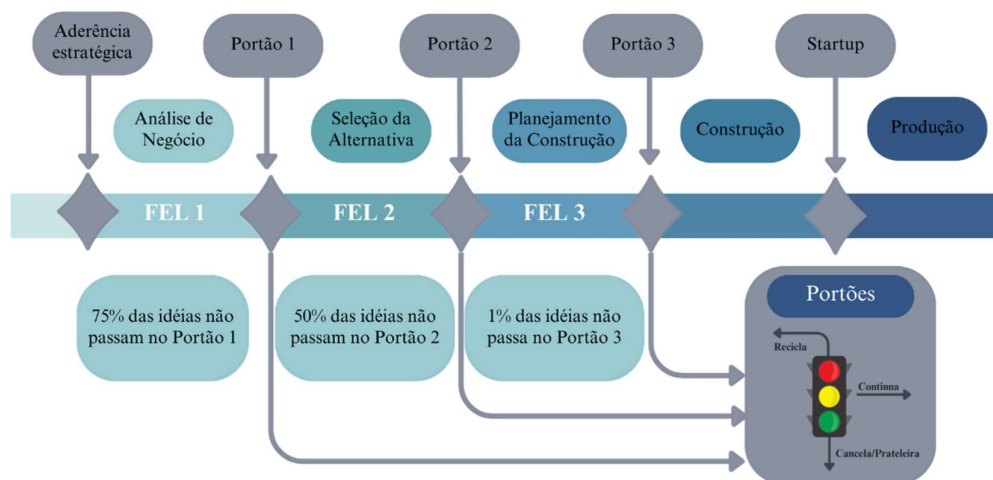
Item	Classe de Impacto	Exemplos
A	Energia e Recursos	Identificar oportunidades para reduzir o consumo anual de serviços públicos e energia (por exemplo, kWh/ano de eletricidade, m ³ /ano de água, combustível).
B	Construção e Materiais	Otimizar o projeto para reduzir a dimensão dos equipamentos e das instalações e o uso de materiais (por exemplo, comprimento da tubulação, toneladas de aço, toneladas de concreto).
C	Produtos Químicos e Resíduos	A seleção de uma tecnologia para aumentar os rendimentos de reação/separação pode reduzir as quantidades de produtos químicos utilizados (ingredientes ou solventes) ou os resíduos gerados (efluentes e subprodutos).

Fonte: Adaptado Rosengart *et al.* (2023)

Etapa (**FEL 3**): refinam-se os parâmetros de projeto com estudos mais detalhados sobre o planejamento do projeto e alternativas anteriores, avalia-se os riscos técnicos e financeiros associados ao projeto, desenvolve-se um plano de gestão de riscos. O nível de detalhamento do projeto cresce gradualmente nessas três fases. Inicia-se a fase do Projeto detalhado com base nas conclusões das fases anteriores. Os riscos devem ser gerenciados continuamente e as tomadas de decisões informadas, durante a construção é previsto uma variação no custo entre -10% e +10%, monitora-se ainda o desempenho do projeto em relação aos objetivos estabelecidos. Submete-se o projeto ao terceiro portão de aprovação *Gate 3*.

A Figura 4 mostra os portões de aprovação que servem para garantir que o projeto progrida de maneira consistente e que as decisões contenham dados alinhados com os objetivos do projeto. Os *Gates* (portões de aprovação) geralmente envolvem a revisão de documentos, análises e avaliações que são realizadas durante cada fase. Estas revisões servem como um instrumento de controle da qualidade do projeto ao garantir a evolução da maturidade nos entregáveis. Nos portões, as decisões também podem conter análises críticas que auxiliam o gestor na tomada de decisão sobre a continuidade ou não do projeto.

Figura 4: Processo de validação da metodologia FEL nos portões de aprovação



Fonte: Adaptado Romero e Andery, 2016

Após respondidas todas as questões, o projeto avança para a fase seguinte tomando como base a melhor opção. Segundo Romero e Andery (2016) 75% das ideias não passam pelo *Gate* 1, 50% não passam pelo *Gate* 2 e apenas 1% das ideias não passam pelo *Gate* 3. Dessa forma, a aplicação dos três níveis da metodologia FEL em Projetos de Capital pode auxiliar e garantir que as decisões críticas sejam tomadas com base em informações sólidas e que o projeto seja bem planejado desde o início. Isso pode resultar em empreendimentos mais eficientes, econômicos e sustentáveis.

A gestão de projeto na construção tradicional tem sido pautada para enfrentar as dificuldades de integração dos dados com a quantidade crescente de informações e o desafio de manter a segurança dos dados. A gestão de projeto de construção, precisa inovar para adaptar-se ao ambiente de trabalho que está em constante mudança (ZHAO, RUI; CHEN; XUE, 2023). A atual adoção das tecnologias da informação e da comunicação, associada as digitais trouxeram oportunidades para uma digitalização atualizada da informação e integridade dos dados. Dessa forma, o desenvolvimento de projetos complexos desafia as práticas de trabalho atuais que deve ser desenvolvida entre equipes multidisciplinares de modo a garantir confiança, transparência e uma melhor gestão dos processos (OWUSU *et al.*, 2019). De acordo com Zou, Jones e Kiviniemi (2015) com o crescente volume de documentos gerado durante o ciclo de vida de um ativo, o BIM pode funcionar não somente como uma representação digital das características

físicas e funcionais de um edifício, mas ele estabelece um repositório de informação compartilhado, formando uma base confiável para a tomada de decisões.

2.2 *Building Information Modeling (BIM)*

Historicamente, o conceito BIM surgiu no final dos anos 1980 na *Princeton University*, instituição de ensino e pesquisa nos Estados Unidos, quando o arquiteto Jerry Laiserin, iniciou a *International Alliance for Interoperability*. Esta aliança tinha como objetivo melhorar a troca de informações entre *softwares* usados na construção civil. Embora não exista uma única definição para a metodologia BIM, o *Handbook* conceitua como uma “tecnologia capaz de criar um ou mais modelos virtuais precisos de uma construção, oferecendo suporte ao projeto em todas as etapas do ciclo de vida, o que permite melhores análises e controles se comparado aos processos manuais, e contém geometria e dados precisos para apoiar as atividades de construção, fabricação e aquisições de uma construção” (SACKS *et al.*, 2018).

O livro de Kensek (2018) aborda o papel do BIM na criação de *softwares* e processos nas áreas de arquitetura, engenharia e construção. O autor apresenta fundamentos e aplicações e os subconjuntos BIM rotulados em termos de dimensões: 3D (modelo em três dimensões); 4D (integração do tempo, cronograma); 5D (custo); 6D, 7D e 8D podem variar entre os componentes do ciclo de vida, sustentabilidade, gerenciamento de energia, questões de segurança. Este conceito tem evoluído e passa a ser discutido de forma mais abrangente e direcionada para os usos e as aplicações de um modelo BIM. O tipo de informação e a forma como esse conhecimento será apresentado em um modelo podem ser aprimorados para aumentar a compreensão e clareza em um projeto de construção. A empresa internacional de tecnologia Axis Steel - BIM (2021)², classifica os aspectos técnicos dos usos do BIM conforme mostrado na Figura 5 e descritos na sequência.

O modelo 3D refere-se a geometria: é o tipo mais comum de modelo BIM, ele mostra as três dimensões geométricas (x, y, z) de uma estrutura. Esse tipo de modelo auxilia as partes interessadas a visualizar uma estrutura antes do início do projeto e fornece aos profissionais de

² Axis Steel - BIM, empresa internacional que oferecer serviços de digitalização e consultoria para área da construção. Fonte: <https://axissteel.com/the-dimensions-of-bim-explained/>

arquitetura, engenharia e construção, uma visão geral para planejar, projetar, construir e gerenciar a edificação e sua infraestrutura de maneira mais eficiente.

Figura 5: Usos do BIM



Fonte: Adaptado da Axis Steel-BIM (2021)

A integração do modelo BIM na linha do tempo com base no cronograma auxilia no planejamento, na otimização da programação, além de aumentar a comunicação entre as partes interessadas durante cada fase da construção. Ele mostra como o empreendimento irá evoluir ao longo do tempo, com a inclusão de informações de programação no modelo. A gestão econômica é útil desde o início de um projeto ou construção, quando se deseja estimar os custos para diferentes cenários, além de permite visualizar e analisar o orçamento ao longo do tempo. Aspectos relacionados à sustentabilidade, com informações que permitem às partes interessadas como por exemplo, analisar o consumo de energia de uma estrutura inicial e ao longo do tempo, além de melhorar o gerenciamento operacional após a conclusão da construção. Na manutenção as partes interessadas podem acompanhar todos os dados importantes dos ativos, como *status*, informações de garantia, especificações técnicas e manuais de manutenção e operação, todas as informações relacionadas ao gerenciamento de instalações são armazenadas no modelo de dados da construção (AXIS STEEL, 2021).

Ingram (2020), em seu livro *Understanding BIM*, apresenta o modelo BIM como uma plataforma colaborativa inteligente que pode coletar informações das partes interessadas ao longo do seu ciclo de vida. Para o autor no método de representação 4D faz parte do modelo de informações do edifício, por exemplo, a ordem e o tempo de instalação de um determinado objeto, além de poder indicar o momento em que a sua entrega será necessária no canteiro de obras. No método de representação 5D o gerenciamento de custos faz parte do modelo de informações do edifício e pode ser usado para estimar os custos de construção, operação e até mesmo de manutenção. Quando combinados, os custos também podem ser monitorados em tempo real e as previsões podem ser feitas com base em mudanças e progressos reais. Segundo

o autor, essas previsões de custos são importantes para o proprietário do projeto, e devem ser atualizadas mensalmente, dessa forma, ele pode se concentrar nos custos totais do futuro.

O *National Institute of Building Science*³ acrescenta que o BIM é uma representação digital das características físicas e funcionais de um empreendimento. Como tal, o BIM é um recurso de conhecimento compartilhado para obter informações sobre a edificação e forma uma base confiável para tomada de decisões desde o início do ciclo de vida dos ativos. Uma premissa do BIM é a colaboração de várias disciplinas em diferentes fases de um projeto, pois ele permite inserir, extrair, atualizar ou modificar informações no modelo pelas partes interessadas. Vários autores exploraram os benefícios e desafios do BIM, no entanto, percebe-se uma falta de investigação sobre o seu papel na fase de fim de vida do ativo, do seu impacto ambiental e da viabilidade econômica do bem construído (CHUANG; YANG, 2023; LI, LINGZHI *et al.*, 2021). Estudo recente de Cheng *et al.* (2024) mostra que o BIM é um processo que modifica a forma de abordar os projetos de estruturas de edifícios industriais, permitindo a criação de um banco de dados a ser utilizado em todas as etapas do empreendimento com integração de documentos, informações e gráficos num modelo HBIM para preservação de edifícios históricos. Para Teulier e Bagieu (2024) o BIM é uma representação compartilhada de ativos construídos que facilitam os processos de projeto, construção e operação. Abuhussain *et al.* (2024) desenvolveram um estudo para avaliar as principais funções que o BIM desempenha na gestão de edifícios complexos ao longo do seu ciclo de vida. Os autores destacam a necessidade de implementar uma estratégia BIM completa ao longo das fases de projeto, construção, operação, manutenção, até o fim de vida do ativo, o que pode melhorar a gestão das instalações, diminuir despesas e promover a sustentabilidade. Aliado a todos esses fatores, os investidores estão atentos com a gestão de projeto de construção a partir de práticas sustentáveis, com vistas nos ganhos operacionais e financeiros para as empresas, pois as que negligenciam fatores ambientais e sociais nas suas operações comerciais enfrentam, consequências indesejadas por parte dos investidores (SHAKIL, 2021).

A Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC) conceituou o BIM como uma plataforma de informações, aplicada à construção civil, envolvendo tecnologia da informação, capaz de gerenciar o processo de projeto de uma edificação e testar seu desempenho por todo

³ Tradução do original: “is a digital representation of physical and functional characteristics of a facility. As such, it serves as a shared knowledge resource for information about a facility forming a reliable basis for decisions during its life cycle from inception onward. A basic premise of Building Information Modeling is collaboration by different stakeholders at different phases of the life-cycle of a facility to insert, extract, update or modify information in the model”. (<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/building-information-modeling>)

seu ciclo de vida. Todas as ações e resultados são alcançados por meio do uso de recursos computacionais organizados em plataformas digitais e com a utilização de objetos virtuais (CBIC, 2016a). Contudo, existem várias barreiras e particularidades que têm impedido a implantação plena do BIM nas empresas brasileiras. A CBIC (2016b) apresenta quatro potenciais problemas que impedem de forma efetiva a implantação do BIM no Brasil. Resistência às mudanças por partes das organizações e das pessoas; dificuldade de compreensão do que é o BIM; questões culturais; e aspectos intrínsecos da tecnologia BIM. Segundo a Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI) o alto investimento inicial em *softwares* e *hardwares*, aliado aos custos de treinamento, à baixa produtividade inicial, torna a implantação do BIM dispendiosa. As empresas têm buscado superar essa barreira focando nos benefícios em longo prazo (ABDI, 2017). De acordo com Eastman *et al.* (2014) existem também barreiras legais e contratuais que são importantes de serem citadas, elas devem ser alteradas quando se trabalha em um ambiente colaborativo e que depende de atualizações constantes. Ambos os lados devem ser protegidos, direitos autorais garantidos e responsabilidades identificadas. Abbasnejad *et al.* (2021) acreditam que a resistência às mudanças seja fruto da relutância da própria indústria da construção em ter que alterar seus processos de trabalho, sendo este talvez, o principal paradigma a ser quebrado para que o BIM seja adotado plenamente nas organizações.

2.2.1 Normas e Regulamentações BIM

O Governo Federal criou em 2017 o “Comitê Estratégico de Implementação do BIM” e em 2018 foi promulgada a “Estratégia Nacional de Disseminação de BIM” que foi revisada e republicada em 2019. Em abril de 2020 o Decreto Nº 10.306, foi instituído com o intuito de promover a transformação digital na indústria da construção e impulsionar a utilização do BIM no Brasil. A implantação teve início em 2021 (em projetos de arquitetura e engenharia) e exige que as empresas entreguem os processos de licitação dentro da plataforma BIM. Em janeiro de 2024, a “Nova Estratégia BIM BR” foi publicada e está em andamento a elaboração de uma proposta de plano de trabalho para a referida estratégia federal. Contudo, essa mudança está sendo realizada de forma gradual, e pretende-se que até 2028 os modelos BIM contenham informações que consigam abranger todo o ciclo de vida da edificação. Isso reflete na crescente demanda por profissionais preparados e habilitados para desenvolver e gerenciar projetos complexos.

Dentro dessa perspectiva, uma série de documentos estão sendo produzidos para auxiliar na gestão do elevado volume de informação gerado ao longo do ciclo de vida de um empreendimento, demonstrando que a tendência de adoção do método BIM é global. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) publicou a NBR 15.965 sobre “Sistema de Classificação da Informação da Construção”. A norma é composta por sete partes e por 13 tabelas baseadas no *OmniClass™* (sistema de classificação aberto criado para o mercado da construção na América do Norte) e seguem as recomendações da ISO 12006-2 *Building construction - Organization of information about construction works - Part 2: Framework for classification of information*. Na NBR 15.965 as tabelas foram adaptadas à realidade brasileira levando em consideração os diferentes sistemas, processos construtivos e componentes. A parte 1: define a terminologia e estrutura; a parte 2: as características dos objetos da construção; parte 3: os processos da construção; parte 4: recursos da construção; parte 5: resultados da construção; parte 6: unidades e espaços da construção e a parte 7: informação da construção. A intenção dessa norma é padronizar os códigos e termos utilizados nos projetos ao longo do ciclo de vida do empreendimento, permitindo que equipes trabalhem no mesmo modelo de forma simultânea e coordenada. De modo geral, percebe-se a capacidade multifuncional do BIM e ele possibilita inúmeras vantagens importantes para o setor e se apresenta como uma metodologia eficiente, pois permite aplicações e análises a partir de diferentes pontos de vista.

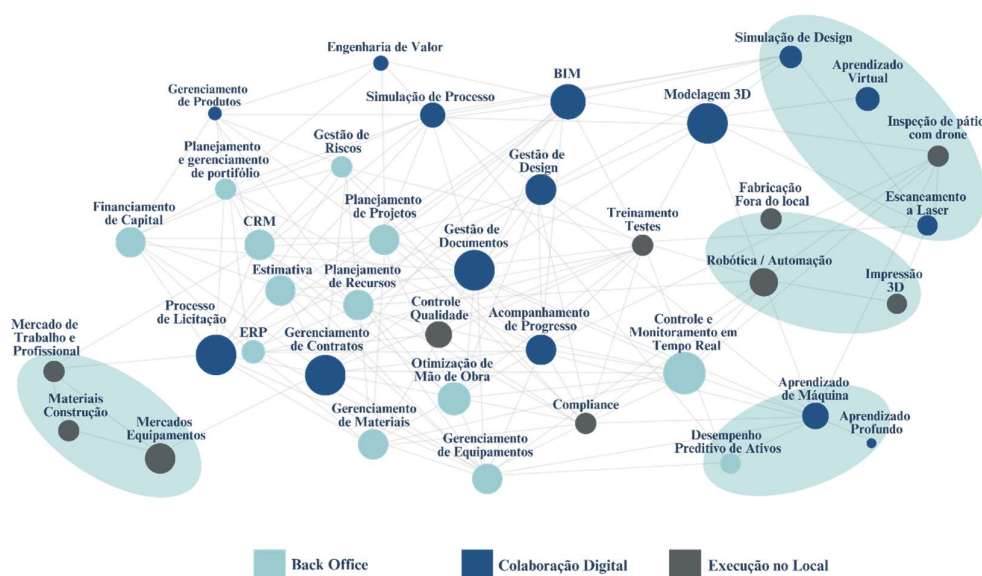
Estudos recentes mostram a dimensão prevista do mercado em BIM para os próximos anos, estima-se que o mercado mundial em BIM atinja 15,06 bilhões de dólares em 2027 com uma taxa anual de crescimento de 10,7% entre os anos de 2020 e 2027 (HUANG; NINIĆ; ZHANG, 2021). Este aumento mostra que a indústria da construção reconhece o valor do BIM em termos de melhoria dos procedimentos na gestão de projetos de construção e de infraestruturas (NIKOLOGIANNI; MAYOUF; GULLINO, 2022). Como resultado, os projetos que utilizaram o BIM podem reduzir os custos em até 20% (ZHANG, YUBING *et al.*, 2022). Durante as fases de projeto e construção, pode reduzir o tempo em até 7%, devido a melhorias na cooperação e entre as partes interessadas (ZHENG, YIDE; ZHANG; LIN, 2023). Conseguem reduzir custos de manutenção de 30% a 40% nas atividades de manutenção e sustentabilidade orientadas por dados, melhoram a eficiência energética de 7 a 10%, além de diminuir as emissões de carbono de 20% e 30% (ABUHUSSAIN *et al.*, 2024).

Ballard e Howell (1994) já afirmavam que 50% a 80% dos problemas no canteiro de obras ocorriam devido ao atraso no recebimento ou à falta de informações disponíveis. Atualmente, autores como Stanitsas, Kirytopoulos e Leopoulos (2021) fornecem uma visão holística dos

indicadores de gestão sustentável para projetos e oferecem aos profissionais a possibilidade de escolherem uma combinação adequada dependendo do enfoque de sustentabilidade que pretendem proporcionar aos seus projetos. Para Vrchota *et al.* (2020) o fator crítico determinante para a sustentabilidade de projetos focados na Indústria 4.0 está ligado aos recursos disponibilizados para a implementação dos projetos. Além disso, as informações devem ser atualizadas e acessíveis sendo a segurança um fator importante para a proteção dos dados, garantindo que apenas pessoas autorizadas tenham acesso à informação. Por essa razão a gestão de projeto de construção foi questionada nos últimos 50 anos em relação a outras indústrias e aos gerentes de projeto caberia fortalecer os relacionamentos, promover a colaboração e, assim, fomentar o desempenho do projeto (DABOUN; MD YUSOF; KHOSO, 2023). Segundo Wang *et al.* (2020) são várias as razões para tais questionamentos, isso porque os projetos estão se tornando cada vez mais complexos à medida que a tecnologia avança, exigindo um nível cada vez mais elevado de gestão. Além disso, novos níveis de conhecimentos especializados são exigidos dos colaboradores, gestores e partes envolvidas (LIU, MINGQIANG *et al.*, 2019).

A Figura 6 descreve as diferentes partes interessadas em um projeto de construção e as interconexões entre elas com diferentes níveis de comunicação. Esses sistemas intersetoriais se mal conectados podem produzir lacunas de informação ou atrasos desnecessários. Portanto, é importante que a informação correta chegue ao “lugar certo na hora certa”.

Figura 6 - Partes interessadas nas etapas de projeto e processos de construção

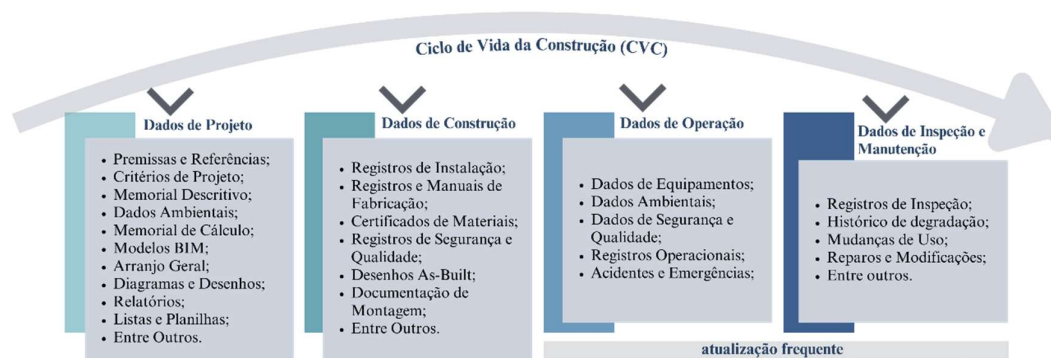


Fonte: Adaptado Halonen (2022)

Para um efetivo gerenciamento do ciclo de vida das construções, as informações sobre os detalhes do projeto necessitam ser compartilhadas entre os membros das equipes de engenharia, e os colaboradores precisam comunicar entre si o progresso da construção. Além disso, as equipes de operação e gerenciamento de instalações precisam obter *feedback* das instalações e dos ocupantes do edifício durante a operação (TANG *et al.*, 2020). Nesse novo cenário de transformação digital percebe-se que diferentes informações são geradas e torna-se necessário sistematizar a base de conhecimento e a interoperabilidade de dados para preencher lacunas de informação e promover a sustentabilidade das construções (ZAKHARCHENKO; STEPANETS, 2023).

A Figura 7 mostra de forma esquemática os dados e documentos que normalmente são gerados ao longo do ciclo de vida de uma planta industrial, considerando o projeto, a construção, operação, inspeção e manutenção e que terão seus desdobramentos e atualizações.

Figura 7: Dados e informações geradas ao longo do ciclo de vida.



A digitalização da documentação relaciona-se à transferência do bem físico para o ambiente virtual, ela pode ser realizada fazendo uso de diferentes ferramentas e *softwares*, com variados níveis de precisão o que normalmente implica em elevados custos. Segundo (MDIC, 2018) a utilização do BIM aprimora práticas do setor da construção e traz diversos benefícios ao mercado, tanto para aqueles que participam da cadeia de produção (oferta) quanto para os proprietários e contratantes (demanda). A seleção da técnica mais adequada, dependerá da finalidade do modelo a ser digitalizado, do orçamento disponível, do tamanho, forma, nível de detalhe e matérias-primas do objeto ou edificação. Contudo, ainda existem barreiras a serem vencidas que podem gerar custos excessivos, atrasos, interrupção de serviços. De acordo com Li, Lingzhi *et al.* (2021) esforços devem ser empreendidos para alcançar uma atualização e troca de informações eficientes ao longo do ciclo de vida de uma construção, a partir de equipes multidisciplinares conectadas em uma mesma plataforma de informação, porém são poucos os

estudos que apresentaram explicitamente como obter uma integração digital efetiva. Para manter todas as informações digitais vivas torna-se necessário criar estratégias de gerenciamento de dados. O BIM segundo Wang, Hao e Meng (2019) é uma das tecnologias mais promissoras, ele contém informações geométricas e não geométricas e associa recursos tecnológicos para a gestão de documentos e de conhecimento (*Knowledge Management*). Nele as equipes podem contribuir para o gerenciamento dos ativos, sendo, portanto, um repositório de informações coletadas, utilizadas e atualizadas ao longo do ciclo de vida de um projeto. Nesse contexto, as tecnologias digitais têm propiciado novas formas e ferramentas para registrar, documentar e preservar as edificações a partir da digitalização dos documentos.

Para gerenciar as documentações vários modelos foram desenvolvidos ao longo dos anos, como por exemplo, o Gerenciamento Eletrônico de Documentos (GED)⁴. Ele é um sistema que utiliza recursos de *hardware* e *software* para o armazenamento, classificação, compartilhamento e acesso às informações. Seu objetivo é concentrar em um único local todos os dados do negócio, facilitando o acesso e tornando as informações mais seguras, busca-se com isso, melhora na produtividade e eficiência operacional (JASKULA *et al.*, 2024). A Figura 8 apresenta um esquema de gestão do ciclo de vida de documentos onde os usuários podem: criar documentos (captura/criar), revisar documentos (gestão/revisão), enviar para as pessoas interessadas ou para a gerência (entregar/publicar) e, uma vez aprovados e armazenados os documentos podem ser divulgados dentro da organização (guardar/preservar).

Figura 8: Gestão do ciclo de vida dos documentos



Fonte: Adaptado BIAS (2024)

⁴ Gerenciamento Eletrônico de Documentos - Equipe Totvs | 24 outubro, 2022 <https://www.totvs.com/blog/negocios/ged/>

Dessa forma, o fluxo de trabalho para gestão de documentos é considerado como um conjunto de elementos que estão inter-relacionados e cujo objetivo é normatizar, controlar e coordenar todos os processos e atividades que afetam a produção, recepção, circulação, armazenamento, organização, conservação e disposição final dos dados (BIAS, 2024)⁵. Assim, ao armazenar todos os dados em um ambiente comum essas informações devidamente gerenciadas irão evitar erros, retrabalho, além de melhorar a comunicação e a troca de informações entre equipes.

O *HxGN SDx* é uma outra solução *SaaS ALIM* modular da Hexagon baseada em dados armazenados em nuvem pela *web*, com a finalidade de facilitar o compartilhamento de informações, visto que o acesso é feito de forma digital, centralizada, o que reduz custos, tempo e riscos, decorrentes da falta de colaboração, durante todo o ciclo de vida da instalação. Ele ainda pode criar um gêmeo digital confiável, compatível com o padrão internacional BIM conectado de forma inteligente aos processos de trabalho do projeto (HEXAGON, 2024).

O módulo Docs do *Autodesk Construction Cloud* (ACC) é um ambiente de dados comum para gerenciamento de documentos baseado em nuvem. Ele visa simplificar os fluxos de trabalho de revisão e aprovação, alinhar os membros da equipe e facilitar o desenvolvimento do projeto com isso melhorar a precisão, reduzindo os erros e o retrabalho.

Em uma publicação recente, *Building Information Modeling: Shared Modeling, Mutual Data, the New Art of Building*, os autores apresentam o BIM como “o uso de representação compartilhada de ativos construídos que facilitam os processos de projeto, construção e operação”. Apoiar-se na norma internacional (ISO 19650/2022), que estabelece padrões de utilização do BIM e regula a gestão da informação sobre todo o ciclo de vida de um ativo (TEULIER; BAGIEU, 2024). O livro contou com a participação de acadêmicos e profissionais da engenharia envolvidos no projeto de pesquisa francês “*Modélisation des Informations Interopérables pour les Infrastructures Durables* (MINnD)”, esses profissionais apresentam os desafios do BIM a partir de perspectivas teóricas e práticas e fornece uma visão ampla para o modelo BIM evoluir em um ecossistema de modelos federados e ambientes de dados comuns.

⁵ O BÍAS é uma empresa de consultoria em Istambul na Turquia que tem como objetivo apoiar estudos e inovações de pesquisa e desenvolvimento acadêmico e tecnológico, e compartilhar o conhecimento e experiência com os serviços de Ciência e Tecnologia, bem como soluções inovadoras.
<https://www.biasdanismanlik.com/EcmIcerikYonetimi>

2.2.2 Construção do Modelo BIM Federado

A construção do modelo "BIM federado" refere-se a uma abordagem específica na implementação BIM, com base em modelos tridimensionais inteligentes e dados associados capazes de melhorar o processo de design. Isso permite que várias disciplinas (mecânica, estruturas, arquitetura, elétrica, tubulação, entre outras) colaborem em um mesmo projeto, cada qual contribuindo com seu próprio modelo BIM. A ideia é integrar as informações provenientes de várias fontes para criar um modelo unificado e completo do projeto (TEULIER; BAGIEU, 2024). Cada disciplina mantém seu próprio modelo e periodicamente, esses modelos são agregados para criar um modelo BIM federado que reflete a colaboração entre as diferentes partes envolvidas no projeto de construção.

A literatura mostra várias pesquisas envolvendo o BIM federado, segundo Gurgatz e Rigoni (2023) o modelo federado permite que os usuários trabalhem em um ambiente compartilhado e colaborativo. Para Pärn, Edwards e Sing (2018) o BIM federado se baseia em um conjunto de especificações abertas e padrões específicos que permite que diferentes *softwares* sejam compatíveis e interoperem entre si, viabilizando, uma colaboração e uma visão holística do projeto. Além disso, ele reduz conflitos, melhora a coordenação e facilita a tomada de decisões durante todo o ciclo de vida do empreendimento. Com o modelo BIM federado os dados do projeto são armazenados e agrupados em formato de banco de dados relacional, o que torna mais fácil acessar e compartilhar informações. De acordo com Bhagwat e Shinde (2016) os modelos são agrupados em um sistema completo utilizado para planejar, construir e gerenciar as obras de infraestruturas e edificações industriais. Segundo os autores o modelo também facilita a colaboração entre equipes distribuídas geograficamente, permitindo que diferentes usuários trabalhem em um mesmo modelo BIM federado o que é ideal para projetos complexos.

Diante disso, a interoperabilidade ocorre pela utilização de padrões abertos, como por exemplo, o *Industry Foundation Classes* (IFC) que utiliza uma linguagem comum composta por padrões e processos internacionais de dados. Segundo Ingram (2020) o IFC é um padrão internacional para transferência de informações orientadas a objetos entre *softwares* usados por diferentes partes interessadas em um projeto de construção. Ele é um formato de arquivo que permite a transferência de dados de um edifício com os metadados que ele contém. Na construção industrial onde os projetos são multidisciplinares e requerem a utilização de diferentes fornecedores de *softwares* é necessário que a consolidação seja feita em uma plataforma com a inclusão de todas as informações em um único modelo. Apesar das potencialidades

apresentadas, existem poucos trabalhos que utilizam de forma consistente o modelo BIM federado para auxiliar no gerenciamento do ciclo de vida do empreendimento. Dentro desse cenário ao descrever as tendências para a digitalização da documentação e automação do ambiente de produção industrial, os termos Indústria 4.0 e 5.0 se popularizaram em todo o mundo e apesar dos potenciais benefícios, em termos de melhorias na produtividade e qualidade, este conceito chama a atenção na indústria da construção (OESTERREICH; TEUTEBERG, 2016).

2.3 Transformação da Indústria 4.0 para 5.0

O conceito de Indústria 4.0 surgiu em 2011, durante a feira mundial de tecnologia industrial que aconteceu em Hannover na Alemanha. A partir de então, o termo se expandiu pelo mundo (HAZRATHOSSEINI; MORADI AFRAPOLI, 2023). Embora inicialmente a Indústria 4.0 (I4.0) tenha sido aplicada a sistemas de manufatura, a transformação digital da quarta revolução industrial trouxe impactos para o setor da construção industrial (DALLASEGA; RAUCH; LINDER, 2018). Com base nas implicações de longo alcance, exigidas pela utilização de práticas de digitalização e automação, até então pouco familiares para o setor, torna-se importante explorar as possíveis implicações políticas, econômicas, sociais, tecnológicas, ambientais e legais para adoção da I4.0 na construção (YOU; FENG, 2020).

Da mesma forma como nas revoluções anteriores, a I4.0 está mudando o setor industrial e os modelos de negócios, buscando agregar valor ao longo das operações da cadeia produtiva. Segundo Lin, Wang e Sheng (2020) para que os impactos da I4.0 sejam percebidos na estrutura organizacional, nos processos operacionais e no desenvolvimento tecnológico de uma empresa, faz-se necessário que a alta administração apoie projetos e investimentos proativos, principalmente para lidar com a complexidade e a competitividade no mercado.

A literatura se mostra bastante centrada em investigações de tecnologias em domínios de aplicações específicas, e muitas vezes negligencia os desafios de gestão que são implícitos à I4.0. Nesta base de investigação, Schneider (2018) sugere o desenvolvimento de pesquisas em três categorias: (i) investigações que potencializem a prática, (ii) o conhecimento, e (iii) alto impacto. Segundo Oláh *et al.* (2020) o conceito da I4.0 se aplica às dimensões de produção e lucros econômicos o que geralmente acarreta problemas para outras dimensões, como os aspectos de sustentabilidade. Contudo, a dinamicidade e autonomia são dois recursos que os modelos de simulação comuns não conseguem abordar na I4.0 (MUNIRATHINAM, 2020).

Ansari *et al.* (2020), Liboni *et al.* (2019) e Rauch *et al.* (2020) pesquisaram interfaces homem-máquina, e a maneira como as empresas estão relacionando as tecnologias da I4.0, com a gestão de recursos humanos. Contudo, a forma de realizar a segurança e o compartilhamento dos dados, no processo de fabricação, também é um ponto relevante que deve ser levado em consideração. Nessa perspectiva a adoção de sistemas *Cyber-Physical System* (CPS) tem despertado um crescente interesse de investigação, seja na área acadêmica ou no setor industrial.

2.3.1 *Cyber-Physical System* (CPS)

O CPS surgiu em um *workshop* realizado pela *National Science Foundation*⁶ cuja iniciativa foi desenvolver inovações científicas e tecnológicas para iniciar uma geração de sistemas de engenharia altamente confiáveis, produzidos com eficiência e capazes de desempenhar avanços em informação, computação, comunicação e controle. Segundo Lodgaard e Dransfeld (2020) a adoção do CPS teve como meta conseguir que os sistemas fossem interligados por meio de uma infraestrutura de comunicação ubíqua e que a partir dessa interação os objetos passariam a se comunicar com o ambiente e se reconfigurar em tempo real como resposta as novas necessidades. De acordo com Zhou *et al.*, (2019) os sistemas CPS desempenham um papel importante nos processos inteligentes de fabricação e produção, o que fornece vantagens em recursos e custos, se comparado com os sistemas de produção clássicos. Para Ding, Fan e Liu (2021) o principal objetivo do CPS é coordenar o processo de fabricação e aumentar a eficiência de execução das tarefas de produção, mediante distribuição de recursos. Ela funciona como um elo para os sistemas inteligentes, com base em uma arquitetura de rede aberta.

Desta forma, modelos centrados na técnica foram sendo reformulados para integrar os sistemas CPS da Indústria 4.0 aos seres humanos, o que conduziu ao *Human-Cyber-Physical System* (HCPS) ou sistema ciber-físico humano (ZHANG, CHAO *et al.*, 2023). Até início de 2022 o termo HCPS não era comum, ou mesmo reconhecido na literatura técnica ou científica. Diferentes autores o apresentam como um modelo emergente que surge para compreender e estabelecer conexões entre os sistemas inteligentes e suas relações com o ser humano, com grande potencial para aplicação em projetos complexos (COUPRY *et al.*, 2021;

⁶ National Science Foundation – NSF. Workshop on Cyber-Physical Systems<[//cps-vo.org/node/179](https://cps-vo.org/node/179)>

SEPASGOZAR, SAMAD M.E. *et al.*, 2021; TVENGE *et al.*, 2020; WANG, BAICUN *et al.*, 2022). Entendendo como “inteligente” a capacidade de comunicar e cooperar em tempo real, e de tomar decisões de forma autônoma, de se orientar com base nas informações (PEREIRA; ROMERO, 2017). Aliado a realidade virtual e a realidade aumentada surge uma nova e natural interface entre homem-máquina, trazendo oportunidades para integração das operações industriais com a nova geração de Sistema Ciber-Físico Humano (UHLEMANN; LEHMANN; STEINHILPER, 2017; YIN *et al.*, 2023). Apesar disso, percebe-se que o nível de envolvimento das pessoas nas decisões de trabalho nas empresas muitas vezes é negligenciado. Ocorre também, por parte dos envolvidos, um desconhecimento da cultura da empresa e uma falta de flexibilidade e apoio dos líderes, que dificulta o avanço tecnológico dentro das organizações. O engajamento e a competência dos seres humanos são características essenciais e necessárias para inovações, conforme aponta Wang, Baicun *et al.* (2022) “as tecnologias são criadas por humanos, servem aos humanos e trabalham em conjunto com os humanos, não importa de que perspectiva se observe” o mais importante é integrar o mundo cibernético aos sistemas de produção inteligentes e ao contexto humano. Yin *et al.* (2023) também corrobora com o pensamento do autor ao propor uma visão holística e abrangente sobre as questões relacionadas do SCFH, onde “a integração de elementos de controle computacional e monitoramento de processos físicos do mundo real, possam ser associados a uma ênfase específica de participação humana”. O autor reforça que é por meio da integração harmoniosa das tecnologias digitais e dos seres humanos que tal estratégia poderia ser aplicada em diferentes contextos, desde a automação de tarefas cotidianas até a melhoria da qualidade de vida das pessoas.

Dessa forma a Indústria 5.0 (I5.0) mudou o foco, do centro dos processos de produção para os seres humanos, abordando vários níveis de necessidades, que vão desde a saúde e segurança até a autorrealização e o crescimento pessoal. Ela concentra-se nos pontos fortes das pessoas, como por exemplo, a capacidade intelectual, a criatividade e a tolerância a falhas (ZHOU *et al.*, 2019). Além disso, a I5.0 facilita a busca de flexibilidade, agilidade e robustez ao combinar habilidades humanas com as dos sistemas. A abordagem centrada no ser humano coloca as necessidades e interesses humanos no centro da indústria, sendo relevante a qualificação e as competências dos trabalhadores, tornando-os competitivos e aptos para as funções (WANG, BAICUN *et al.*, 2024). Segundo Lu, Yuqian *et al.* (2022) ela seria uma das forças motrizes críticas para se alcançar os objetivos sociais em sustentabilidade e resiliência. Motivada pelo valor humano, pela justiça social e pela sustentabilidade, a I5.0 é proposta para destacar a importância de fornecer serviços de longo prazo para a humanidade e um crescimento econômico resiliente e

sustentável (KOLADE; OWOSENI, 2022; LENG *et al.*, 2022). Segundo Valette, El-Haouzi e Demesure (2023), o desafio é fortalecer a confiança e a aceitação humana em relação as novas tecnologias, para serem aplicadas em trabalhos futuros e fazer convergir engenharia, ciências sociais, humanidades, dentre outras, para garantir a sua implementação em larga escala nas cadeias de valor e nos ecossistemas. Percebe-se com isso que as ferramentas que facilitam a fusão do mundo virtual com o mundo físico estão evoluído e são uma tendência para indústria do futuro sendo o aprimoramento das conexões dos CPS à internet a base para a Internet das Coisas (IoT) (PEREIRA; ROMERO, 2017).

2.3.2 *Internet of Things (IoT)*

Em sua essência, a IoT interconecta dispositivos e sistemas em um esforço para aumentar os processos industriais, estendendo sua influência além dos dispositivos de computação típicos (GARRIDO-HIDALGO *et al.*, 2019). Esta extensa rede abrange dispositivos físicos integrados com sensores e atuadores, formando uma rede de visibilidade em tempo real em todo o ecossistema de produção. Embora não haja um consenso na literatura, pesquisadores como (MAGRANI, 2018) definem a IoT como uma rede de aparelhos ou objetos inteligentes conectados uns aos outros por meio da internet e capazes de interagir entre si, controlados remotamente por meio de dispositivos móveis ilustrados na Figura 9.

Figura 9: Objetos conectados entre si a partir de conexões com a internet (IoT).



Kraus *et al.* (2018) e Nambisan (2017) salientam que a transformação digital trouxe grandes mudanças na maneira dos empreendedores conduzirem seus negócios a partir de ambientes digitais, mais dinâmicos se comparados aos negócios tradicionais. Contudo, as tecnologias associadas a IoT estão em pleno desenvolvimento e elas devem se tornar indissociáveis do cotidiano de pessoas e organizações, sendo possível idealizar praticamente todos os tipos de objetos conectados à internet e trocando informações entre si (FUJINO; OGAWA; MINOWA,

2016). Embora a literatura tente definir a IoT, seus usos e seus componentes típicos, raramente ficam claros no cenário industrial. Boyes *et al.* (2018) salientam que o termo tem sido aplicado a dispositivos conectados em ambientes de consumo, domésticos, comerciais e industriais. No entanto, o uso onipresente do termo para se referir as tecnologias digitais na indústria, dificultam a análise dos tipos de arquiteturas e alternativas existentes. Dessa forma os autores propõem uma estrutura de tecnologias “industriais” para analisar a natureza dos dispositivos e a denomina como “Internet Industrial das Coisas” (IIoT). Seu uso seria como parte de um processo de análise de vulnerabilidades e ameaças para esses dispositivos, sendo capaz de prever e identificar padrões que podem não estar muito claros ao focar na tecnologia empregada, ou em questões específicas do setor industrial (AWOUDA *et al.*, 2024). A tecnologia IoT transformou todos os instrumentos eletrônicos em dispositivos que podem ser interconectados e compartilhar dados continuamente.

Como consequência, o volume de dados também cresce a cada ano no setor industrial. De acordo com o *International Data Corporation* (IDC) a cada dois anos, o mundo dobra a sua produção de dados. Estima-se que em 2025 a quantidade de novas informações, geradas por ano, deve ultrapassar 175 trilhões de *gigabyte* (EXAME, 2022). Para comportar e armazenar esse número elevado de dados surgiu o conceito de *Big Data* (BD) como uma evolução da tecnologia da informação e da I4.0. O BD é entendido como uma geração de tecnologias desenvolvidas para que empresas possam explorar economicamente esse volume de dados por diferentes fontes. Essa evolução mudou a forma como os produtos de infraestrutura, plataformas de desenvolvimento e *softwares* são entregues aos seus clientes (PAMUCAR *et al.*, 2024). Dessa forma, a gestão dos dados está se tornando cada vez mais complexa e as empresas precisam reestruturar os seus sistemas. De acordo com Chang e Grady (2019) selecionar a plataforma de BD é um dos desafios mais críticos para as empresas. A escolha da plataforma apropriada deve proporcionar recursos para processar, armazenar e estruturar dados. A literatura aponta que essa escolha é um problema de tomada de decisão para as empresas (PAL; ATKINSON; LI, 2020; ROUHANI; ROTBEI, 2022). Outro ponto importante que surge como forma de democratizar os dados e as informações, é o *Cloud Computing* (CC) ou computação em nuvem. Ela usa a conectividade e a internet para hospedar os mais variados recursos, programas e informações e permite que o usuário acesse a informação por meio de qualquer computador, tablet ou telefone celular. A CC está sendo considerada como uma democratização de dados e informações, pois oferece uma série de oportunidades para que as empresas tenham acesso a infraestruturas de alta qualidade (LI, YINGPAN; MA, 2017). Dessa forma, a

computação em nuvem está mudando a forma como os recursos de *hardware* e *softwares* são utilizados e gerenciados, pois ela está substituindo a presença de máquinas nos centros de processamento de dados por uma infraestrutura virtual em nuvem. Apesar de emergente no setor da construção, as empresas estão buscando o CC para reduzir os custos operacionais e de infraestrutura.

Mansouri e Akhavian (2018) afirmam que as principais utilizações da computação em nuvem são para facilitar o acesso de dados por todas as partes interessadas, economizar recursos e manter a segurança da informação. Para os autores a análise de dados em nuvem é essencial para uma rápida tomada de decisões sobre segurança na construção, sendo estes serviços essenciais para as empresas digitalizarem seus recursos principalmente os associados a soluções BIM.

Os serviços de CC têm sido utilizados no ciclo de vida do empreendimento principalmente nas fases de projeto e de construção, porém sua utilização nas fases de entrega e pós-ocupação, como a gestão de instalações, a gestão do conforto dos usuários e fim de vida da construção ainda não estão sendo bem explorada (BELLO *et al.*, 2021). Alreshidi, Mourshed e Rezgui (2018) empregaram o serviço em nuvem para propor um modelo BIM com solução de gestão da construção sustentada pela tecnologia de nuvem. A integração da tecnologia 5G com outras tecnologias existentes é essencial para apoiar novos bens de serviços e aplicações inteligentes. Esse serviço auxilia também locais onde a interação do ser humano é restrita, tal como servidores em locais remotos, câmeras de vigilância, veículos aéreos não tripulados, detector de bombas e robôs médicos, setor industrial, veículo autônomo, dentre outros (KULKARNI; DESAI; SIM, 2021).

Apesar de haver evidências de que uma maior integração de informações poderia trazer vários benefícios, o setor da construção ainda resiste em adotá-las (ALMAATOUK; BIN OTHMAN; AL-KHAZRAJI, 2016). Afolabi *et al.* (2018) mostraram que a computação em nuvem, embora raramente usada pelas empresas, é uma ferramenta essencial para a colaboração nas indústrias da construção. Assim, o CC além de melhorar a experiência de quem depende de recursos tecnológicos, utiliza a conectividade da internet para hospedar os mais variados recursos, programas e informações sendo possível acessá-la pelas facilidades da conectividade da IoT.

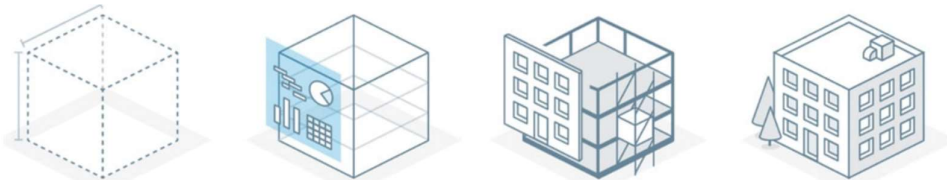
O processo de gestão nas construções precisa conectar as fases de planejamento, design e construção às de operação e manutenção, inclusive para garantir a integração futura entre a parte virtual e parte física real das construções. Equipes multidisciplinares precisam colaborar

entre si, e trocar experiências e conhecimentos, para construir um projeto bem-sucedido. Atualmente um serviço em nuvem utilizado em todo o mundo para apoiar o gerenciamento das construções é a plataforma *Autodesk Construction Cloud (ACC)*.

2.3.3 Autodesk Construction Cloud (ACC)

O *Autodesk Construction Cloud (ACC)* é uma plataforma em nuvem que evoluiu do BIM 360 para auxiliar na gestão de projetos e das construções. Ele pode conectar fluxos de trabalho, equipes e dados em todas as fases para reduzir o risco, maximizar a eficiência e a qualidade dos empreendimentos. Ele atua como uma fonte única de informações e combina o uso de *softwares* de design baseados em BIM para melhorar a colaboração, simplificar e organizar o gerenciamento de dados. Nesse ambiente é possível que os modelos BIM e demais informações referentes ao projeto, aos ativos e as estruturas, sejam atualizadas com dados em tempo real seja por computadores ou aplicativos móveis conectados à internet. Os módulos de trabalho chamados de Autodesk Docs, BIM *Collaborate*, *Build*, *Takeoff* e *Cost Management* funcionam em conjunto uns com os outros onde cada módulo contém diferentes guias e funcionalidades, conforme mostrado na Figura 10.

Figura 10: Funcionalidades do *Autodesk Construction Cloud (ACC)*.



	DESIGN	PLAN	BUILD	OPERATE
Recursos	• Design Autoral • Colaboração de Design	• Coordenação BIM • Quantificação • Gerenciamento de licitação • Qualificação • Coordenação 3D	• Gerenciamento de Projetos • Gestão de campo • Qualidade e Segurança • Controle de custo • Comissionamento	• Manutenção da Instalações • Ciclo de vida do Ativo
Dados Compartilhados	Modelos - Desenhos - Problemas - Especificações - RFIs - Custos - Recursos - As-Built			
Insight	Dashboards - Relatórios - IQ Construção - Data Connector			
Network	Rede de proprietários, projetistas, fornecedores e construtores			

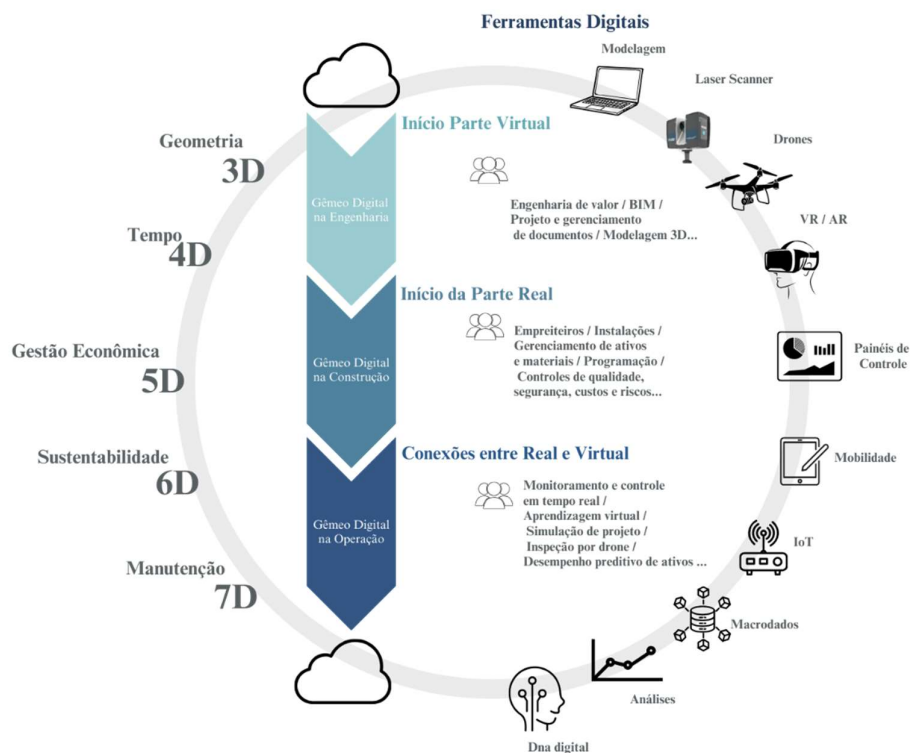
Fonte: <https://construction.autodesk.com/>

Com base nas necessidades de cada empreendimento as licenças para estes acessos podem ser adquiridas conforme as demandas por usuário do projeto. Dessa forma, a plataforma oferece módulos que incluem recursos para o design, planejamento, construção e operação conforme.

Toda documentação técnica relativa à segurança, qualidade, cronograma e custos do projeto devem estar digitalizadas e organizadas pelos gestores nas diversas fases do empreendimento para haver um adequado funcionamento dos fluxos de trabalho no ACC. Além da documentação ser um requisito oficial, também é possível fazer previsões do custo total do projeto e do cronograma de conclusão, com base em estimativas e previsões nas ferramentas. Assim, em projetos de construção, a gestão de obras também orienta o projeto, razão pela qual é importante ter planos atualizados a medida em que a construção avança. O objetivo é minimizar as insuficiências e melhorar a coordenação dos trabalhos entre a concepção do projeto e o canteiro de obras. Isso pode refletir diretamente nos quatro pilares básicos que incluem a segurança, qualidade, cronograma e custos, além de facilitar uma melhor tomada de decisão na implementação e gestão de ativos construídos (KHAJAVI *et al.*, 2019). Na literatura consultada apenas um trabalho foi identificado na Finlândia sobre a plataforma do ACC realizado por Halonen, (2022). No estudo o autor coletou dados em entrevistas realizadas com equipes de usuários do ACC o que resultou em uma estratégia para beneficiar supervisores em campo no dia a dia do trabalho. Os resultados indicaram uma alta potencialidade na utilização do ACC para gestão de campo, gestão de custos e colaboração em projetos. Dessa forma percebe-se a necessidade de pesquisas que direcionem o uso de plataformas em nuvem associadas aos processos construtivos, visto que a plataforma ACC permite reunir tanto as informações quanto as partes interessadas em todas as etapas de um projeto e em todo o seu ciclo de vida. A segurança na nuvem impõe um conjunto de políticas, regras, procedimentos e técnicas que se combinam para garantir a segurança das informações, proteger os dados, a privacidade dos clientes e manter a confidencialidade (SUSILA; SRUTHI; USHA, 2020). Quando uma versão digitalizada do projeto é criada são necessários muitos dados para serem armazenados e organizados de forma funcional e esse processo pode ser feito com a ajuda da tecnologia de computação em nuvem como o ACC.

Nesse sentido, uma plataforma em nuvem poderia conectar não somente os aplicativos como automatizar os fluxos de trabalho por meio da integração direta construída entre seus produtos e diversos *softwares* de construção. A Figura 11 descreve de forma esquemáticas as diferentes partes interessadas e suas ferramentas nas fases de projeto, construção e operação. A imagem facilita a compreensão do quadro geral do ciclo de vida e as suas interconexões. Esses processos se mal conectados podem produzir lacunas de informação ou atrasos desnecessários. Portanto, é importante que a informação permanece viva e atualizada ao longo de todo o processo.

Figura 11: Plataforma em nuvem conectando as fases de projeto



Estes princípios são relativamente simples e tornam os procedimentos mais claros, sendo eles: interoperabilidade, transparência de informações, descentralização, capacidade em tempo real, orientação de serviço e modularidade, conforme apresentados na Figura 12.

Interoperabilidade: está relacionada à criação de redes que fazem a ligação entre diferentes atores como: pessoas, processos, homem/máquinas, dentre outros e elaboram a conexão entre eles, sejam ativos humanos/informação ou fluxos de dados.

Transparência de informações: é a capacidade dos sistemas de informação e dos CPS (*ciber-físicos*) de simular e criar cópias digitais de elementos do mundo físico por meio da criação de modelos que são alimentados por dados da planta do empreendimento obtidos por meio de sensores e "coisas" interoperáveis.

Descentralização: são fundamentais nas tecnologias e sistemas CPS, porém, os aspectos humanos não devem ser desconsiderados, pois as decisões nem sempre podem ser totalmente automatizadas, devendo haver um planejamento e uma interpretação das informações.

Figura 12: Diretrizes para implementação de projetos.



Capacidade em tempo real: as informações do comportamento e do estado dos objetos são recolhidas de forma contínua, consegue-se com isso, criar uma base de dados (BD) para a tomada de decisão. Existe a necessidade de flexibilidade, manutenção preditiva, capacidade de substituir rapidamente os ativos em caso de falhas, sendo a IoT fator importante nesta perspectiva.

Orientação de serviço: está relacionado à necessidade de fabricantes e indústrias desenvolverem serviços que sejam baseados em dados coletados e transformados em inteligência. Para que novos modelos possam ser criados, como por exemplo, a assistência técnica e, mais especificamente a manutenção. Muitas empresas mudaram seus modelos de serviço simplesmente adicionando níveis de inteligência e conectividade aos equipamentos que vendem, pois, a análise de dados permite a transformação dos serviços e da manutenção.

Modularidade: é a mudança de sistemas rígidos para modelos flexíveis e ágeis, do ponto de vista da demanda do cliente, sendo possível planejar o imprevisível e a demanda crescente por personalização.

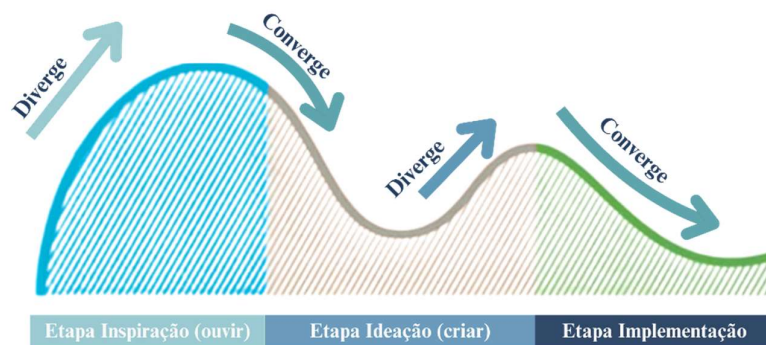
Além disso, o novo conceito de Indústria 5.0 proposto pela União Europeia, desencadeou uma nova onda da revolução industrial, cujo foco se tornou o ser humano e a sustentabilidade, duas características principais que o distinguem da anterior (LOU *et al.*, 2024). Segundo (Wang, Baicun *et al.* (2024) o ser humano é o fator mais dinâmico em um sistema de produção inteligente, não importa quão avançado seja o produto final, ela deverá satisfazer as necessidades dos seres humanos e ao mesmo tempo garantir qualidade de vida. Países como o Japão, buscam bases para um mundo melhor a partir de uma iniciativa que eles chamaram de sociedade 5.0 onde “nenhum indivíduo pode ser excluído dos avanços tecnológicos” e assim

encontrar as melhores estratégias e ferramentas para garantir uma sociedade mais justa e sustentável (NARVAEZ ROJAS *et al.*, 2021). As vantagens dessa integração começam a mostrar o seu potencial e levam a um crescente interesse de investigação e testes de aplicação, visto que as tecnologias facilitadoras, podem influenciar positivamente a relação homem-máquina. Destaca-se ainda que a inovação vem como um motor propulsor dessa transição, cujo foco passou do valor dos acionistas, para o valor das partes interessadas. O bem-estar do trabalhador passou a ser o centro do processo de produção, o que reflete em benefícios para todos os envolvidos (EUROPEAN COMMISSION, 2021).

2.3.4 Design Centrado no Humano (DCH)

O DCH será considerado nessa pesquisa como uma abordagem para auxiliar no entendimento do árido e complexo cenário das estruturas de edifícios industriais. De modo geral, é possível perceber que os processos carecem de metodologias centradas no ser humano. O DCH é uma abordagem que parte da identificação de um problema humano e define seus critérios projetuais a partir do interesse de um grupo no qual o problema está inserido. Sendo necessário considerar o interesse das pessoas envolvidas no contexto (*stakeholders*) e de todas as partes interessadas. Chaves (2019) estudou algumas metodologias de design centradas no ser humano e ressalta a desenvolvida pela empresa americana IDEO - *The Field Guide to Human-Centered Design*. Inicialmente a metodologia IDEO considera duas lentes de observação sendo a primeira o desejo do usuário, onde ela capta as impressões das pessoas procurando ouvi-las e compreendê-las para identificar seus desejos. A segunda lente é a praticabilidade, nela questiona-se a viabilidade de executar tecnicamente e organizacionalmente (empresa) a solução do problema. Partindo dessas lentes, a metodologia segue em três etapas de Inspiração, Ideação e Implementação (IDEO, 2015). As etapas do procedimento metodológico do IDEO são iterativas e ao final de cada etapa é possível voltar às etapas anteriores, em caso de não entendimento do problema após um ciclo de pesquisa, ou até mesmo pular etapas, quando se tem um conhecimento prévio profundo do público-alvo ou do problema em questão conforme no modelo DCH mostrado na Figura 13.

Figura 13: Metodologia de Design Centrado no Ser Humano



Fonte: Adaptado IDEO (2015)

A fase **inspiração** (ouvir): consiste em mergulhar na realidade das pessoas que irão utilizar a solução em seu próprio contexto (tem por objetivo compreender suas necessidades, expectativas e aspirações, ressalta-se que, apesar da escolha da palavra ouvir recomenda-se explorar os cinco sentidos).

A fase **ideação** (criar oportunidades): é o momento em que as necessidades das pessoas são transformadas em *insights* (para posteriormente serem traduzidas em soluções) os melhores *insights* são definidos como modelos.

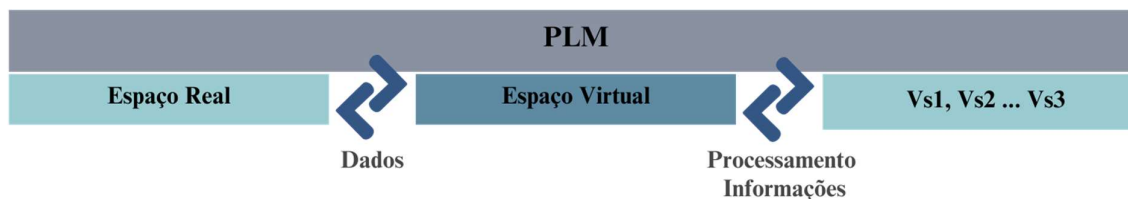
A última fase **implementação**: onde vão ser criados os elementos necessários para que a solução seja testada, nesta fase se acionam as visões da praticabilidade e da viabilidade durante todo o processo, o pensamento alterna entre concreto e abstrato. Na implementação, definem-se as melhores alternativas, para que sejam testadas, avaliadas, modificadas e reavaliadas, até encontrar a solução ideal.

Observa-se que as etapas não precisam ser necessariamente seguidas de forma linear e para cada etapa são apresentados métodos e ferramentas que auxiliam a aplicação ao longo do processo. Recomenda-se ainda que as etapas sejam desenvolvidas por equipe multidisciplinar, para identificar o problema, observar o comportamento das pessoas no ambiente e no cotidiano real, sintetizar as ideias, propor ferramentas, *brainstorming*, e iniciar a geração de alternativas. A metodologia considera a possibilidade de ser adotada em qualquer segmento, mas é possível observar que as ferramentas são adequadas a cada projeto, a cada perfil de cliente, onde são elencadas uma gama diferente de alternativas para criar o melhor método para cada cenário. Ao empregar metodologias de design com abordagem centrada no ser humano, como apontado por Chaves (2019) percebe-se que existe uma grande dificuldade em propor abordagens com a participação do usuário e das partes envolvidas no processo.

Sob essa tendência o conceito de *Human Cyber-Physical System* (HCFS) tem evoluído assim como os conceitos de *Big Data* (BD), *Cloud Computing* (CC) e a *Internet of Things* (IoT) e sua associação com metodologias BIM apresentam potencial para otimizar a colaboração, a eficiência além de elevar a produtividade com sustentabilidade nas construções (AWOUDA *et al.*, 2024). Nesse cenário de rápidas mudanças, cada dia mais imersos na integração de tecnologias digitais, na análise de dados e automação em processos de produção, percebe-se que o conceito de *Digital Twins* (DT) introduzido pelo professor Grives tem se tornando uma realidade desde o planejamento, design, construção e operações das estruturas de edifícios industriais.

2.4 Conceito de *Digital Twin*

O conceito de *Digital Twin* (DT) foi introduzido em 2002 pelo professor Michael W. Grieves, da *Florida Institute of Technology* nos Estados Unidos, durante um curso sobre ciclo de vida do produto. A partir de então, sua aplicação evoluiu e se espalhou para outras indústrias. Uma aplicação histórica da tecnologia DT ocorreu quando os engenheiros da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) na década de 1970 usaram um “gêmeo” do módulo da Apollo 13 em 1970 para salvar a nave e a vida dos três astronautas (NAVES, 2020). Esta foi uma aplicação precoce da tecnologia, que se estendeu por diferentes segmentos (RASHEED; SAN; KVAMSDAL, 2020). Grieves e Vickers (2017) descrevem de forma simplificada o DT como uma representação virtual, de um objeto do mundo real, de um processo ou até mesmo de um sistema. Os autores chamaram o modelo de *Conceptual Ideal for PLM*, pois ele continha todos os elementos do *Digital Twin* (espaço real, espaço virtual), o *link* para o fluxo de dados do espaço real para o espaço virtual, *link* para o fluxo de informações do espaço virtual para o espaço real e subespaços Vs1, Vs2, ... Vs3 representado na Figura 14. Nos últimos anos, pesquisadores tentam conceituar o DT. Alguns autores classificam como uma nova tecnologia que permite acessar o modelo virtual em qualquer estágio de evolução e realizar avaliações para melhorar a qualidade do produto durante seu ciclo de desenvolvimento a partir do monitoramento do seu comportamento no mundo real (LIU, JINFENG *et al.*, 2019).

Figura 14: *Conceptual Ideal for PLM*.

Fonte: Adaptado de Grieves e Vickers (2017)

O DT também pode ser considerado como um modelo dinâmico, bidirecional onde as informações são integradas de forma flexível, tanto no ambiente da simulação como no modelo real de forma automática e em sentido inverso (WANG, PENG *et al.*, 2019). Devido às características do DT estudos como os de Chen, Ziyue e Huang (2020) direcionados à construção, mostram que ele está se tornando uma nova geração de tecnologias digitais para apoiar a pesquisa e a prática da economia circular.

Jiang *et al.* (2021) acrescentam que na relação de DT cada parte física deve encontrar uma parte virtual correspondente, e de forma semelhante, cada parte virtual deve encontrar uma parte física. No ciclo de vida do empreendimento, ambientes, requisitos de condições, partes físicas, partes virtuais, dados, conexões, e serviços podem mudar de forma flexível. Dessa forma os DT precisam acomodar essas mudanças. Embora a parte física e a parte virtual possam mudar, e seja difícil para a parte virtual replicar a parte física com 100 % de precisão, é possível encontrar uma relação dupla entre eles. Os autores resumem na Figura 15 as diferenças e semelhanças existentes entre *Digital Twin*, *Building Information Modeling* e *Cyber-Physical Systems* e mostram quando o elemento é opcional com o símbolo (O) e quando o elemento é obrigatório com o símbolo (✓).

Figura 15: Diferenças entre DT, BIM e CPS.

ELEMENTOS	Modelo BIM	Digital Twin (DT)	Cyber - Physical Systems (CPS)
Objeto Físico (Parte Física)	O	✓	✓
Modelo Virtual (Parte Virtual)	✓	✓	O
Conexões entre modelos físicos e virtuais	O	✓	✓
Relação de gêmeos entre a parte física e o modelo virtual	O	✓	O

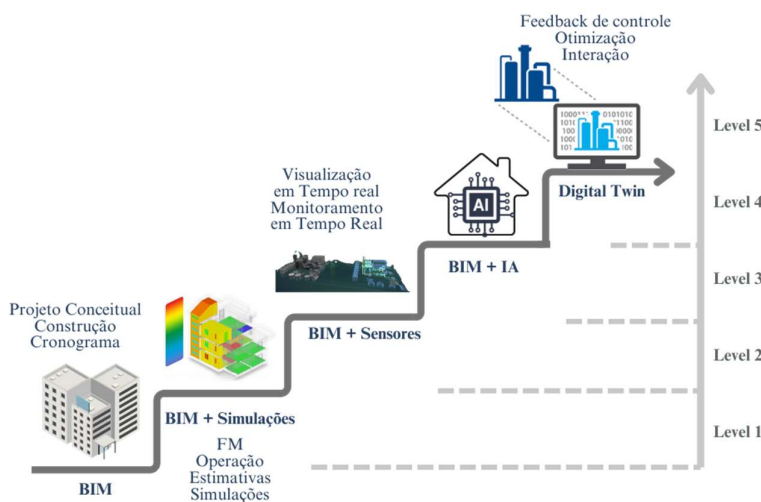
Fonte: Adaptado de Jiang *et al.* (2021)

A premissa era de que cada sistema seria composto por dois modelos, sendo um físico (que sempre existiu) e um virtual (com todas as informações sobre o sistema físico). Isso implicaria em um espelhamento ou redesenho entre o que existe no espaço real e no espaço virtual e vice-

versa. Na apresentação o PLM significava que aquela não era uma representação estática, mas que os dois sistemas estariam ligados durante todo o ciclo de vida, e os sistemas virtuais e reais, seriam conectados à medida que eles passassem pelas quatro fases: de criação, produção (fabricação), operação (sustentação/suporte) e descarte. Assim, o *Digital Twin* atua como uma ponte entre o mundo físico e o mundo digital, usando sensores para coletar dados em tempo real sobre objetos físicos. Esses dados são usados para criar gêmeos digitais de objetos, e permitem compreendê-los, analisá-los, manipulá-los e otimizá-los (JIANG *et al.*, 2021).

Deng *et al.* (2021) propuseram uma escala de cinco níveis para refletir a evolução do BIM para DT com base no ciclo de vida do edifício, eles identificaram em cada nível as etapas envolvidas (fase de projeto, fase de construção, fase de operação e fase de demolição) conforme mostrado na Figura 16. O nível 1 compreende as ações suportadas pelo BIM; o nível 2 as possibilidades de simulações no BIM; o nível 3 o BIM integrado com IoT; o nível 4 o BIM integrado com técnicas de inteligência artificial (IA) para previsões; e o nível 5 seria o resultado final do Digital Twin. O resultado mostrou que nenhum dos estudos investigados chegou ao nível 5, mas selecionaram 6 estudos que propunham conceitos relevantes do ideal de DT. O atual nível de avanço nas tecnologias facilitou as seguintes aplicações e implementações: monitoramento em tempo real, previsão de desempenho e melhoria estratégica (DENG; MENASSA; KAMAT, 2021).

Figura 16: Evolução do BIM para *Digital Twin* no ambiente construído



Fonte: Adaptado Deng *et al.* (2021)

As aplicações potenciais do DT segundo o *Royal Institution of Chartered Surveyors (RICS)*⁷ são promissoras e elas podem auxiliar setores como: manufatura, automotivo, saúde, aeroespacial, defesa, recursos naturais, energia, serviços públicos e ambiente construído a alcançarem resultados melhores nas áreas social, ambiental e econômica. Autores como Seaton *et al.* (2022) em publicação no *RICS - World Build Environment Forum*, apontam alguns dos termos que estão sendo associados ao conceito de DT como por exemplo: representação virtual (uma réplica digital de entidades do mundo real) entidades do mundo real (objetos, processos ou ativos físicos) sincronização (conexão entre a representação virtual e entidades do mundo real) frequência (o tempo de sincronização física para virtual) e fidelidade (o grau de precisão e exatidão aplicado à representação virtual). Segundo Madubuike, Anumba e Khallaf (2022) o DT pode ser definido como o modelo virtual que representa uma réplica do ativo físico por meio de tecnologias como sensores, redes de comunicação e modelos 3D e que coleta e envia informações em tempo real. De acordo com Bressanelli *et al.* (2022) o DT quando comparado a outras tecnologias digitais tem potencial para adquirir, consolidar e fornecer informações melhores sobre a economia circular⁸. Atualmente a literatura apresenta diferentes estudos sobre a aplicação de DT na indústria da construção em diferentes fases do projeto, como por exemplo Chen, Long e Whyte (2022) desenvolveram uma abordagem para prever as mudanças de projeto usando uma matriz de estrutura de design orientada por *Digital Twin*. Shen, Ding e Wang (2022) estabeleceram uma estrutura conceitual que integra o BIM e o DT para apoiar edifícios com carbono zero em todo o ciclo de vida.

Xie *et al.* (2023) apresentaram um processo de detecção e diagnóstico de falhas habilitado para DT para sistemas prediais durante operação e manutenção. Ye *et al.* (2023) propuseram uma plataforma inteligente de alerta precoce e gerenciamento de segurança com múltiplas informações, baseada em DT, durante a construção de túneis. Meng, Das e Meng (2023) também utilizaram métodos qualitativos e quantitativos para investigar a integração do DT com a economia circular na construção e apontam quatro fatores-chave que podem contribuir

⁷ A *Royal Institution of Chartered Surveyors (RICS)* é uma entidade que trabalha no interesse público para promover conhecimento e inspirar profissionais a criar e proteger os ambientes construídos naturais para que sejam sustentáveis, resilientes e inclusivos para todos, além de promover oportunidades e receitas para as partes interessadas. Fonte: <https://www.rics.org/news-insights/research-and-insights/digital-twins-from-design-to-handover-of-constructed-assets>

⁸ Economia circular é um conceito que associa desenvolvimento econômico a um melhor uso de recursos naturais, por meio de novos modelos de negócios e da otimização nos processos de fabricação com menor dependência de matéria-prima virgem, priorizando insumos mais duráveis, recicláveis e renováveis. (Fonte: <https://www.portaldaindustria.com.br/industria-de-a-z/economia-circular/>)

significativamente para sua evolução (a) educação, sensibilização e comunicação; (b) política e regulamentação; (c) tecnologia e inovação; (e) colaboração entre as partes interessadas.

Embora o DT possa ser usado em várias fases de um projeto, como design, construção, operação e manutenção e demolição e para diferentes fins, Opoku *et al.* (2021) mostram que o *Digital Twin* raramente foi estudado na construção industrial ao longo do ciclo de vida. Este fato demonstra que existe necessidade de estudos empíricos mais aprofundados sobre a integração do *Digital Twin* e o ciclo de vida do empreendimento. De acordo com Xue *et al.* (2019) a falta da eficácia e precisão das informações para a criação de um DT ainda representam uma barreira para o desenvolvimento da tecnologia, assim, novos algoritmos são continuamente propostos. Torna-se, portanto, importante que os gestores compreendam o atual estado dos seus recursos operacionais para atuarem de forma a usufruir com competitividade de tais tecnologias para sua aplicação nas fases de concepção do projeto, construção e montagem, operação e manutenção, demolição e reforma (REISINGER; HOLLINSKY; KOVACIC, 2021).

2.4.1 *Digital Twin* na construção industrial

O termo *Digital Twin* ainda é emergente no setor da construção industrial e alguns autores se referem ao DT como um BIM ou *Digital Objects* (AL-SAEED; EDWARDS; SCAYSBROOK, 2020), outros consideram o DT como um modelo BIM que possui capacidade de realizar simulações com dados de ciclo de vida do projeto (JAVOID; HALEEM; SUMAN, 2023; KAEWUNRUEN; PENG; PHIL-EBOSIE, 2020) assim, é necessário diferenciar DT e BIM, pois o uso inadequado dos termos pode dificultar a compreensão do DT como um novo conceito na indústria da construção (KHAJAVI *et al.*, 2019). Dentre essas diferenças destaca-se que o BIM é usado para melhorar a eficiência do projeto e da construção, comporta estimativa de custos e dados de cronograma, enquanto o DT integra informações em tempo real e monitora todo o processo ao longo do ciclo de vida, até a operação/manutenção (LIU, YAN; VAN NEDERVEEN; HERTOOGH, 2017).

O DT oferece uma oportunidade para potencializar o uso do BIM, na indústria da construção possibilitando que a entidade física seja conectada ao seu modelo virtual equivalente por uma conexão de dados que permite a troca de informações em ambas as direções (XU, JINGHAI *et al.*, 2023). Assim, o modelo BIM seria o ponto de partida para o desenvolvimento de um gêmeo digital na indústria da construção (TUHAISE; TAH; ABANDA, 2023). Percebe-se que esforços para garantir que os benefícios do BIM auxiliados por tecnologias DT e que propiciem o

gerenciamento de informações em tempo real, estão sendo empreendidos (SACKS *et al.*, 2020; TANG *et al.*, 2020). O *Digital Twin* pretende alcançar a sincronização do mundo real a partir de uma plataforma virtual para controle dos dados da construção, operação, manutenção, monitoramento, além de outros processos do ciclo de vida do empreendimento, onde cada parte virtual deve encontrar sua parte física correspondente (XIE, HAIYAN *et al.*, 2023).

O que ocorre, no entanto, é que durante o ciclo de vida do empreendimento os dados, conexões e serviços, sejam eles das partes físicas ou das partes virtuais, podem mudar de forma flexível a todo momento. Para equacionar essas mudanças o DT auxilia o processo trazendo benefícios como as simulações hipotéticas, planejamento operacional, manter as informações em um único repositório, melhoria nos fluxos de trabalho, maior qualidade e segurança das operações, redução de prazos, controle de custos, além de contribuir para sustentabilidade durante todas as etapas do projeto, construção e operação (JAVAID; HALEEM; SUMAN, 2023). As funcionalidades de coordenação de modelos e gerenciamento de projetos, por outro lado, ainda precisam de melhorias. Como facilitador do processo, o uso da IoT e os novos padrões de transmissão de dados favorecem a sua implementação. Nesse sentido, tecnologias digitais como o BIM e DT tendem a convergir e fornecerem soluções necessárias e concomitantes para a indústria da construção (SEPASGOZAR, SAMAD *et al.*, 2023)

2.4.2 Aplicações do *Digital Twin*

A literatura apresenta vários estudos que buscam compreender o modo como os investimentos em DT podem potencializar a produtividade na indústria da construção de modo a minimizar os desafios da contemporaneidade. Inicialmente as pesquisas foram direcionadas a compreender o conceito de DT como um modelo conceitual que pode ser usado para prever a vida útil da estrutura, de aeronave e garantir sua integridade estrutural (TUEGEL *et al.*, 2011). O que se percebe, contudo, é que os estudos foram aos poucos sendo direcionados ao segmento industrial. Até recentemente a maioria das pesquisas se restringiram basicamente a revisão da literatura, a Tabela 2 apresenta um resumo de alguns estudos realizadas entre os anos de 2016 e 2022. Recentes estudos publicados em 2023 envolvem aplicações mais abrangentes do *Digital Twin* (DT) como o trabalho de Hazrathosseini, Moradi e Afrapoli (2023) que mostram sua aplicação em minas de superfície e mapeiam os pontos fortes e fracos e afirmam que o DT será o caminho das minas do futuro. Os autores destacam que os atuais sistemas operacionais, ainda desempenham um papel importante no processo de otimização dos *Cyber-Physical Systems*,

contudo, para maior eficiência e autodependência, seus recursos estão sendo aprimorados pela integração com Inteligência Artificial e *Digital Twin*.

Tabela 2: Estudos sobre *Digital Twin* realizados entre 2016 e 2022

Pesquisas	Autores
Revisão da literatura sobre DT	(BOJE <i>et al.</i> , 2020; CIMINO; NEGRI; FUMAGALLI, 2019; DENG; MENASSA; KAMAT, 2021; ENDERS; HOSSBACH, 2019; HOLLER; UEBERNICKEL; BRENNER, 2016; HOSAMO; IMRAN; <i>et al.</i> , 2022; JIANG <i>et al.</i> , 2021; KRITZINGER <i>et al.</i> , 2018; LU, YUQIAN; XU; WANG, 2020; OPOKU <i>et al.</i> , 2021)
Definição do conceito de DT	(GRIEVES; VICKERS, 2017; NEGRI; FUMAGALLI; MACCHI, 2017; SEATON <i>et al.</i> , 2022; TCHANA; DUCCELLIER; REMY, 2019)
Uso de tecnologia para apoiar o DT	(ENDERS; HOSSBACH, 2019; ENEYEW; CAPRETZ; BITSUAMLAK, 2022; HOSAMO; SVENNEVIG; <i>et al.</i> , 2022; LU, YUQIAN <i>et al.</i> , 2020; LV <i>et al.</i> , 2022; MADNI; MADNI; LUCERO, 2019; XIA <i>et al.</i> , 2022)
DT na indústria da construção	(LIU, KEWEI <i>et al.</i> , 2022; LU, QIUCHEN; CHEN; <i>et al.</i> , 2020; OZTURK, 2021; SACKS <i>et al.</i> , 2020; TCHANA; DUCCELLIER; REMY, 2019; WANG, WEIXI <i>et al.</i> , 2022; ZHAO, JIANFENG <i>et al.</i> , 2022)
Outras aplicações do DT	(ANDERL <i>et al.</i> , 2018; BERTONI <i>et al.</i> , 2022; LI, LIANHUI; LEI; MAO, 2022; LIU, MENGAN <i>et al.</i> , 2021; QI <i>et al.</i> , 2018; SLEITI; KAPAT; VESELY, 2022; TAO; ZHANG; NEE, 2019; XIA <i>et al.</i> , 2022)

Yin *et al.* (2023) realizam um levantamento de estudos que combinam Realidade Aumentada (*Augmented Reality*) e DT aplicados a diferentes setores da indústria. Eles apresentam os cenários seguindo o ciclo de vida da engenharia e mostram o processo de produção, design de serviço e interação homem-máquina. Os autores evidenciam que existe um crescente interesse tanto da academia quanto da indústria, mas os estudos ainda discutem seus benefícios limitados a domínios bastante específicos.

Tuhaise, Tah e Abanda (2023) mostram que as aplicações de DT na indústria da construção ainda estão em seus estágios iniciais, mas tem crescido nos últimos anos. Porém, não está claro quais são os caminhos para aplicações bem-sucedidas.

Zhao, Chen e Xue (2023) com base nos paradigmas do Blockchain 1.0 e 2.0 propõem o *ChainPM* para gerenciamento de projetos de construção. O principal mecanismo inovador são as funções baseadas em esquema de transação de dados, incluindo indexação, consulta e análise, específicas para gerenciamento de projetos de construção. Esse método de gerenciamento torna-se eficiente pois permite funções de tomada de decisão *off-line* e simplifica a colaboração de projetos de construção.

Xie, Haiyan *et al.* (2023) realizam uma extensa revisão da literatura para mostrar quais são os focos atuais e as direções futuras do DT para aplicação na indústria da construção, com foco na fabricação de materiais e componentes.

Wang, Jinjiang *et al.* (2023) propõem um método de funcionamento virtual acionado por DT para simular os processos de usinagem em um ambiente virtual e obter resultados melhores de desempenho. Os resultados experimentais mostram uma redução de 13% no tempo de resposta e de 54% no erro sistemático total, juntamente com uma diminuição no tempo de funcionamento.

Mo *et al.* (2023) criaram um ambiente de simulação para integrar vários métodos de IA e reproduzir o processo de produção de uma unidade industrial automatizada. Os métodos melhoraram a tomada de decisões do equipamento e a configuração, fornecendo um *framework* que pode ser utilizado em diferentes aplicações de produção resultando em uma melhoria de tempo de processo de aproximadamente 10%.

Loaiza, Cloutier e Lippert (2023) desenvolveram um *framework* de DT em pequena escala para sistemas de produção. Para construir essa estrutura, os autores utilizaram uma abordagem de engenharia de sistemas e definiram componentes, funcionalidades e estrutura do DT. Honghong *et al.* (2023) também desenvolveram um *framework* BIM na ótica da engenharia de pontes. O objetivo foi implementar e utilizar o BIM como DT em todas as fases melhorando as etapas de projeto, construção, operação e manutenção. Agrawal *et al.* (2023) propuseram outro *framework*, conceitual bidimensional para DT e apresentaram uma integração dos tipos de funções que um DT pode desempenhar. Os autores acreditam que o *framework* possa auxiliar os profissionais a planejar sistematicamente as implantações de DT, e comunicar claramente os objetivos e resultados.

Percebe-se, contudo, que as aplicações de DT na indústria da construção ainda é uma área de pesquisa crescente, porém ela apresenta desafios significativos do ponto de vista tecnológico e necessita de um melhor entendimento dos avanços das tecnologias facilitadoras básicas para estabelecer um ambiente comum para as pesquisas em andamento e futuras (Tabela 3).

- (a) para adoção do DT nas fases de concepção do projeto e planejamento o setor da construção ainda necessita de mais exemplos de iniciativas bem-sucedidas, maiores investimentos em tecnologias aplicáveis, além de vencer as barreiras culturais e a resistência das pessoas à mudança.

- (b) apesar de brevemente abordada na literatura de DT, a fase de construção e montagem é muito significativa, contudo, a maioria dos estudos que aplicam tecnologia de DT nessa fase está centrada na avaliação da integridade das estruturas de edificações industriais.
- (c) a aplicação do DT na fase de demolição e reforma normalmente é pouco explorada pelos pesquisadores dentro da indústria da construção civil, isso porque as informações sobre o desempenho dos elementos construídos normalmente são perdidas ao longo do ciclo de vida do projeto. Uma aplicação importante do DT seria para a preservação e conservação de bens patrimoniais que podem ter que ser demolidos no futuro. Uma alternativa disponível é a modelagem de informações históricas de edifícios ou *Heritage Building Information Modeling* (HBIM)⁹ para melhorar a gestão colaborativa da informação relacionada aos edifícios existentes.

Tabela 3: Estudos sobre *Digital Twin* na indústria da construção

Pesquisas	Autores
DT no projeto e planejamento	(ANDERL <i>et al.</i> , 2018; DENG; MENASSA; KAMAT, 2021; KAEWUNRUEN; PENG; PHIL-EBOSIE, 2020; KHAJAVI <i>et al.</i> , 2019; LU, QIUCHEN; PARLIKAD; <i>et al.</i> , 2020; TAO; ZHANG; NEE, 2019; TUHAISE; TAH; ABANDA, 2023; XU, YAN <i>et al.</i> , 2019)
DT na construção e montagem	(GERHARD; NEGES; WOLF, 2020; GREIF; STEIN; FLATH, 2020; HAMIL, 2021; KAEWUNRUEN; PENG; PHIL-EBOSIE, 2020; KHAJAVI <i>et al.</i> , 2019; LI, JENNIFER; GREENWOOD; KASSEM, 2019; LIN, YU-CHENG; CHEUNG, 2020; LU, QIUCHEN; PARLIKAD; <i>et al.</i> , 2020; MACCHI <i>et al.</i> , 2018a; QI; TAO, 2018; SACKS <i>et al.</i> , 2020)
DT na demolição e reforma	(ANGJELIU; CORONELLI; CARDANI, 2020; BARAZZETTI <i>et al.</i> , 2015; GRIEVES; VICKERS, 2017; HEESOM <i>et al.</i> , 2020; JOUAN; HALLOT, 2020)

(HEESOM *et al.*, 2020) mencionou que as informações HBIM poderiam ser armazenadas no espaço virtual, para que na fase de demolição ou reforma as informações sobre toda a fase do ciclo de vida do elemento em questão, pudessem estar disponíveis. Vale ressaltar que na literatura consultada para esta pesquisa, não foram identificadas publicações que tenham aplicado a tecnologia DT na fase de demolição ou reforma de um projeto de construção civil.

⁹*Heritage Building Information Modelling* (HBIM) é um sistema de modelagem de estruturas históricas, que difere das aplicações comuns do BIM para novas construções. Ele é realizado a partir da coleta remota de dados por *scanners a laser* associado ao uso de câmeras digitais. ARAYICI, Yusuf et al. (Ed.). *Heritage building information modelling*. Abingdon: Routledge, (2017).

2.4.3 Custos e Benefícios das aplicações do DT

Os custos de aplicação da tecnologia DT podem variar em função do nível de sofisticação, esforços e tempo dispendido no seu desenvolvimento. A maioria das abordagens de criação de DT são eficazes para projetos específicos e não são universais para todos os tipos de projetos. Existem diferentes características e formatos dos edifícios, das estradas, pontes, ferrovias, dentre outros, onde os projetos necessitam de diferentes métodos de criação de DT o que envolve custos específicos. Autores como West e Blackburn (2017) acreditam que o custo é sempre um ponto relevante a ser considerado ao decidir aplicar a tecnologia do DT em um projeto de construção.

Para Macchi *et al.* (2018) o DT pode auxiliar na redução dos custos da construção, melhorar a qualidade e a gestão ativa das partes interessadas, fornecendo aos *stakeholders* amplas informações sobre o projeto.

Segundo Madni, Madni e Lucero (2019) o objetivo e o propósito do projeto são pontos essenciais para fornecer uma estimativa adequada na aplicação da tecnologia, pois para implementá-lo são necessários elevados investimentos iniciais, contudo, a sua inclusão proporciona um retorno significativo sobre o investimento ao longo do ciclo de vida do projeto.

Czerniawski e Leite (2020) afirmam que as abordagens de modelagem e aplicação de novas tecnologias, incluindo *softwares e hardwares*, devem ser melhoradas para realizar a criação de DT's mais precisos, eficientes e com menores custos no campo da construção civil.

Opoku *et al.* (2021) também acreditam que o nível de informação para elaborar o DT tem potencial para proporcionar uma redução significativa de custos ao longo de todo o ciclo de vida do projeto, apesar de seus altos investimentos iniciais.

Dentro dessa perspectiva, o DT desde que foi introduzido como um conceito de PLM, passou por um longo período de exploração até sua efetivação como DT em 2015. Isso foi possível com o surgimento da computação em nuvem, inteligência artificial e outras tecnologias avançadas de comunicação (QI *et al.*, 2018). A partir de então, o DT passou a ser considerado uma tecnologia essencial que tem sido introduzida em diferentes estágios do ciclo de vida, na engenharia para diferentes funções, incluindo simulação em tempo real, diagnóstico, previsão e controle (LIM; ZHENG; CHEN, 2020; TAO *et al.*, 2021; ZHENG, XIAOCHEN; LU; KIRITSIS, 2022). Entretanto, na produção inteligente, tecnologias disruptivas, como metaverso, big data, Internet industrial das coisas (IIot), *Digital Twin* e inteligência artificial,

estão avançando rapidamente, moldando a sociedade e a indústria, de modo geral, redefinindo o papel e a posição dos humanos (WANG, BAICUN *et al.*, 2024).

Contudo, as fronteiras tradicionais entre humanos e tecnologias ficaram ambíguas, especialmente refletidas em conceitos como a recente Indústria 5.0, que embora não seja tão amplamente reconhecida quanto a Indústria 4.0, pode ser considerada como uma evolução, com uma ênfase na colaboração, buscando uma integração mais holística de sistemas *ciber-físicos* com a força do trabalho humano. Dentro dessa perspectiva de inovação tecnológica, a integração de sistemas com considerações humanas passou a ser vista como uma das características mais relevantes para desenvolver estruturas inteligentes centrados no ser humano (WANG, BAICUN *et al.*, 2022). O Design Centrado no Ser Humano (DCH) faz a conexão no entendimento do árido e complexo cenário das estruturas de edificações industriais, a partir de uma abordagem de identificação do problema para definir os critérios de trabalho, a partir do interesse de um grupo de pessoas, no qual o problema está inserido. Assim, a investigação dos conceitos de Modelos de Negócios associados às estratégias ESG se torna primordial nas empresas para serem reconhecidas e valorizadas no mercado global, visto que as oportunidades de negócios mais humanos, têm crescido rapidamente em todo o mundo.

2.5 Modelos de Negócio Sustentáveis

Diferentes setores da indústria têm adotado modelos de negócios para alcançar seus objetivos econômicos, ambientais e sociais. O conceito descreve a lógica de como uma organização cria, entrega e obtém valor de forma sustentável. Geissdoerfer, Vladimirova e Evans (2018) apresentam uma revisão detalhada discutindo as semelhanças e as diferenças de variados modelos de negócios. Osterwalder (2004) e Chesbrough (2010) já apresentavam o conceito de modelo de negócios como uma ferramenta para auxiliar os gestores a trabalharem com ideias complexas de forma mais eficiente, onde o fluxo de trabalho fosse comunicado de forma simples aos investidores em um curto espaço de tempo. Existem vários tipos e as empresas podem usar diferentes combinações para atender às suas necessidades específicas. Durante décadas a sustentabilidade não foi prioridade para a maioria das empresas, contudo, a internacionalização do conceito ESG tornou a concorrência mais acirrada, impulsionando os negócios convencionais a lutarem para encontrar soluções mais aderentes (EVANS *et al.*, 2017). Neste contexto, o conceito de modelo de negócio sustentável trouxe vantagens competitivas às organizações ao impulsionar os tradicionais modelos para atender às metas

estipuladas pela ONU e ao mesmo tempo, manter a produtividade e a lucratividade (SCHALTEGGER; HANSEN; LÜDEKE-FREUND, 2016). Embora exista na literatura as definições e a visão geral do conceito de modelos de negócio sustentável, existe uma lacuna de investigação no progresso e avaliação do seu desempenho em diferentes domínios e aplicações (BOCKEN *et al.*, 2014; BOONS *et al.*, 2013; RAUTER; JONKER; BAUMGARTNER, 2017). Estudos de Nosratabadi *et al.* (2019) mostram que as taxas de sucesso desses modelos aumentam juntamente com o uso crescente de tecnologias avançadas, e reafirmam que os resultados em diferentes domínios de aplicação não estão claros. Em projetos de alta complexidade, como em estruturas de edificações industriais de projetos de capital, que envolvem elevados investimentos os objetivos e a sua aplicabilidade precisam ser discutidos no início dos estudos de viabilidade e no planejamento dos negócios. Essas são etapas críticas e podem maximizar o seu desempenho ao longo do ciclo de vida dos empreendimentos. A escolha por um modelo de negócio aderente é crucial para o sucesso de uma empresa, pois ele afeta diretamente a forma como ela irá gerar receita, interagir com os clientes e se diferenciar da concorrência. A gestão do projeto requer atenção, pois exige a aplicação de diferentes conhecimentos, ferramentas, tecnologias e modelos de negócios para alcançar os objetivos das empresas (LIU, MINGQIANG *et al.*, 2019). O *Project Management Institute* (PMI) definiu o projeto como um esforço temporário empreendido por uma equipe para criar um produto, serviço, ou atingir um resultado determinado a partir de estratégias que utilizam a gestão de projetos, programas e portfólios, bem como práticas organizacionais que permitem a entrega consistente e previsível da estratégia organizacional, produzindo melhor desempenho, melhores resultados e vantagem competitiva sustentável (PMI, 2021). Esse conceito traduz a importância que deve ser dada a essa atividade visto que os projetos são executados por pessoas e para pessoas. A qualidade da gestão é um processo decisório para que as empresas permaneçam no mercado, busca-se com isso, alcançar resultados com menores prazos, custos e riscos, respeitando o meio ambiente e satisfazendo as partes interessadas. Contudo, para o sucesso do negócio, necessidades específicas devem ser atendidas e isso requer o envolvimento de várias equipes e uma quantidade de informações cada vez maior. Ao propor um projeto sustentável, as organizações têm aderido ao conceito da indústria 5.0 e colocado as pessoas no centro dos processos de forma inovadora. Os antecedentes da colaboração em redes construtivas baseadas em BIM foram sintetizados por Oraee *et al.* (2017) no chamado Pentágono de Colaboração: Contexto, Equipe, Processo, Tarefa e Ator para enquadrar o ambiente do projeto e mudar as práticas comuns para promover a colaboração entre os seus membros. Nesse contexto, o setor busca alternativas que aperfeiçoem seus processos, visto que ele apresenta um alto grau de

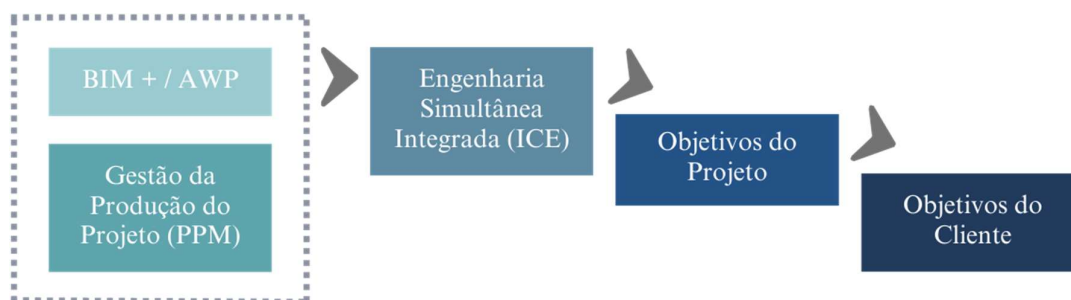
complexidade em todas as suas fases. Uma abordagem que vem sendo utilizada em disciplinas voltadas para engenharia é a *Design Science Research* (DSR). Ela se caracteriza por interligar o conhecimento prático ao conhecimento científico e difere dos tradicionais sistemas de pesquisa, pois está centrado em criar soluções inovadoras e requerem uma abordagem interdisciplinar e colaborativa (DRESCH; LACERDA; JUNIOR, 2020). Segundo Araújo e Lopes (2022) a DSR é uma metodologia de aplicação prática, constituída por 5 etapas ou ciclos: conscientizar o problema, sugerir soluções, desenvolver o artefato, avaliar e concluir o projeto. Autores como Pimentel, Filippo e Dos Santos (2020) e Wieringa (2014) estudaram a forma de desenvolver um projeto de *Design Science Research* a partir dessas etapas, iniciando com a identificação de problema a ser investigado em bases teóricas para aprofundar no seu entendimento e identificando as possíveis soluções existentes. A partir daí se propõe uma possível solução, que será desenvolvida por meio de métodos, técnicas e ferramentas. Contudo, o planejamento de projetos estruturais industriais não depende somente dos modelos de negócio, mas necessita também das tecnologias, da melhoria dos processos e da capacitação das pessoas nas empresas que pode ser alcançado fazendo uso de práticas como o VDC.

2.5.1 *Virtual Design and Construction* (VDC)

Recentemente, a indústria da construção começou a desenvolver ferramentas VDC para melhorar o design, o planejamento, a segurança, a gestão de recursos, bem como a visualização, quantificação e gestão de dados, principalmente em projetos de construção complexos. O VDC é uma estrutura de gerenciamento de projetos, desenvolvida no *Center for Integrated Facility Engineering* (CIFE) da Universidade de *Stanford*, situada na Califórnia, Estados Unidos. Tem como objetivo melhorar o planejamento, concepção, construção e operação de projetos de construção por meio da gestão combinada e por métodos de colaboração, gestão, produção e tecnologias digitais. O VDC também favorece estratégias de pesquisa e desenvolvimento para melhorar a confiabilidade, produtividade, inovação e sustentabilidade na construção (CIFE, 2024). Essa abordagem é especialmente importante em projetos de grande complexidade, pois integra tecnologias digitais e práticas, juntamente com conceitos construção enxuta para otimizar o ciclo de vida de um projeto, desde a concepção até a entrega (RAFSANJANI; NABIZADEH, 2023). Albalkhy, Sweis e Lafhaj (2021) definem *Lean Construction* ou construção enxuta, como um processo que visa melhorar a colaboração entre as partes interessadas da construção para maximizar o valor e minimizar o desperdício.

No projeto a adoção da modelagem BIM permite uma melhor compatibilização entre disciplinas, detecção de interferências (*clash detection*), quantificação de materiais, planejamento da obra 4D, previsão de custos 5D, entre outros. Na construção é possível melhorar a gestão de materiais, tanto no recebimento, diligenciamento, armazenamento e entrega de materiais em campo, com melhora nos índices de produtividade *Key Performance Indicators* (KPI's). Ele ainda pode auxiliar na operação e manutenção das plantas industriais (XU, LI DA; XU; LI, 2018). Assim, o VDC utiliza ferramentas para melhorar o design, o planejamento, a construção, a gestão de recursos, bem como a visualização, quantificação e gestão de dados, principalmente em projetos de maior escala (ASLAM; GAO; SMITH, 2021). De acordo com Rischmoller *et al.* (2018) no VDC o gerenciamento da produção do projeto é utilizado para organizar e controlar as atividades de trabalho. Quando comparado aos métodos convencionais, ele aplica ferramentas e técnicas normalmente empregadas na gestão industrial e de produção (incluindo materiais, informações, equipamentos e mão de obra) e busca-se com isso, otimizar o desempenho para alcançar avanços na qualidade, reduzindo custos e prazo, eliminando o desperdício, melhorando a produtividade nas atividades realizadas. Autores como Fosse, Ballard e Fischer (2017) afirmam que esta abordagem utiliza novas tecnologias colaborativas e equipes multidisciplinares para melhorar a comunicação entre as diferentes partes interessadas do projeto nas fases de pré-planejamento, design, construção e o modelo favorece o acesso aos dados compartilhados aos envolvidos (proprietários, arquitetos, engenheiros, empreiteiros, dentre outros). A Figura 17 demonstra a estrutura do VDC pela integração de ferramentas, processos e equipes alinhadas a um objetivo comum (que atende aos interesses do projeto e do cliente).

Figura 17: Estrutura VDC seguindo conceito da *Stanford University*.



Fonte: adaptado de Rafsanjani, Nabizadeh (2023)

O *Project Production Management* (PPM) refere-se aos processos utilizados para desenvolver as atividades suportadas por ferramentas de modelagem BIM. O termo "BIM+" na estrutura VDC é atribuído a aplicativos BIM avançados que permitem compreender, controlar e

aprimorar a entrega do projeto definindo a sua variabilidade, planejamento do fluxo de trabalho e recursos necessários.

O *Integrated Concurrent Engineering* (ICE) tem o intuito de organizar as equipes multidisciplinares em reuniões para avaliarem as atividades de forma rápida, e com isso reduzir o tempo de tomada de decisões. Busca-se aprimorar a qualidade dos resultados e uma melhor integração entre as diferentes disciplinas. Além disso, modelos VDC permitem estimar o desempenho e comparar o que foi previsto versus realizado, para alcançar os objetivos do projeto (KUNZ; FISCHER, 2020). A metodologia BIM é um processo essencial nas sessões de ICE, pois apresenta os desafios do projeto para as equipes e clientes por meio da aquisição de dados e visualizações 3D para apoio nas tomadas de decisões. O VDC alinha principalmente novas tecnologias baseadas em BIM para repensar os processos de trabalho e para alcançar a maior eficiência na concepção e construção de projetos (FOSSE; BALLARD; FISCHER, 2017). Isso requer a aplicação de ferramentas adequadas aos processos otimizados, coordenados por pessoas treinadas, capacitadas e engajadas em um propósito comum. Para garantir o cumprimento dos objetivos torna-se necessário monitorar métricas específicas. Devem ser escolhidos indicadores-chaves: *Key Performance Indicators* (KPI) com base nos objetivos do cliente (desempenho, operação, sustentabilidade e segurança) nos objetivos de projeto (tempo, custos, número de questões resolvidas) e nos fatores gerenciáveis (qualidade e satisfação). Essas métricas são importantes para identificar as correções necessárias visando uma melhoria contínua do processo.

As metodologias BIM e VDC possuem muitos pontos em comum e, portanto, costumam ser confundidas. Ambas se baseiam na colaboração e na comunicação inteligente, contudo, o VDC é mais abrangente, pois utiliza modelos BIM para planejar os processos de construção, englobando elementos como orçamento, estimativa de custos e planejamento. Permite também que as equipes interajam para atingir de forma mais eficiente os objetivos esperados. Rafsanjani e Nabizadeh (2023) afirmam que a indústria da construção está passando por mudanças tecnológicas significativas e que elas estão moldando o seu futuro. Neste sentido é necessário explorar os caminhos para alcançar maior produtividade, com uso de ferramentas integradas ao VDC. As grandes decisões dos gestores de empresas, passaram a ser tomadas a partir de equipes multidisciplinares, consultorias especializadas, fornecedores de materiais e equipamentos o que requer um alinhamento perfeito entre os objetivos pretendidos, o plano de negócios e o gerenciamento do portfólio. Em projetos de grande complexidade torna-se necessário integrar as pessoas, os sistemas, os serviços em práticas como o *Integrated Project Delivery* (IPD).

2.5.2 Integrated Project Delivery (IPD)

O *Integrated Project Delivery* (IPD) surgiu em 2007 nas publicações do *American Institute of Architects* como um modelo de gestão de empreendimentos que utiliza princípios de gerenciamento para integrar pessoas, sistemas, estruturas de negócios e práticas profissionais em um processo colaborativo da produção. Tal abordagem quando associada aos conceitos de LC e BIM na indústria da construção, geram benefícios (SACKS *et al.*, 2010). Para adoção do IPD alguns requisitos são importantes, entre eles a seleção dos parceiros, confiança mútua e suporte contratual entre as partes. Quando efetivamente implementado o IPD proporciona melhores métricas de desempenho e satisfação das partes interessadas (WALI; ALI; FARDA, 2024). Isso ocorre uma vez que as conexões com o VDC fornecem a infraestrutura digital e o ambiente colaborativo necessários para sua implementação na indústria da construção. Os dados gerados na dinâmica do IPD são aplicados na análise inicial da viabilidade do empreendimento, de acordo com a disponibilidade financeira do proprietário (MOYLAN; ARAFAH, 2017). De acordo com Muianga *et al.* (2023) o IPD se enquadra na linha de práticas de gestão inovadoras que podem ser combinadas de forma flexível com modelos de gestão já existentes. Embora as pesquisas apresentem características e elementos do IPD que podem ser adotados para melhorar a produção de empreendimentos, ainda existe uma carência de orientações sobre como elas podem ser aplicados de modo gradual e evolutivo na construção (ALLISON *et al.*, 2018; HAMZEH *et al.*, 2019; MARCO; KARZOUNA, 2018; TENG *et al.*, 2019; WHANG; PARK; KIM, 2019).

Alguns autores afirmam que é necessária uma estratégia para avaliar melhorias na implantação do IPD. Segundo (MACHADO; BRAHMI; KAMARI, 2020) tanto na teoria quanto na prática o valor agregado da integração do IPD e LC e o BIM para processos colaborativos ainda carece de validação. Rashidian, Drogemuller e Omrani (2023) afirmam que a sinergia entre o IPD, LC e o BIM, ainda não foi amplamente discutida na indústria e na academia persistindo algumas incertezas. Além disso, desafios como as barreiras culturais e organizacionais, a resistência à mudança e a necessidade de competência técnica, são obstáculos para sua adoção. Evans, Martin e Farrell (2022) desenvolveram um quadro estratégico com os desafios da integração do IPD e do LC em megaprojetos de construção, os desafios mais significativos foram: falta de incentivos e políticas governamentais, sensibilização do cliente, experiência entre as partes interessadas em IPD, gestão de clientes e a resistência da própria indústria em mudar os modelos tradicionais. Percebe-se que os limites de conhecimento e aplicabilidade do IPD têm desestimulado a sua adoção em ambientes de produção de empreendimentos com pouca

experiência com esta prática (ABDIRAD; DOSSICK, 2019; DURDYEV *et al.*, 2019; LAURENT; LEICHT, 2019).

Dentro desse cenário de mudanças o *Integrated Digital Delivery* IDD surge como uma conexão entre o BIM, VDC e IPD. Em teoria, o IDD simplifica as diferentes etapas de um projeto de construção com a integração de tecnologias digitais que melhoram a colaboração entre as partes interessadas em todo o ciclo de vida da construção desde o projeto, fabricação e construção até a operação e manutenção (SGA, 2024). Ele é composto por quatro estágios principais: design digital, fabricação digital, construção digital e entrega e gerenciamento de ativos digitais (HWANG; NGO; HER, 2020; LIU, ZIWEN *et al.*, 2021). Sua implementação minimiza erros, retrabalhos, facilita a documentação, permite maior acesso à informação, melhora a eficiência, a colaboração, a segurança, produtividade, reduz o desperdício, custo e tempo (JONES, 2014). Uma forma de favorecer a comunicação e troca de informações entre equipes está associada a Gestão Visual e aos modelos de negócio.

2.5.3 Gestão visual (GV)

A Gestão Visual (GV) está associada a abordagem *Lean* nas indústrias automotivas japonesas, conhecida como modelos “enxutos”. Segundo Medeiros (2017) no ambiente organizacional, identificam-se cinco benefícios na GV: transparência, coordenação, comunicação, colaboração e simplificação. A transparência acontece, pois, a ferramenta fornece uma base de comunicação comum aos envolvidos, melhorando a tomada de decisão e a alocação de recursos. A coordenação é facilitada, pois permite a melhor distribuição do trabalho entre os envolvidos. A comunicação é promovida a partir do compartilhamento das informações de modo direcionado e de acordo com as prioridades dos envolvidos. A colaboração é incentivada pelas práticas visuais que permitem o envolvimento e a interação de todos os setores e partes interessadas. A simplificação decorre do fluxo de informações sintetizadas e incorporadas à rotina das pessoas (STEENKAMP; HAGEDORN-HANSEN; OOSTHUIZEN, 2017). No entanto, para que a GV produza todos os seus benefícios, ela precisa fazer parte de um plano maior (MA *et al.*, 2017; TEIXEIRA; MERINO, 2014). Autores como Tjell e Bosch-Sijtsema (2015) mostram que o uso da GV promove um sentimento de responsabilidade entre as pessoas ao perceberem de forma clara qual o papel dos envolvidos e como as tarefas foram interligadas. Bititci, Cocca e Ates (2016) defendem que a GV permite uma melhor distribuição de tarefas, melhora a coordenação e integração dos níveis hierárquicos quando aplicado em pequenas e médias empresas. Eaidgah

et al. (2016) afirmam que a transparência promovida pela GV melhora o processo decisório da equipe, alocando de forma adequada os recursos envolvidos. Nas organizações observa-se em estudos empíricos que as ferramentas visuais podem promover diversos benefícios, sendo um dos principais a transparência promovida junto às pessoas envolvidas (STEENKAMP; HAGEDORN-HANSEN; OOSTHUIZEN, 2017). Tezel e Aziz (2017) mostram que a gestão visual também utiliza dispositivos que permitem, uma melhor visão das informações e compreensão da estrutura organizacional. Viana *et al.* (2021) utilizou quadros para organizar e controlar tarefas diárias no setor de construção civil e no canteiro de obras e ressalta que GV pode promover a colaboração entre o departamento de planejamento e as unidades de produção, desde que a transparência e o *feedback* relativos ao processo em que essas ferramentas foram implantadas possam ser melhorados.

Dentro dessa perspectiva, nos últimos anos percebe-se um crescimento na utilização de ferramentas e modelos visuais, que aplicam a GV integrados no desenvolvimento de modelos de negócios. Nesses “espaços visuais colaborativos” podem ser discutidos as atividades do negócio de uma empresa, envolvendo as partes interessadas e pessoas chaves envolvidas desde as fases iniciais de um projeto, para que se obtenha melhores resultados futuros. Alguns estudos, como os apontados anteriormente, apresentam o *Business Model Canvas (BMC)* como proposta para lidar melhor com a problemática empresarial e auxiliar na construção de um planejamento adequado do negócio.

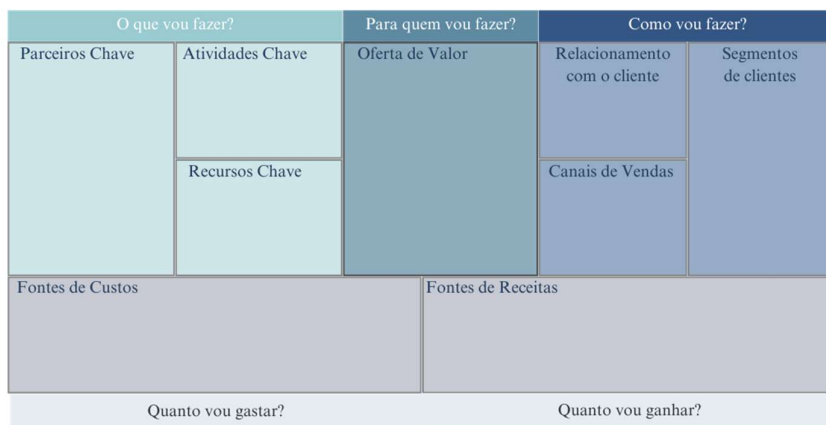
2.5.4 Business Model Canvas (BMC)

O *Business Model Canvas (BMC)* é uma ferramenta de gestão usada para visualizar os elementos principais de um negócio e criar estratégias para alcançar seus objetivos. É simples de ser usada e permite que empreendedores e empresas avaliem rapidamente o desempenho de seus negócios ou mesmo uma nova ideia. O BMC é útil, principalmente para empresas que estão sempre passando por modificações em sua estrutura. O Método Canvas foi desenvolvido pelos professores de estratégia empresarial Osterwalder e Pigneur (2011) na Universidade de *Lausanne* na Suíça e divulgado no livro denominado *Business Model Canvas (BMC)*. Ele foi criado como uma ferramenta para auxiliar empreendedores a visualizar e desenvolver modelos de negócios inovadores e, desde então, tem sido adotado por empresas de todo o mundo. Esse tipo de construção é um exercício que pode ocorrer em grupos multidisciplinares, onde os autores, reforçam que esse modelo facilita a discussão, induz a uma reflexão de forma simples

e integrada para resolução de questões complexas e pode revelar lacunas lógicas. A Figura 18 apresenta o esquema do BMC dividido em quatro áreas, resumido cinco perguntas chaves que devem ser respondidas pelo modelo de negócio em análise: O que eu vou fazer? Para quem vou fazer? Como vou fazer? Quanto vou ganhar? Quanto vou gastar? O modelo é dividido em nove etapas ou blocos principais do *Canvas*, que representam as áreas mais relevantes de um negócio e fornecem a base para a criação do modelo ou a adaptação de um já existente.

- Parcerias principais: define os principais parceiros que irão auxiliar na operacionalização do modelo de negócio;
- Atividades-chave: representa as ações mais importantes que uma empresa deve executar para operar com sucesso;
- Recursos chave: descreve os recursos essenciais para que a empresa desenvolva sua proposta de valor;
- Oferta de Valor: descreve os benefícios que uma empresa oferece aos seus clientes;
- Relacionamento com clientes: esclarece o tipo de relação que a empresa quer estabelecer com cada segmento de clientes;
- Canais de venda: compõem a interface entre a empresa e os clientes;
- Segmentos de clientes: define qual grupo de clientes uma organização deve atender;
- Fonte de custos: descreve os custos principais envolvidos na operação do negócio;
- Fontes de receitas: diz respeito ao dinheiro gerado a partir de cada segmento de cliente que a empresa pretende alcançar.

Figura 18: Principais blocos do Business Model Canvas (BMC)



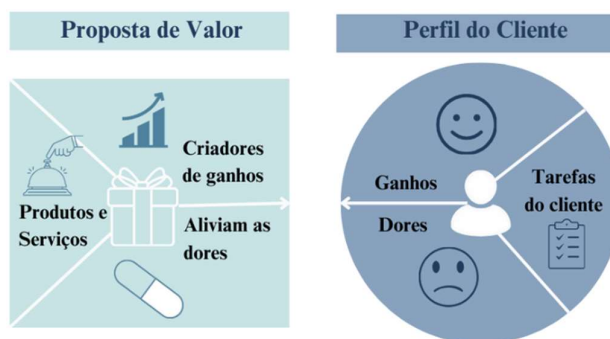
Fonte: Adaptado de Osterwalder e Pigneur (2011)

Empresas como *Amazon*, *Netflix* e *Airbnb* adotam em seus negócios essa estrutura para o lançamento de novos produtos e/ou serviços. Foi nesse contexto que Osterwalder *et al.* (2014)

ampliaram seus estudos sobre Modelos de Negócio e criaram o Canvas de Proposta de Valor. Por meio desta ferramenta, os autores buscaram detalhar o que é, e para quem as empresas criam valor. Dessa forma a literatura mostra uma série de estudos recentes que exploram esse tema, trazendo diferentes abordagens e realidades de pesquisa, seja por meio de proposições de modelos, concepção de negócios ou aperfeiçoamento do próprio modelo BMC o que abrange aspectos como a integração social, econômica, ambiental e organizacional (ARAÚJO *et al.*, 2017; JOYCE; PAQUIN, 2016; MEDEIROS, 2017; SCHALTEGGER; HANSEN; LÜDEKE-FREUND, 2016; TEIXEIRA; LOPES, 2016). Percebe-se que existe uma tendência em relação ao crescimento do uso de modelos e ferramentas visuais de gestão devido a necessidade de tornar mais fáceis e acessíveis as orientações, os procedimentos e a comparação do desempenho atual com o desejado. Segundo Massa, Tucci e Afuah (2017) além de ser um tema atual, o *Canvas* é um dos modelos de negócio mais citado, pois representa os componentes críticos responsáveis pelo detalhamento de um modelo de negócios. De acordo com Saad, Dulaimi e Zulu (2023) a aplicação da metodologia *Canvas* foi considerada eficaz e confiável para medir o desempenho e a competência empresarial das organizações.

Dessa forma, para responder aos questionamentos propostos deve-se primeiro definir o Perfil do Cliente, conforme apresentado na Figura 19. Ele é elaborado tomando como base os resultados e experiências negativas que acontecem no ambiente de trabalho (*Dores*); nas diferentes tarefas, nos problemas ou atividades com as quais se pretende lidar (*Tarefas do cliente*); e nos resultados, experiências positivas a serem alcançadas, ou seja, a força motivadora para as mudanças desejadas (*Ganhos*).

Figura 19: Elaboração da proposta de valor baseado em Canvas



Fonte: Adaptado de Osterwalder *et al.* (2014)

Definido o Perfil do Cliente, um Mapa Conceitual da Proposta de Valor deve ser construído, nele serão listadas as formas de auxiliar o cliente a lidar com as suas dores (*Aliviam as dores*); as formas para alcançar os resultados e benefícios desejados (*Criadores de Ganhos*); e o que

deverá ser executado para aliviar as dores e obter ganhos (*Produtos e serviços*). De posse desses dois indicativos (Perfil do Cliente e Proposta de Valor) temos o Mapa Conceitual para responder as cinco perguntas norteadoras: O que fazer? Para quem fazer? Como fazer? Quanto ganhar? Quanto vai custar?

Outro modelo baseado em *Canvas* é o *Project Model Canvas* criado por Finocchio Júnior (2013). O modelo também é dividido em áreas direcionadas por perguntas, sendo o ponto de partida a fase zero ou *Pitch*, este é o local onde o projeto deve ser resumido em apenas uma frase, seguido pelas perguntas fundamentais: Por quê? abrange os blocos: justificativa, objetivo, (específico, mensurável, atingível, realista, temporizado) e benefícios. O quê? abrange os blocos: produto/serviço e requisitos. Quem? inclui os blocos: *stakeholders*, equipe e restrições. Como? reúne os blocos: premissas, grupos de entrega e restrições. Quando e Quanto? mostra os blocos: riscos, linha do tempo e custos.

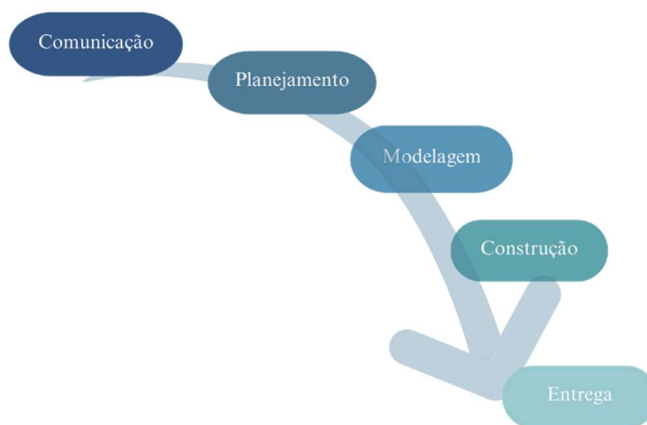
Desde então, surgiram diversos modelos e ferramentas visuais baseados em *Canvas*, na área de planejamento e gestão e que geralmente utilizam a estrutura baseada em perguntas. Neste sentido, optou-se nesta pesquisa, por investigar além dos modelos baseados em telas *Canvas*, outros modelos que pudessem contribuir para se alcançar as metas e objetivos específicos de um empreendimento estrutural industrial. Para proporcionar uma visão estratégica e organizada para desenvolver, projetar e operar um empreendimento desde as fases iniciais do projeto o modelo Cascata e o modelo em V também foram consideradas.

2.5.5 Modelos Cascata, V e Espiral

O modelo Cascata (ou *waterfall*) algumas vezes chamado ciclo de vida clássico, foi desenvolvido para engenharia de *softwares* e sugere uma abordagem sequencial e sistemática para o desenvolvimento de projetos, começando com o levantamento de necessidades por parte do cliente, avançando pelas fases de planejamento, modelagem, construção, emprego e culminando no suporte contínuo do *software* concluído. A estrutura se baseia em uma hierarquia rígida de etapas sequenciais, com um controle fixo das funções. Inicialmente, o modelo foi proposto como uma forma de melhorar a previsibilidade dos projetos e a metodologia é marcada por etapas de desenvolvimento, sendo elas a de: Comunicação (levantamento de requisitos), Planejamento (estimativas e cronogramas), Modelagem (análise do projeto), Construção e Entrega conforme apresentadas na Figura 20. Ele visa interpolar etapas de planejamento e construção com testes organizados para garantir a consistência do produto. Assim, aproveitam-

se melhor os processos de testagens e, no geral, é possível obter produtos com uma qualidade superior (PRESSMAN; MAXIM B.R., 2021).

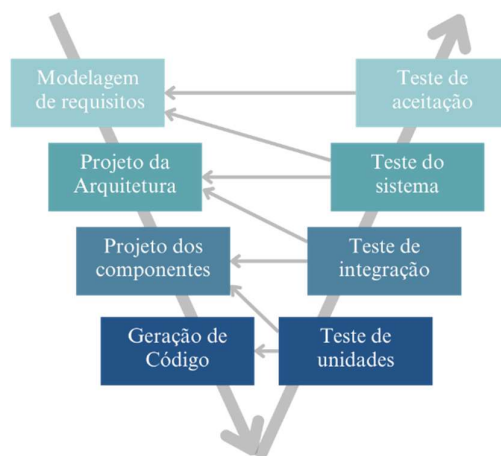
Figura 20: Modelo Cascata



Fonte: Adaptado de Pressman e Maxim (2021)

Uma variação na representação do modelo Cascata é o modelo V, pois ele estabelece um roteiro de atividades sequenciais. Segundo Awotar e Sungkur (2018) o modelo V foi criado pelas forças armadas da Alemanha com o intuito de relacionar as atividades que são desencadeadas de forma lógica para garantir a qualidade esperada do produto final. Em geral, o modelo V avalia requisitos que são elaborados, documentados e compreendidos por todos os envolvidos. O modelo V é um processo prescritivo e tradicional que fornece um roteiro de atividades e determina atividades encadeadas logicamente além de mecanismos de controle de mudanças (PRESSMAN; MAXIM B.R., 2021). Nesse modelo pressupõe-se que sejam realizados testes ao longo de todo ciclo de vida do projeto. Contudo, os testes são totalmente interdependentes, e os procedimentos são verificados e validados em todos os estágios do modelo conforme exemplo da Figura 21. O modelo Espiral é um processo com potencial para o rápido desenvolvimento de versões cada vez mais completas. Nas primeiras iterações, a versão pode consistir em um protótipo, mas nas iterações posteriores, são produzidas versões cada vez mais completas desses sistemas que passam pelo processo de engenharia.

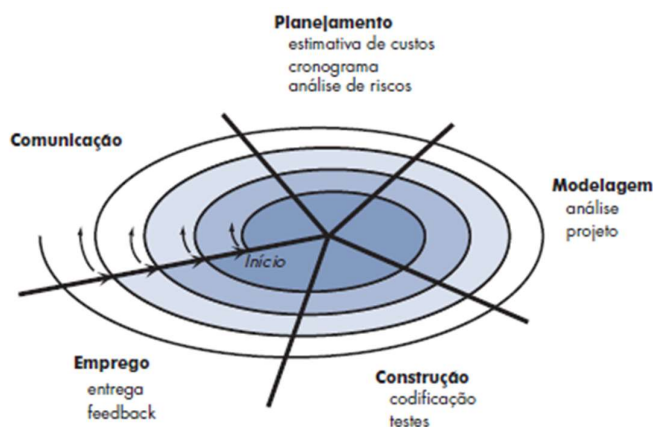
Figura 21: Modelo V com ações de verificação e validação



Fonte: Adaptado de Pressman e Maxim (2021)

A Figura 22 apresenta o modelo Espiral dividido em um conjunto de atividades metodológicas que podem ser definidas pela equipe de engenharia. Assim que esse processo evolucionário inicia, a equipe realiza atividades indicadas pelo circuito em torno da espiral, no sentido horário, começando pelo seu centro. O primeiro circuito pode resultar no desenvolvimento de uma especificação de produto; passagens subsequentes em torno da espiral podem ser usadas para desenvolver um protótipo e, então, progressivamente, versões cada vez mais sofisticadas podem ser conseguidas. Cada passagem pela região de planejamento resulta em ajustes no planejamento do projeto. Os custos e cronograma podem ser ajustados de acordo com o *feedback* (realimentação) obtido do cliente após a entrega. Além disso, o gerente de projeto pode ajustar o número de iterações planejadas para concluir o projeto (PRESSMAN; MAXIM B.R., 2021).

Figura 22: Modelo em Espiral



Fonte: Pressman e Maxim (2021)

Enquanto o modelo Cascata é linear e sequencial, o modelo em V e o modelo Espiral são mais iterativos e flexíveis. O modelo em V e o modelo Espiral podem ser vistos como evoluções do modelo Cascata, incorporando elementos adicionais para melhorar o processo de desenvolvimento e a qualidade do produto. Dessa forma, os modelos V e Espiral associados a metodologia FEL podem auxiliar no desenvolvimento de projetos complexos de estruturas industriais ou Projetos de Capital, pois eles se complementam para desenvolver o ciclo de vida do empreendimento desde a concepção até a operação e manutenção.

Nessa pesquisa foi feita uma adaptação dos modelos considerando as fases de planejamento, design, construção e operação para desenvolvimento de projetos. O objetivo da pesquisa foi desenvolver uma estrutura baseada em gêmeos digitais (*Digital Twin*) pela integração de BIM, IoT e banco de dados em nuvem, que atue como um método prático para controlar e otimizar o complexo processo de construção. Além disso, a criação de gêmeo digital pode trazer benefícios significativos, como otimização de processos, monitoramento em tempo real e tomada de decisões mais assertivas.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este capítulo trata da descrição dos procedimentos metodológicos necessários para atingir o objetivo geral dessa pesquisa: “propor um modelo para aplicação de *Digital Twin* nas fases de planejamento, design e construção de estruturas de edificações industriais de forma que os dados estejam organizados e disponíveis para a fase de operação e manutenção das estruturas.”

A pesquisa se caracteriza por uma abordagem qualitativa, uma vez que se preocupa com aspectos que não podem ser medidos quantitativamente. Considerando que existe uma relação dinâmica entre o mundo real e os sujeitos, e que esta relação não pode ser traduzida em números, a pesquisa aprofunda na compreensão da atuação dos profissionais da engenharia frente aos desafios gerados pelas tecnologias, que estão transformando o ambiente interno e externo das organizações. Caracteriza-se como pesquisa exploratória visto que identifica fatores que contribuem para ocorrência de um fenômeno e suas consequências (GIL, 2022). A pesquisa se enquadra como descritiva, uma vez que seu principal foco é obter uma compreensão detalhada do que está sendo estudado, visto que gera conhecimento para uso em práticas projetuais com o propósito de criar diretrizes e solucionar problemas específicos, envolvendo contextos e interesses reais (FEFERBAUM, 2022). A pesquisa, também, pode ser considerada como prescritiva, uma vez que enfatiza a produção de conhecimento com base na investigação de problemas vivenciados por equipes envolvidas no desenvolvimento e implantação de Projetos de Capital. Sendo, portanto, complementar à pesquisa descritiva, pois fornece um conjunto de ferramentas para desenvolver atividades consideradas urgentes ou para grandes desafios (HANISCH, 2024). Utilizou-se para o estudo uma das abordagens metodológicas mais utilizadas em pesquisas prescritivas, o *Design Science Research* (DSR). De acordo com alguns autores ela auxilia o pesquisador a ter uma visão científica mais aprofundada sobre os temas relacionados à investigação e ao mesmo tempo permite resolver problemas complexos do mundo real a partir da formulação de perguntas claras e específicas para criar sistemas, modelos, metodologias, *frameworks*, dentre outros recursos que podem ser aplicados na prática profissional (AKEN, 2004; DRESCH; LACERDA; JUNIOR, 2020; HEVNER *et al.*, 2004; ZHANG, ZHIQIAN; PAN, 2021).

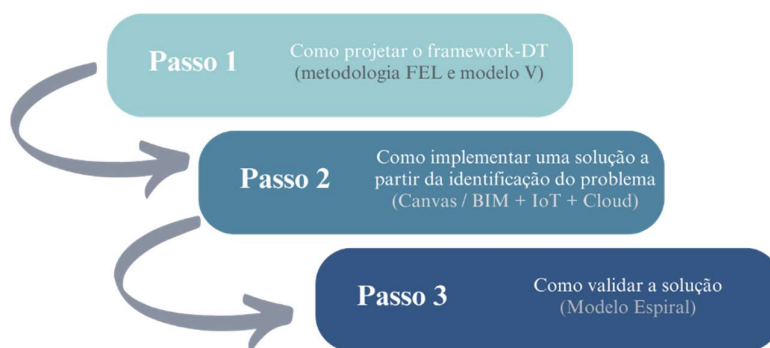
Tendo em vista que, de modo geral o conceito de *Digital Twin* é compreendido como a representação de um objeto do mundo real, pressupõe-se que a partir desse objeto real, seja criado o modelo virtual ou seu Gêmeo Digital (LIM; ZHENG; CHEN, 2020; TAO *et al.*, 2021;

ZHENG, XIAOCHEN; LU; KIRITSIS, 2022). Nesse sentido, o presente estudo propõe uma estrutura projetual onde o conceito de *Digital Twin* é adotado desde as fases iniciais de um Projeto de Capital. A ideia é integrar as informações provenientes de várias fontes para criar um modelo unificado e completo do projeto (TEULIER; BAGIEU, 2024). Para tanto, empregou-se recursos e tecnologias, diferentes *softwares* específicos, conexões IoT, para obter uma interoperabilidade a partir de uma plataforma em nuvem que viabiliza a colaboração e permite uma visão holística do projeto durante todo seu ciclo de vida. Dentro dessa perspectiva o *Design Science Research* (DSR) foi utilizado para formular as perguntas que guiaram a criação do modelo para aplicar o *Digital Twin* em Projeto de Capital.

- (i) Como projetar um modelo para aplicar o *Digital Twin* em todas as fases do ciclo de vida de projetos estruturais industriais?
- (ii) Como organizar os dados e informações para que estejam disponíveis em todas as fases do ciclo de vida?
- (iii) Como validar os resultados alcançados, com melhorias nas condições de trabalho e vantagem competitiva para a empresa?

Com base nessas perguntas estruturou-se três passos conforme apresentado na Figura 23 como projetar? como implementar? e como validar? uma arquitetura racional de *Digital Twin*.

Figura 23: Estrutura *framework-DT* com base no *Design Science Research*

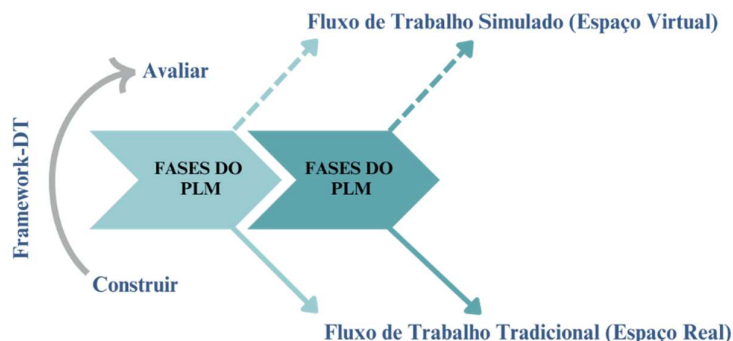


O primeiro passo foi estruturado para projetar o modelo, doravante denominado de *framework-DT*. O segundo passo foi para implementar o *framework-DT* em todas as quatro fases do Projeto de Capital: (1) planejamento, (2) Design, (3) Construção, e (4) a Operação e Manutenção, ou seja, todas as fases do ciclo de vida do empreendimento. O terceiro passo é a validação analítica do *framework-DT* ao final de cada fase.

3.1 Passo 1 - Projetar o *framework-DT*

Para projetar o *framework-DT* empregou-se a estrutura do Modelo em V utilizado na engenharia de *softwares*, e adaptado de tal forma que ele pudesse ser usado para atender às diversas fases do ciclo de vida de um Projeto de Capital conforme Figura 24. Na parte inferior do Modelo em V encontra-se o fluxo de trabalho tradicional, que acontece no espaço físico, e na parte superior propõe-se um fluxo de trabalho virtual para troca de informações em um espaço simulado. A ideia é que no espaço virtual sejam discutidos os potenciais usos das tecnologias digitais facilitadoras, articulando o BIM, a IoT, a plataforma em nuvem, com *softwares* de modelagem, que permitirão gerar um ambiente virtual a partir de metadados que contemplem o modelo proposto. Ao final de cada fase encontram-se os portões de aprovação (*Gates*) da metodologia *Front-End Loading* (FEL) apresentada na literatura, esses portões são necessários para que o projeto prossiga para as fases seguintes do ciclo de vida de um Projeto de Capital.

Figura 24: Diagrama esquemático do *framework-DT*



Os metadados que forem gerados devem ser satisfatórios para garantir que sejam feitas simulações e análises mais profundas e assertivas, e que irão permitir a resolução dos problemas que forem sendo identificados. Esses metadados armazenados na nuvem desde as fases iniciais do projeto, permitirão uma conexão entre o modelo virtual projetado e a sua construção no espaço físico e vice-versa. Dessa forma, obtêm-se os benefícios do *Digital Twin* nas fases de planejamento, design e construção das estruturas de edificações industriais de forma que os dados estejam organizados e disponíveis também nas fases de operação e manutenção.

3.2 Passo 2 – Implementar o *framework-DT*

No segundo passo, o *framework-DT* é implementado nas quatro fases do ciclo de vida: Fase (1) compreende o planejamento do Projeto de Capital; Fase (2) engloba o Design dos Projetos Conceitual, Básico e Detalhado; Fase (3) consiste na Construção, e na Fase (4) a Operação e Manutenção. O *Canvas* é adotado para identificação de problemas e criar uma Proposta de Valor com base nos questionamentos (o que fazer? para quem fazer? como fazer? quanto ganhar? quanto vai custar?) e no Perfil do Cliente. Serão utilizados o BIM, dados IoT e plataforma em nuvem para integrar as informações e criar um modelo unificado e completo do projeto. (BELLO *et al.*, 2021; MANSOURI; AKHAVIAN, 2018; SACKS *et al.*, 2020; TEULIER; BAGIEU, 2024).

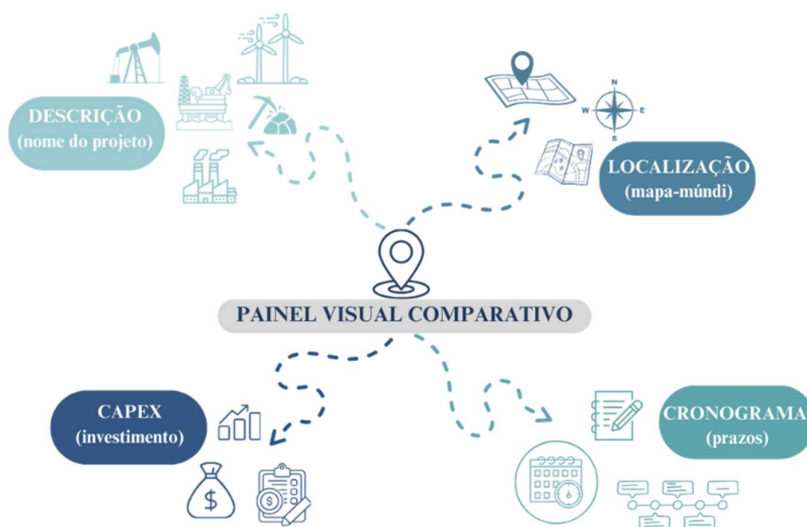
3.2.1 Fase de Planejamento

A fase de planejamento compreende o início do Projeto de Capital, ou estudo de viabilidade técnica e econômica. Nele é feita a definição do escopo e dos objetivos, de forma clara e alinhada com as estratégias empresariais. A metodologia FEL é adotada para auxiliar no planejamento e na melhoria da qualidade do projeto a partir de uma análise prévia de viabilidade econômica. O *Canvas* é utilizado para detectar quais são as “dores” enfrentadas pelos envolvidos para criar a Proposta de Valor, com a estratégia a ser adotada para auxiliar os gestores no momento de aprovação no *Gate 1*. O objetivo da Etapa (FEL 1) é estimar o montante inicial dos investimentos, levando em consideração uma faixa de variação do custo entre -25% a + 40% (OLIVEIRA *et al.*, 2016; ROMERO; ANDERY, 2016). Nessa etapa são avaliadas as oportunidades de investimento levando em consideração a atratividade do negócio, conforme apontado por (FERREIRA, 2021). Sendo necessária a participação de especialistas e técnicos multidisciplinares para que seja feito um estudo preliminar dos possíveis cenários e se obter uma visão das oportunidades e dos riscos do negócio e reduzir as chances de insucessos e perdas financeiras. Para que as análises do negócio forneçam valor para a empresa são realizados levantamentos de dados, que normalmente são baseados em índices de projetos similares. São também apontados os principais indicadores de desempenho, cálculo de taxas internas de retorno, valor presente líquido, valor do investimento, *payback* de retorno, dentre outros (SERRÃO, 2023). Ao final da etapa do FEL 1 encontra-se o portão de aprovação ou *Gate 1* e nele é definido os principais tipos de entregas a serem aprovadas. Nessa fase é comum que os processos de tomada de decisão, por parte dos gestores, sejam bastante intuitivos e tenham

como base padrões e sentimentos das suas próprias vivências (NEWMAN; BEGG; WELSH, 2020; STINGL; GERALDI, 2021). Essa conduta normalmente ocorre em função das informações de estudos anteriores se encontrarem dispersos, ou em documentos isolados ou de acesso restrito. Por isso, é considerada como uma fase tipicamente manual e com poucos recursos tecnológicos para o seu desenvolvimento.

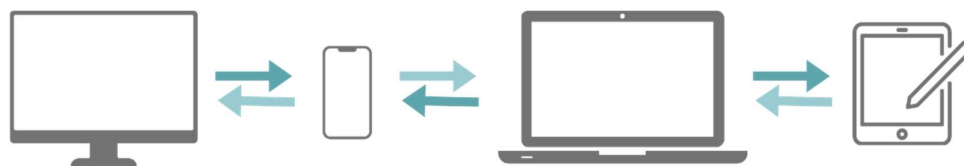
Para desenvolver essa fase foi elaborado um Painel Visual Comparativo na plataforma do ACC como uma estratégia para acesso a outros Projetos de Capital já desenvolvidos. Para tanto, os dados de projetos bem-sucedidos são digitalizados, organizados e identificados por *Cards* contendo as principais informações dos projetos a partir de quatro pontos principais: nome do projeto (descrição), localização do empreendimento no mapa-múndi, valor do investimento (*CapEx*), cronograma de construção com os prazos, conforme mostrado na Figura 25. Nos *Cards* os participantes podem extrair as informações necessárias para obter uma visão geral dos projetos realizados.

Figura 25: Estrutura para o Painel Visual Comparativo com dados na plataforma ACC



O acesso a esses dados pelos envolvidos no Projeto de Capital, poderá ser feito a qualquer momento e em tempo real a partir de dispositivos que são conectados à internet e a nuvem do ACC como *desktop*, *laptop*, *tablets*, celular, dentre outros, conforme Figura 26.

Figura 26: Interação por meio de telas de *desktop*, celular, *laptop*, *tablets*.



Por serem dispositivos normalmente utilizados no cotidiano das pessoas eles melhoram a interação homem/máquinas e facilitam o acesso às informações e aos ambientes virtuais de trabalho. Além disso, esses equipamentos possuem comandos tradicionais que são familiares aos usuários e seu custo é relativamente baixo. Com isso, os gestores podem ter acesso rápido ao Painel Visual Comparativo diretamente na nuvem ACC e realizar as análises comparativas entre outros projetos existentes e o projeto em questão.

3.2.2 Fase de Design

A fase de Design compreende a viabilidade técnica, econômica e ambiental do empreendimento. Nela encontra-se o Design do Projeto de Capital que corresponde aos projetos Conceitual, Básico e Detalhado, esses projetos são elaborados com base nas estratégias do BIM para gerenciamento de projeto, aplicando a metodologia das Etapas do FEL 2 e FEL3. O Canvas foi usado para auxiliar no levantamento do Perfil do Cliente (gestores). Nele buscou-se identificar as “dores do cliente” e a partir das dificuldades detectadas foi definida uma Proposta de Valor. O objetivo é incorporar soluções tecnológicas e construtivas para se obter as melhores alternativas nos portões de aprovação do FEL *Gate 2* e *Gate 3* e assim, auxiliar os gestores nas tomadas de decisão.

O Projeto Conceitual corresponde ao estágio do FEL 2, inicia-se o estudo de alternativas de *layout (trade-off)* considerando custo/benefício para escolha da melhor opção do empreendimento. Também são elaborados esboços, *croquis*, diagramas, desenhos básicos, descrições, que irão auxiliar na visão e nas diretrizes do projeto. Busca-se com isso, definir o que será desenvolvido, exploram-se as ideias e os conceitos, define-se o objetivo e os requisitos principais, identificam-se as alternativas possíveis, realiza-se análise técnica, econômica e ambiental. Nesse momento são elaborados os primeiros modelos BIM, considerando o nível de informações e atributos pertinentes a essa fase. Ao final dos estudos submete-se o projeto a validação no segundo portão de aprovação do FEL *Gate 2*. Esse portão garante que as decisões tomadas até então, sejam suficientes para o projeto progredir para o próximo estágio, prevendo

uma variação de custo entre -15% e +25%. De acordo com Romero e Andery (2016) apenas 50% dos projetos passam pelo *Gate 2* de aprovação.

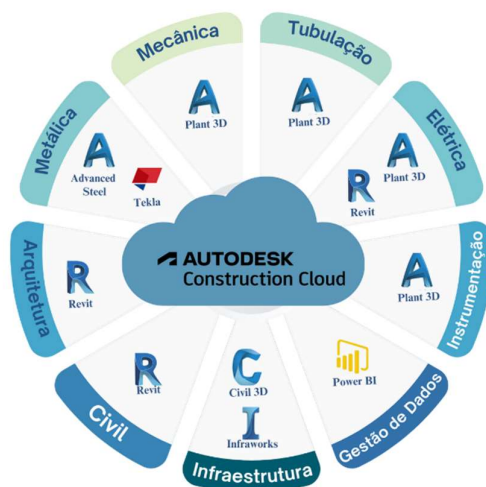
O **Projeto Básico** é uma evolução do Projeto Conceitual e corresponde ao estágio do FEL 3, nele o nível de exigências cresce. Nessa fase são ajustados os detalhes e especificações de forma mais precisa e requer uma abordagem cuidadosa para garantir que os requisitos sejam adequadamente considerados e documentados. Para elaborar o Projeto Básico são necessários o envolvimento e a colaboração de vários especialistas, como por exemplo, da engenharia de processo, engenharia ambiental, geologia, infraestrutura, mecânica, civil, elétrica, tubulação, instrumentação, arquitetura, além das regulamentações legais e locais. Para uma completa compreensão do Projeto de Capital, os modelos BIM são trabalhados com maior número de atributos desde os levantamentos topográficos, *layouts*, modelos de equipamentos, instrumentos, tubulação, elétrica, estimativas e quantidades de materiais, dentre outros. Após sua conclusão o projeto é submetido à aprovação no terceiro portão do FEL ou *Gate 3*. Esse portão garante que as decisões tomadas anteriormente são suficientes para implementar o projeto propriamente dito. De acordo com Romero e Andery (2016) apenas 1% das ideias não passam pelo *Gate 3*. Após essa aprovação segue-se para o Projeto Detalhado.

O **Projeto Detalhado** fornece dados precisos para a compreensão completa do Projeto de Capital, ele permite que a execução do projeto aconteça sem ambiguidades. Nele será consolidado o modelo BIM, as memórias de cálculo, os memoriais descritivos, especificações, os equipamentos, instrumentos, linhas, materiais, os desenhos técnicos, os detalhes construtivos, ou seja, toda a documentação necessária para construção e realização do empreendimento. Entretanto, para elaborar cada um dos projetos (Conceitual, Básico e Detalhado) é necessário estruturar e criar uma sequência lógica de ações interdependentes, isso porque em um Projeto de Capital várias equipes e disciplinas estão envolvidas ao mesmo tempo. Torna-se, portanto, fundamental integrar os modelos digitais criados pelas diferentes equipes ou especialistas nas diversas áreas, tais como: infraestrutura, mecânica, estruturas de concreto, metálica, arquitetura, instalações elétricas, hidráulicas, instrumentação, dentre outras.

O modelo BIM federado promove uma visão holística do projeto, pela interoperabilidade entre os diversos *softwares*, disciplinas e partes interessadas o que favorece uma maior colaboração entre as equipes. Isso reduz conflitos, melhora a coordenação e facilitar a tomada de decisões durante todo o ciclo de vida do projeto (PÄRN; EDWARDS; SING, 2018). Os modelos são agrupados em um sistema completo utilizado para planejar, construir e gerenciar as obras de infraestruturas e edificações industriais (BHAGWAT; SHINDE, 2016).

Considerando que a integração dos modelos digitais que irão formar o BIM federado deve ocorrer em um ambiente de fácil acesso, a adoção da plataforma em nuvem ACC da *Autodesk* permite que a última versão atualizada BIM esteja disponível em um único local e em tempo real para acesso de todos. A verificação de integridade e de consistência do modelo depende das entregas realizadas pelas equipes do projeto, onde cada parte é tratada como um sistema autônomo. Cada disciplina que atua no Projeto de Capital utiliza um *software* específico para criar o seu modelo BIM, sendo necessário integrar os fluxos de trabalho que abrangem todas as fases do projeto. A Figura 27 apresenta de forma esquemática os *softwares* que podem ser utilizados para elaborar um modelo BIM federado como o *AutoCAD Plant 3D*, *AutoCAD Civil 3D*, *Infraworks*, *Revit*, *Tekla*, *Inventor*, dentre outros, que viabilizam a abordagem metodológica do BIM.

Figura 27: *Softwares* utilizados para elaborar o modelo BIM federado



Ao adotar uma abordagem BIM federado no espaço virtual obtém-se benefícios significativos, como melhora na coordenação entre disciplinas, detecção precocemente de conflitos, facilidade na manutenção e operações, além de obter uma compreensão abrangente do desempenho do ativo ao longo do tempo. Para tanto, tomou-se como base modelos tridimensionais inteligentes com o propósito de potencializar o desenvolvimento dos projetos conceitual e básico (FEL 2 e FEL 3) e projeto detalhado. O objetivo foi compatibilizar as informações provenientes das várias disciplinas e criar um modelo unificado e completo do projeto a partir da interoperabilidade entre os diversos *softwares* utilizados por cada disciplina (PÄRN; EDWARDS; SING, 2018).

Para garantir que o Projeto de Capital atenda aos requisitos e padrões estabelecidos, são realizadas reuniões denominadas de *Design Review*, onde o modelo BIM federado é apresentado, discutido e avaliado pela equipe multidisciplinar de profissionais. Esse processo requer uma análise detalhada dos projetos onde os participantes examinam os desenhos, especificações técnicas, modelos, cálculos e outros documentos relacionados e as sessões podem acontecer de forma presencial ou *online*. Nos encontros presenciais é possível interagir com os dados de forma estática nos ambientes tridimensionais a partir da visualização em telas de *desktop*, *laptop*, *tablets*, celular (LIU, YIFAN *et al.*, 2020). Durante as reuniões de *Design Review* os participantes têm a oportunidade de fazer perguntas, expressar preocupações, oferecer sugestões e fornecer ideias sobre vários aspectos do projeto. Pretende-se com isso, identificar potenciais problemas, inconsistências ou lacunas, avalia-se também os padrões de segurança, regulamentações, requisitos de desempenho e outros critérios estabelecidos. Após a aprovação final o projeto segue para fase de construção (TANBOUR, 2022).

3.2.3 Fase de Construção

O complexo processo de Construção do Projeto de Capital, que ocorre na fase 3 da implementação do *framework-DT* do Projeto de Capital, envolve diversas atividades essenciais para transformar o modelo BIM federado em uma estrutura física tangível. Para assegurar o sucesso da construção do empreendimento é necessário coordenação, gerenciamento de projetos eficiente, além de extensa colaboração entre os profissionais e partes interessadas envolvidas. O *Canvas* irá auxiliar no levantamento do perfil do cliente (gestores da construção) a partir do uso do *framework-DT*, buscando identificar as “dores” ao longo do processo de construção. O objetivo é melhorar a integração e os fluxos de trabalho, a comunicação entre as equipes, com base nas dificuldades detectadas para definir uma Proposta de Valor.

A estratégia de contratação dos pacotes de suprimentos, a partir da seleção e aquisição dos bens e serviços necessários para a execução do projeto deve estar alinhada ao planejamento, ao cronograma master e ao *CapEx* (*Capital Expenditure*) do projeto que são os custos preliminares, estudos de riscos e análises de alternativas de engenharia para o empreendimento em questão. É comum que as requisições técnicas de alguns pacotes sejam iniciadas ainda na fase de Design, com informações em avanço para adequação junto aos fornecedores dos prazos de entrega.

O início da construção de um Projeto de Capital envolve atividades como a preparação do local com a remoção de vegetação, terraplenagem, construção de vias de acesso, construção de

infraestrutura como canteiros de obras, com os escritórios, galpões, oficinas e outras estruturas necessárias para o funcionamento da obra. Inclui também as estruturas de apoio como sistemas de drenagem para lidar com resíduos e água e saneamento básico. Infraestrutura elétrica e de comunicações compreende a construção de redes elétricas e distribuição de energia, redes de comunicação e sistemas de automação para controlar as operações. Sistemas de água e esgoto, abastecimento e tratamento de água residuais para atender às necessidades das operações e garantir a conformidade ambiental. Organizar uma equipe de construção, que inclui gerentes de projeto, engenheiros, supervisores, técnicos, empreiteiros, fornecedores e trabalhadores de construção. Controle de qualidade e segurança para garantir que a construção seja realizada de acordo com os padrões estabelecidos e que os trabalhadores estejam protegidos. Ter todas as licenças e autorizações necessárias para a fase de construção. Monitoramento ambiental para acompanhar o impacto das operações no meio ambiente e implementação de medidas de mitigação conforme necessário. Execução das bases e fundações e a montagem eletromecânica das instalações de processamento e de equipamentos e máquinas, como britadores, transportadores, caminhões de transporte, escavadeiras e outros equipamentos específicos do processo de extração e processamento. Após a conclusão das instalações e equipamentos, é necessário realizar comissionamento e testes para garantir que tudo esteja funcionando conforme o esperado. Concluída a construção e os testes, a planta industrial do empreendimento está pronta para a transição para a fase de operação.

3.2.4 Fase de Operação e Manutenção

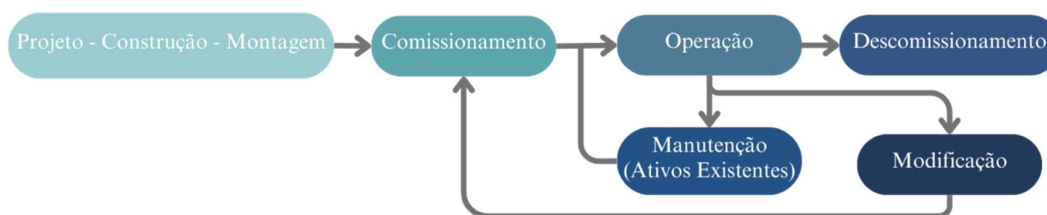
A fase 4, de implementação do *framework*-DT do Projeto de Capital, exige uma gestão cuidadosa de todos os ativos construídos de modo a garantir eficiência, segurança e conformidade com regulamentações ambientais e sociais. Equipes de diferentes disciplinas precisam colaborar entre si, e trocar experiências e conhecimentos, para consolidar um projeto bem-sucedido, isso porque falhas podem causar efeitos indesejados como, por exemplo, tempo e custo excedidos, danos, colapso estruturais ou até mesmo mortes ou feridos. Antes de iniciar as operações, é essencial que toda a infraestrutura necessária esteja funcionando adequadamente. O Canvas auxiliou no levantamento do perfil do cliente (gestores da operação) a partir do uso do *framework*-DT, buscando identificar as “dores” ao longo do processo de operação e manutenção. O objetivo definido na Proposta de Valor foi assegurar que os dados

coletados nas fases anteriores (design e construção) estivessem disponíveis de forma fácil, completa e consolidada.

Na operação e manutenção devem ser avaliadas constantemente a integridade de estruturas de edificações industriais, a segurança e o conforto dos ocupantes durante a utilização das instalações. A avaliação de integridade estrutural é o resultado da aplicação de técnicas e procedimentos que permitem identificar a situação de uma estrutura, para prever seu comportamento futuro e indicar, caso haja necessidades, inspeção, monitoração, recuperação e reforço. Está relacionada às condições de trabalho de um componente ou ativo de tal forma que ele possa atender às condições para as quais foi projetado, deve suportar os carregamentos máximos de trabalho e apresentar comportamento confiável, previsível, repetitivo e necessários para garantir a sua vida em serviço (PALLARÉS *et al.*, 2021).

A fase de operação e manutenção (O&M) é a fase mais demorada e dispendiosa do ciclo de vida do projeto. No entanto, os benefícios potenciais do BIM nesta fase não foram totalmente explorados, ao contrário das fases de projeto e construção. Isto é particularmente evidente na ausência de uma avaliação abrangente das suas capacidades de aplicação (CHEN, ZHEN-SONG *et al.*, 2024). As inspeções são atividades voltadas para avaliar possíveis defeitos e danos existentes em uma estrutura, elas podem direcionar ações que sejam corretivas ou preventivas. As ações corretivas restauram as condições originais dos ativos eliminando as falhas ou panes, fazendo com que a estrutura retorne novamente ao trabalho. As ações preventivas são categorizadas como manutenções baseadas em tempo e ou condições. Segundo a Agência Nacional de Petróleo (ANP) a avaliação da integridade é um processo baseado na inspeção, exame físico (por diferentes técnicas), caracterização (por severidade) e tipo dos defeitos encontrados em um sistema. Além disso, o processo deve considerar as modificações que ocorrerão ao longo da sua vida útil (Figura 28).

Figura 28: Fluxo de manutenções e modificações em estruturas de edificações industriais



Tais requisitos buscam evitar a perda de estabilidade da estrutura, prever situações de dano e/ou comportamento indesejados, cujas principais consequências podem ocasionar acidentes com pessoas, danos ao meio ambiente e impactos financeiros. Mesmo que as operações sejam

realizadas dentro de um limite seguro, existe uma depreciação que acontece em função do uso que pode levar a falhas de funcionamento. Torna-se, portanto, necessário desenvolver modelos de inspeção e manutenção dos ativos, para evitar problemas de perdas para as pessoas, empresas e meio ambiente. Nos últimos anos, o mercado global e competitivo percebeu que grandes falhas, como vazamentos e derramamentos, podem ocasionar danos diferentes além dos financeiros. Isso fez com que as empresas buscassem também uma manutenção preditiva com o intuito de prever ou antecipar possíveis ações que evitassem falhas e catástrofes. Deve-se ainda manter uma comunicação efetiva com as comunidades locais e abordar preocupações sociais. É importante que os procedimentos operacionais sejam consolidados para garantir a eficiência operacional e realizar os reparos conforme necessário para evitar interrupções nas operações.

3.3 Passo 3 – Validar o *framework-DT* em Projeto de Capital

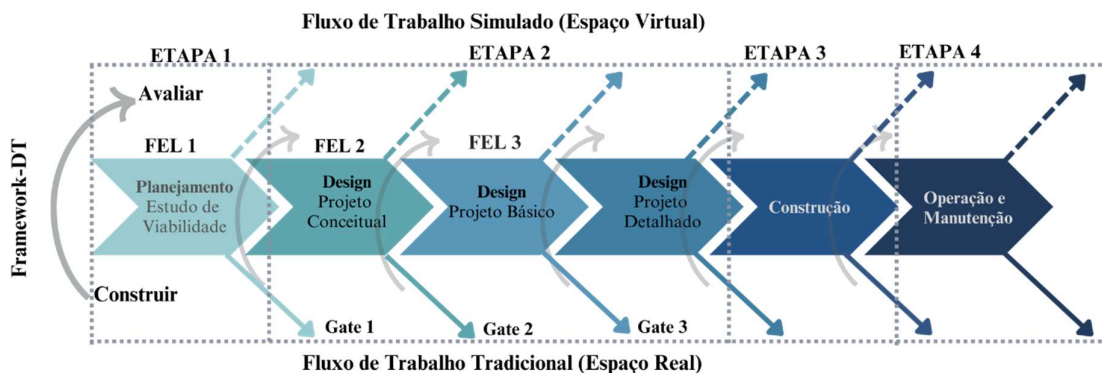
No terceiro passo o *framework-DT* é validado após ser implementado em cada fase do empreendimento. A partir da estrutura do modelo em Espiral versões cada vez mais sofisticadas são geradas progressivamente. Cada passagem pela região de planejamento, design, construção ou operação, de acordo com o *feedback* (realimentação) dos envolvidos, resulta em melhorias nos modelos de negócios, nas escolhas das ferramentas e dos processos. Ao final de cada Projeto de Capital ocorre a validação do *framework-DT* e os gestores podem ajustar o número de iterações necessárias a serem realizadas em cada fase para garantir que a incorporação de elementos adicionais esteja contribuindo para melhorar os processos e a qualidade do produto (PRESSMAN; MAXIM B.R., 2021).

4 RESULTADOS

4.1 Passo 1 - Projetar o *framework-DT*

Para projetar o *framework-DT* é necessário compreender como um fluxo de trabalho tradicional se desenvolve no ambiente físico de um Projeto de Capital. A Figura 29 apresenta o esquema do fluxo de trabalho no ambiente físico e posteriormente no virtual. O modelo em V da engenharia de *softwares* adaptado e a metodologia FEL de gerenciamento de projetos foram empregados para auxiliar na validação das etapas nos portões (*Gates*) de aprovação. As setas (azuis) situadas na parte inferior do modelo representam o fluxo de trabalho no espaço físico real. Do lado esquerdo, encontra-se o planejamento do empreendimento (Etapa de FEL 1 – estudo de viabilidade). Ao centro o Design (projetos), onde são definidos e coletados os requisitos técnicos, as demandas do cliente e as especificações necessárias para o empreendimento (Etapa do FEL 2 - Projeto Conceitual e Etapa do FEL 3 - Projeto Básico, e na sequência o Projeto Detalhado), nele encontram-se os portões de aprovação (*Gates* 2 e 3). Ainda na parte inferior do diagrama (lado direito), encontram-se as fases de construção, operação e manutenção, nelas acontecem as entregas físicas e o comissionamento.

Para que as mudanças no mundo real sejam refletidas no modelo digital e vice-versa, foi proposto um espaço virtual na parte superior do modelo em V (setas azuis tracejadas), onde é possível simular (a partir de *softwares* e das conexões em nuvem) um espelho da parte inferior do diagrama e do que ocorre no espaço físico real. Dessa forma, as mudanças que são inevitáveis ao longo do ciclo de vida do empreendimento, podem ser mais bem controladas no contexto das condições finais de projeto. Sendo possível realizar ensaios e testes para prever digitalmente a forma como o modelo foi desenvolvido e a forma como ele se comportaria frente às mudanças. Essas alterações, muitas vezes, não são adequadamente mensuradas nos projetos tradicionais, isso normalmente gera impactos significativos nos prazos, na qualidade dos projetos, nos custos, dentre outros. Este espaço virtual criado (a partir de diferentes tecnologias), permitirá avaliar o comportamento em diferentes situações, seja de um equipamento, uma edificação, ou mesmo um processo. Assim, obtém-se um produto com a intenção planejada e em cada fase do ciclo de vida. O propósito do *framework-DT* é certificar que os requisitos apontados no fluxo de trabalho tradicional irão performar adequadamente no espaço virtual, e qual seria o impacto gerado (pelas alterações que ocorrem), se comparadas com o que foi originalmente projetado.

Figura 29: Diagrama do *framework-DT* para um Projeto de Capital

Ressalta-se aqui o valor do *framework-DT* ao permitir a validação analítica do que acontecerá no espaço físico já nas fases iniciais do empreendimento, uma vez que será possível realizar uma análise prévia no modelo virtual, evitando que interferências negativas possam refletir nas fases posteriores de consolidação do projeto. Pretende-se que com a adoção de uma solução *framework-DT* inúmeras oportunidades possam surgir para utilizar uma estrutura de dados organizada em um ambiente virtual que permitirá aos gestores, mitigar, reduzir ou eliminar problemas reais.

Contudo, observa-se que nas fases de operação e manutenção o DT atinge um alto nível de maturidade e pode ficar vinculado a outros sistemas empresariais da organização, como o sistema financeiro, o sistema de gerenciamento de ordens de serviço, o sistema de custo ou qualquer outra rede que permita ver essa troca de dados para dar suporte à análise e ao aprendizado de máquina e otimizar o desempenho dos ativos. Devido à complexidade do processo de desenvolvimento de um Projeto de Capital, é necessário analisar a especificidade e a dinâmica de cada empreendimento para que sejam identificadas as reais oportunidades que irão agregar valor as diversas atividades desenvolvidas. A proposta é que o *framework-DT* seja flexível e se adapte a cada empreendimento e poderá ser utilizado para apoiar na definição de uma arquitetura racional de *Digital Twin* para Projetos de Capital.

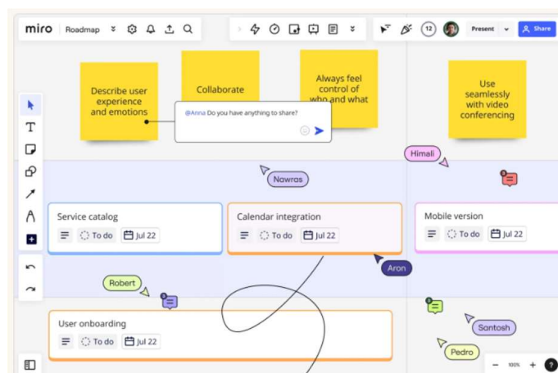
Para projetar o *framework-DT* tomou-se como base o Modelo em V, a metodologia FEL, e o *Design Science Research* (ZHANG, ZHIQIAN; PAN, 2021). O *Canvas* foi adotado para criar as Propostas de Valor com base na identificação de problemas e no Perfil do Cliente. Para tanto foram realizadas reuniões entre os envolvidos (*online* e/ou presenciais) desde as fases iniciais do ciclo de vida do Projeto de Capital, para se identificar os problemas e as contribuições de

cada equipe. No caso de reuniões *online*, plataformas como o Miro¹⁰ foram utilizadas. O Miro é uma plataforma visual colaborativa, onde as equipes multidisciplinares participam e contribuem com suas experiências, suas demandas de trabalho, seus resultados negativos, com as tarefas rotineiras, os problemas eventuais, atividades práticas, entre outras (Figura 30).

Figura 30: Interação para definição do *Canvas*



Reuniões Presenciais
Fonte: <https://br.freepik.com/>



Reuniões online na plataforma Miro
Fonte: <https://miro.com/pt/>

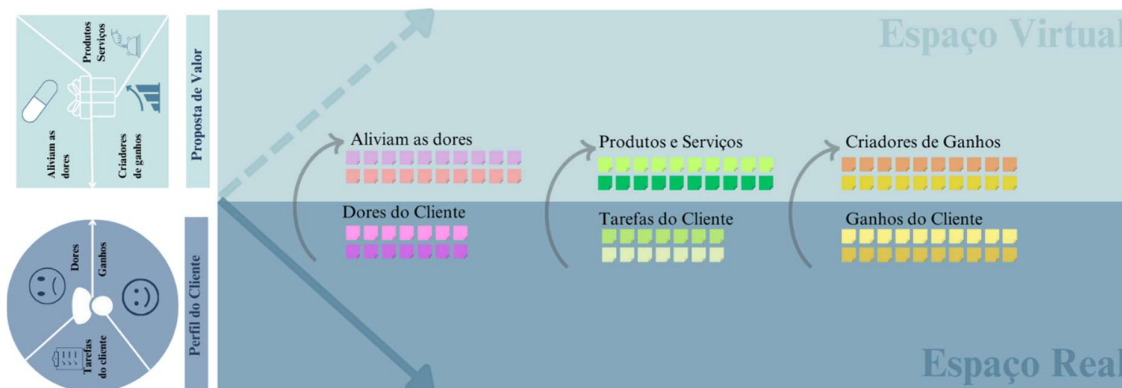
As reuniões podem ser agendadas conforme estratégias definidas entre os envolvidos, nelas são mapeadas as dores, as tarefas executadas e os ganhos pretendidos pelas equipes multidisciplinares no espaço físico real. Para garantir maior assertividade é necessário estabelecer claramente quais as equipes serão atendidas e aprofundar na pesquisa das dores de maneira realista para criar uma relação genuína entre o produto ou serviço e obter uma solução adequada para as partes interessadas. Durante as reuniões é necessário ainda que os participantes estejam abertos a novas possibilidades, a fim de encontrar soluções que não estavam previstas e que podem ser as verdadeiras geradoras de valor do negócio. A partir desses encontros têm-se como resultado as contribuições dos envolvidos que são ordenadas de acordo com o Perfil do Cliente no modelo *Canvas*.

Com as contribuições dos envolvidos (dores) ordenadas de acordo com o Perfil do Cliente pode-se desenvolver a Proposta de Valor para cada etapa do empreendimento. A Proposta de Valor deve conter as soluções para lidar com as dores detectadas (*pains relievers*), os subsídios para alcançar os resultados e benefícios desejados (*gain creators*), além de informar o que poderá ser feito para aliviar as dores e obter ganhos (*services*) no espaço virtual, conforme mostrado na estrutura do modelo em V (Figura 31). O *Canvas*, portanto, deve ser alinhado aos requisitos

¹⁰ Miro - é uma plataforma online de colaboração digital que permite que equipes compartilhem e desenvolvam atividades de forma remota em tempo real. Fonte: <https://miro.com/pt/>

contratuais, as estratégias dos produtos entregáveis e servir como um guia para uma implementação consistente e bem-sucedida do *framework-DT* nos Projetos de Capital.

Figura 31: Resultado da interação das equipes multidisciplinares no *Canvas*.

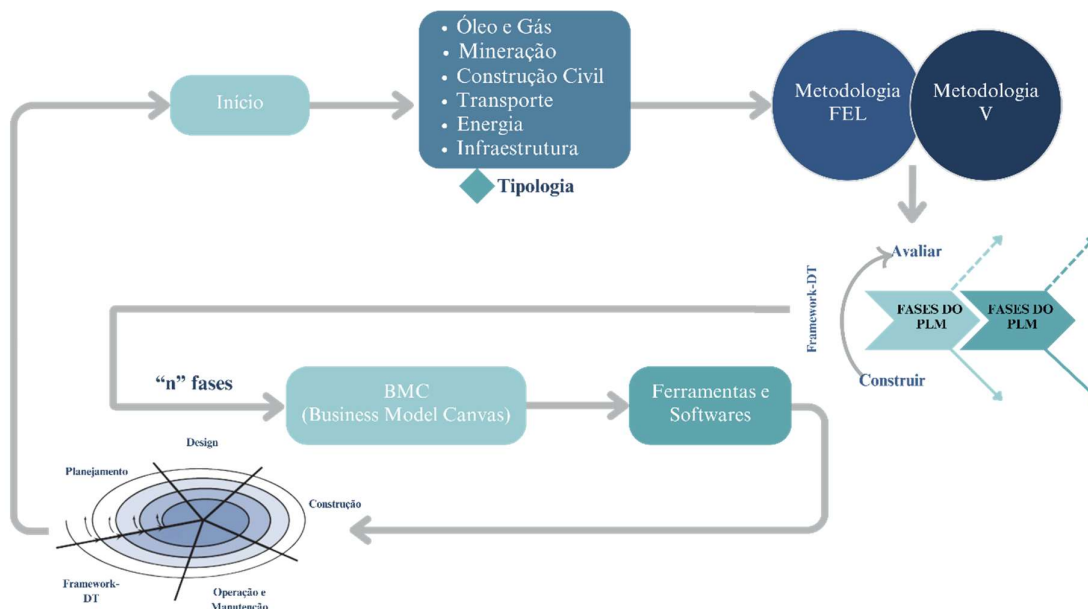


As informações coletadas nas reuniões e organizadas em blocos, são integradas em consonância com o gerenciamento de projetos e são respondidas formulando a Proposta de Valor para cada uma das fases do ciclo de vida, conforme mostrado na Tabela 4 (o que fazer? para quem fazer? como fazer? quanto ganhar? quanto vai custar?) com base nas respostas a essas perguntas é elaborada a Proposta de Valor conforme proposto no *Canvas*.

Tabela 4: Perguntas norteadoras do *Canvas* para elaborar a proposta de valor

Perguntas	Proposta de Valor
O que eu vou fazer?	Descrição da solução adotada
Para quem vou fazer?	Pessoas envolvidas ou os interessados;
Como vou fazer?	Ferramentas e processos a serem utilizados;
Quanto vou ganhar?	Estimativas de ganhos e benefícios.
Quanto vai custar?	Custo de implantação

A Figura 32 mostra de forma esquemática o fluxograma para aplicação do *framework-DT* com a sequência das atividades que podem ser usadas em uma ampla variedade de contextos em processos e estruturas de edificações industriais.

Figura 32: Fluxograma de aplicação do *framework-DT*

Ressalta-se aqui que as aplicações em *framework-DT* não se limitam às apresentadas nessa pesquisa, considera-se que existam diferentes possibilidades e que elas irão variar de acordo com o segmento e os problemas enfrentados em cada Projeto de Capital, para garantir que versões cada vez mais refinadas do *framework-DT* possam ser geradas.

4.2 Passo 2 – Implementar o *framework-DT*

No segundo passo, foi escolhido um Projeto de Capital de estruturas de edificações industriais que utilizou tanto a metodologia BIM quanto a metodologia FEL para desenvolvimento de uma planta industrial no estado de Minas Gerais. O projeto passou pelas quatro fases: Fase (1) o planejamento do Projeto de Capital; Fase (2) o Design dos Projetos Conceitual, Básico e Detalhado; Fase (3) a Construção, e a Fase (4) a Operação e Manutenção para implantação do *framework-DT*. O Canvas foi adotado para identificação de problemas e foi criada uma Proposta de Valor com base nos questionamentos e no Perfil do Cliente. Serão apresentadas as ferramentas adotadas em cada fase para consolidação de um DT que integre informações, modelos e dados em tempo real e para auxiliar no controle, monitoramento e otimização dos processos ao longo do ciclo de vida de um empreendimento.

4.2.1 Fase de Planejamento

A fase de planejamento foi estruturada para auxiliar na tomada de decisão dos gestores na Etapa do FEL 1, que corresponde ao início do Projeto de Capital ou estudo de viabilidade técnica e econômica utilizando o *framework-DT*. Nessa etapa o *Canvas* foi empregado para avaliar a partir do Perfil do Cliente, as experiências negativas (*Pains*) nas diferentes tarefas (*Jobs*) e levantar quais os resultados positivos podem ser alcançados para que mudanças (*Gains*) sejam concretizadas. A partir de então foi feita uma relação de estratégias para auxiliar os gestores a lidar com as dores percebidas e alcançar os resultados desejados. De posse desses indicativos foi montada a Proposta de Valor, e criou-se um Painel Visual Comparativo de estudos realizados e bem-sucedidos na Etapa do FEL 1, conforme mostrado na Tabela 5. O Painel Visual Comparativo é uma importante estratégia visto que ela simplifica o processo de análise dos principais dados do projeto e torna as informações acessíveis a um número maior de usuários que estiverem envolvidos no Projeto de Capital.

Tabela 5: Resultado do *Canvas* para Etapa 1 do Planejamento do Empreendimento

Perguntas chaves	Proposta de valor
O que eu vou fazer?	Painel Visual Comparativo (entre estudos bem-sucedidos FEL's);
Para quem vou fazer?	Gerentes/diretores responsáveis pela aprovação no Portão ou Gate 1;
Como vou fazer?	Definir os principais atributos; organizar banco de dados em nuvem na plataforma ACC; utilizar os módulos <i>Build</i> , <i>Photos</i> para criar <i>Cards</i> de identificar os projetos;
Quanto vou ganhar?	Maior confiabilidade e assertividade no processo de tomada de decisão;
Quanto vai custar?	Baixo investimento.

Para construir o Painel Visual Comparativo foram coletados e organizados dados de projetos, com base no histórico de estudos anteriores e esses dados foram inseridos à plataforma ACC. Estes dados podem ser acessados pelos envolvidos, de qualquer lugar a qualquer momento, e a partir de dispositivos conectados à plataforma ACC como *desktop*, *laptop*, celulares, *tablets*. A partir da interação direta com os elementos visuais pode-se obter ganhos, pois os participantes podem explorar os dados existentes, padrões, tendências, filtrar informações, obter detalhes de forma rápida e obter *insights* de maneira comparativa e construtiva.

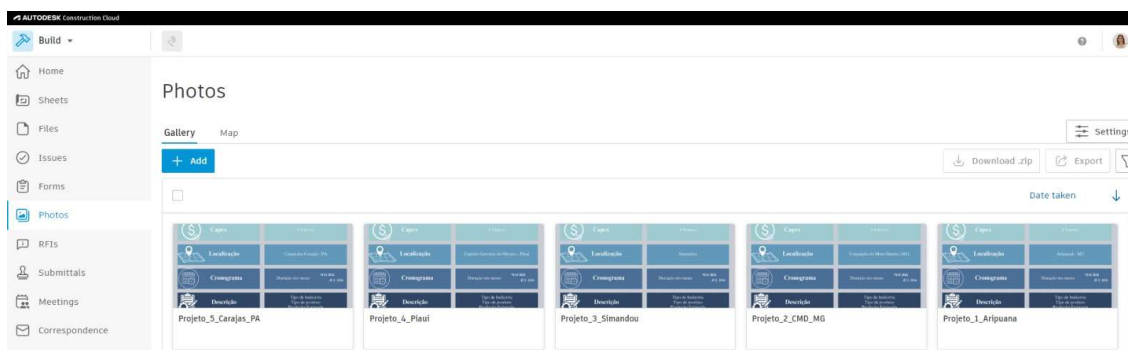
Para que esses dados possam ser localizados no Painel Visual Comparativo e acessados rapidamente de forma organizada (*dashboard*) foram criados *Cards* de identificação com as informações relevantes dos projetos Figura 33. Neles os participantes podem extrair as

informações necessárias para obter uma visão abrangente dos projetos realizados. Os *Cards* criados contém quatro pontos principais: a) o nome do projeto; b) a localização no mapa-múndi; c) o valor do investimento (*CapEx*); e d) o cronograma de construção com o período que ele foi realizado.

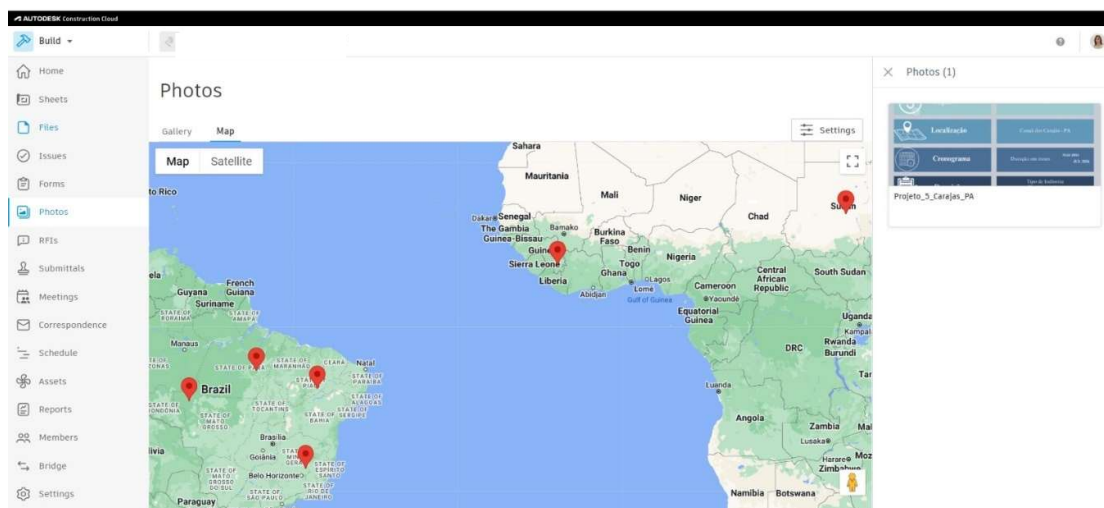
Figura 33: *Card* descritivo utilizado no Painel Visual Comparativo armazenado no ACC

 Capex	\$ Valores
 Localização	Cidade - Estado
 Cronograma	Duração em meses MAI 2024 JUL 2026
 Descrição	Tipo de Indústria Tipo de produto Produção Estimada

Na plataforma *Autodesk ACC* no recurso *Photos* e no módulo *Build* é possível inserir de forma rápida todos os *Cards* dos projetos que forem sendo desenvolvidos e cadastrados no recurso (*Gallery e Maps*). Desse modo, obtém-se uma visualização panorâmica da sua localização conforme mostrado nas indicações da Figura 34. Esses dados poderão ser consultados pelos gestores em qualquer tempo e de qualquer lugar, sendo uma ferramenta importante pois permitirá uma checagem rápida dos conteúdos e do *status* de aprovação de cada projeto e compará-los com os diferentes estudos de FEL já desenvolvidos. Quanto maior o número de *Cards* inseridos (informações cadastradas no banco de dados) maior o universo de possibilidade de análises e mais embasadas serão as tomadas de decisões dos gestores. Dessa forma, o Painel Visual Comparativo torna-se relevante visto que a cada novo estudo de viabilidade (FEL1) ele poderá ser atualizado e sincronizado com a nuvem ACC para apoiar os gestores em futuros projetos. De acordo com Romero e Andery (2016) 75% dos projetos elaborados no FEL 1 não passam para a fase do Design. Dessa forma, quanto maior for o número de informações inseridas no Painel Visual Comparativo, melhores serão os parâmetros de comparação e melhores as chances de obter tomadas de decisão mais assertividade para o projeto seguir para etapa seguinte.

Figura 34: Inserção dos *Cards* no módulo *Photos* da plataforma ACC

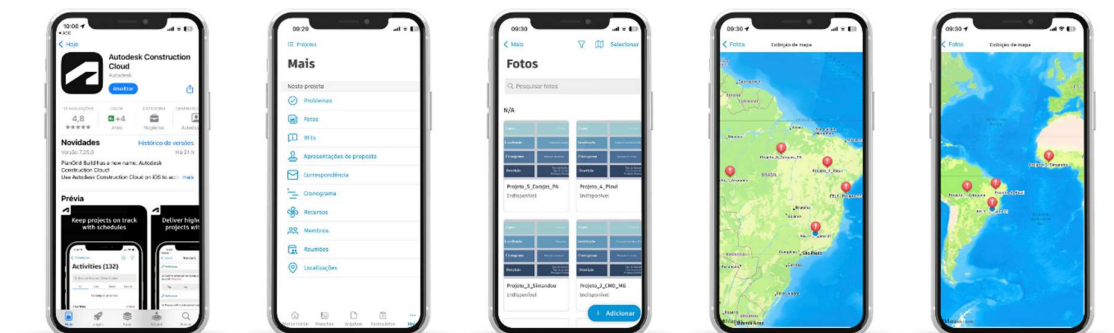
Antes da inserção dos dados na plataforma ACC os *Cards* recebem atributos de georreferenciamento que são as coordenadas de latitude e longitude referentes à localização do projeto no mapa mundial. A partir das coordenadas eles ficarão disponibilizados na aba *Maps* e ao ser solicitado para consulta (pelos gestores), os *Cards* são automaticamente posicionados na real localização no mapa-mundial (Figura 35). Estes dados podem ser visualizados e acessados ao clicar nos pontos com sua localização (no mapa) e do lado direito da tela do ACC serão mostradas as informações básicas contidas nos *Cards* referentes a localização desejada. Dessa forma, o banco de dados permitirá uma análise comparativa em nível macro de todos os projetos desenvolvidos anteriormente.

Figura 35: Painel Visual com a localização dos *Cards* no mapa-múndi

A partir desses registros e conforme o projeto for avançando nos portões de aprovações *Gates* 1, 2, e 3 das Etapas do FEL, é possível cadastrar no ACC os dados referentes a essas fases. Dessa forma, todas as tomadas de decisão realizadas pelos gerentes ao longo do ciclo de vida do empreendimento, são registradas para acesso rápido de todos os envolvidos a partir do Painel Visual Comparativo, que podem ser acessadas em telas de diferentes dispositivos móveis. Para

que isso ocorra *Apple Store* e *Google Play* possuem um aplicativo do ACC (Figura 36) que permite ao usuário acesso a plataforma por meio de celulares, *tablets*, ou outro dispositivo de forma simples, rápida e prática em qualquer lugar e a qualquer momento.

Figura 36: Acesso ao Painel Visual Comparativo via aplicativo ACC



Um ponto relevante do Painel Visual Comparativo é a possibilidade de reformulação dos *Cards* sempre que for necessário com novas informações para serem incorporadas ao banco de dados à medida que forem feitas novas validações pelos usuários. O módulo *Docs* do ACC permite ainda a visualizar a documentação técnica do projeto, plantas 2D, modelos 3D e outros tipos de documentos de forma nativa, isso significa que os documentos poderão ser acessados mesmo que o usuário não tenha licenças às ferramentas específicas de modelagem e design. Esse recurso possibilita maior facilidade na comunicação entre as equipes de projeto e os *stakeholders*, sendo suporte à espaço de consulta visual nos portões de aprovação.

4.2.2 Fase de Design

A fase de design foi estruturada para auxiliar na tomada de decisão dos gestores e compreende o Projeto Conceitual (Etapa do FEL 2), Projeto Básico (Etapa do FEL 3) e Projeto Detalhado. O *Canvas* foi utilizado para definir o Perfil do Cliente contendo as experiências negativas percebidas, as tarefas realizadas e os resultados a serem alcançadas (*Pains-Jobs-Gains*). A partir dos questionamentos (o que fazer? para quem fazer? como fazer? quanto ganhar? quanto vai custar?) foi definida a Proposta de Valor (Tabela 6) que corresponde a sessões de *Design Review* com Realidade Virtual (RV) imersiva e multiusuário no modelo BIM federado. Aliado a RV surge uma nova e natural interface entre homem-máquina, trazendo oportunidades para integrar as operações industriais (YIN *et al.*, 2023). Nessas sessões as disciplinas e partes interessadas (mecânica, arquitetura, infraestrutura, estruturas, elétrica, tubulação, dentre outras) podem comentar um modelo global e abrangente com as estratégias para alcançar os resultados

desejados. Essa integração de dados contribui para uma gestão eficiente e sustentável das construções industriais.

Tabela 6: Resultado do *Canvas* para Etapa 2 Design do Empreendimento

Perguntas chaves	Proposta de valor
O que eu vou fazer?	Sessões de <i>Design Review</i> em Realidade Virtual imersiva e multiusuário no modelo BIM federado.
Para quem vou fazer?	Gestores responsáveis pela aprovação nos Portões ou <i>Gates 2 e 3</i> ;
Como vou fazer?	Adotar a metodologia BIM, conforme Plano de Execução, utilizar as ferramentas <i>Autodesk (Plant 3D, Civil 3D, Revit, Navis)</i> e o ACC para compartilhar informações.
Quanto vou ganhar?	Melhor eficiência na comunicação entre equipes e melhor qualidade técnica dos projetos, maior segurança, redução de retrabalhos, de custos e prazos.
Quanto vai custar?	Valores relativos à aquisição de licenças dos <i>softwares</i> e treinamento de equipes.

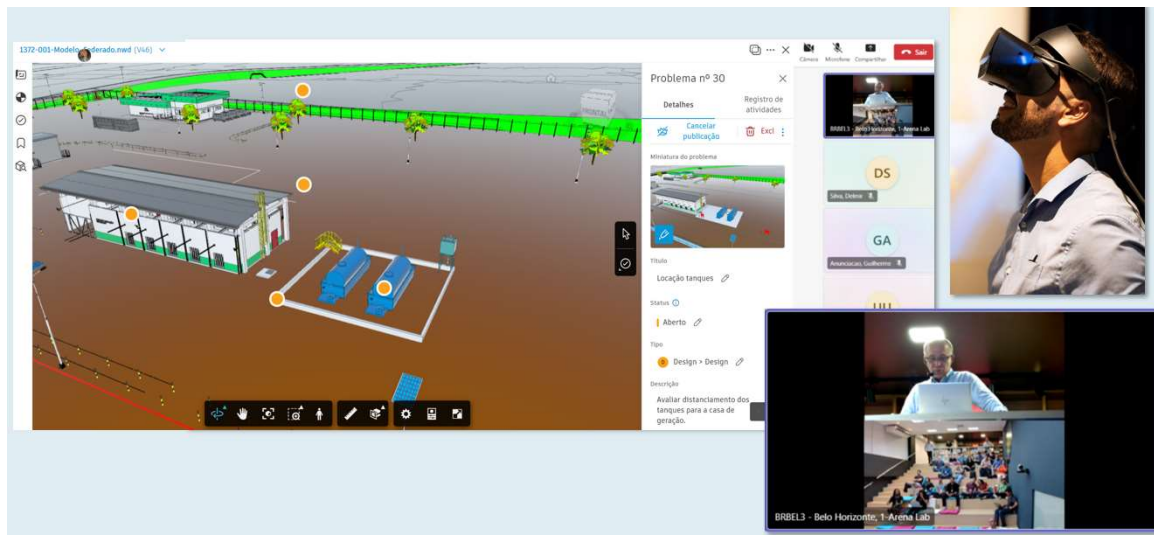
A sessão de *Design Review* é um processo importante na fase de design de um Projeto de Capital uma vez que aborda questões técnicas, estéticas, funcionais, prazos, custos e ainda identifica problemas potenciais ou pontos de melhoria no projeto. Com base nas reuniões de *Design Review* foram traçados os objetivos para avaliar e aprovar a qualidade dos *layouts*, foram identificados os problemas, as deficiências, os ajustes de interferências (*clash detection*), as análises de construtibilidade¹¹, manutenibilidade¹² e eficiência, dentre outros critérios relevantes. Nesses encontros foram levantados *feedbacks* das equipes multidisciplinares quanto aos parâmetros de projeto e a adequação das premissas ao escopo assegurando que o projeto estivesse dentro dos requisitos desejáveis e atendesse as regulamentações governamentais, as normas da indústria. As sessões de *Design Review*, conforme apresentado na Figura 37 proporcionaram subsídios para que os membros das equipes discutissem o projeto promovendo

¹¹ Construtibilidade pode ser definida como um conjunto de serviços especializados voltados para o planejamento, detalhamento e execução eficiente de projetos de construção. Fonte: <https://phdengenharia.eng.br/solucoes/construtibilidade/>

¹² Manutenibilidade “a capacidade de um item ser mantido ou recolocado em condições de executar suas funções requeridas, sob condições de uso especificadas, quando a manutenção é executada sob condições determinadas e mediante procedimentos e meios prescritos.” Fonte <https://tractian.com/blog/mantenabilidade-ou-manutenibilidade-o-que-e> ABNT/NBR 5462/1994.

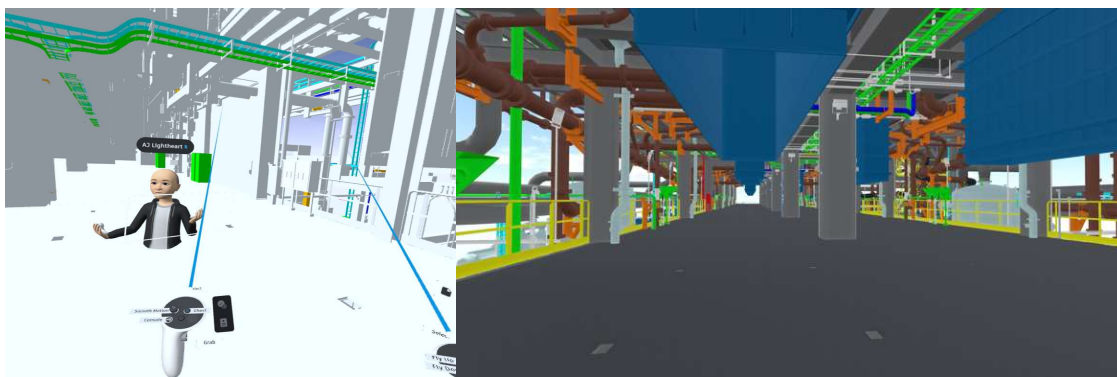
o entendimento mútuo e a colaboração, antes de seguir para fases mais avançadas onde as correções são normalmente mais demoradas e dispendiosas.

Figura 37: Sessão de *Design Review* presencial entre equipes multidisciplinares



Devido à relevância das sessões de *Design Review* no desenvolvimento do Projeto de Capital foi proposto a utilização de Realidade Virtual imersiva, por meio do *Workshop XR* da *Autodesk*, que é um recurso direcionado para revisar e discutir projetos nos modelos BIM previamente elaborados em *softwares* de mercado. O *Workshop XR* conectado à plataforma ACC (em uma versão beta¹³) permitiu que os participantes visualizassem simultaneamente e interagissem com o modelo BIM de uma maneira mais realista em um ambiente totalmente digital o que não ocorria em sessões de *Design Review* tradicionais. Além disso, as sessões de *Design Review* em Realidade Virtual trouxeram vantagens em relação às representações realizadas em telas convencionais, como por exemplo, a visualização dos participantes como avatares dentro do modelo. Para tanto, foram utilizados óculos ou *headsets* para imersão nos ambientes virtuais proporcionando a comunicação e interface entre eles. Isso proporcionou não somente uma visualização mais detalhada e realista dos modelos como a possibilidade de simulações em atividades de operação e manutenção das instalações conforme mostrado na Figura 38.

¹³ A versão beta de um software é a versão em estágio ainda de desenvolvimento, mas que é considerada aceitável para ser lançada para o público.

Figura 38: Interação imersiva no *Autodesk Workshop XR*

A Realidade Virtual foi utilizada para recriar a visão, os sons e, em alguns casos, até mesmo o tato em um ambiente virtual. Isso é alcançado por meio de tecnologias como rastreamento de movimento, gráficos avançados, áudio espacial e, em alguns casos, dispositivos de *feedback* tátil. Os usuários puderam interagir com o ambiente virtual de maneira imersiva, explorando o arranjo geral das instalações, verificando a interface entre estruturas, equipamentos e demais elementos. Foram analisados aspectos relacionados à ergonomia, como os acessos para operação e manutenção, além de avaliados os itens de segurança, conforme padrões e normas regulamentares. A partir de visualizações imersivas as equipes puderam socializar nos ambientes virtuais e solucionar problemas que muitas vezes seriam detectados somente após o início das obras.

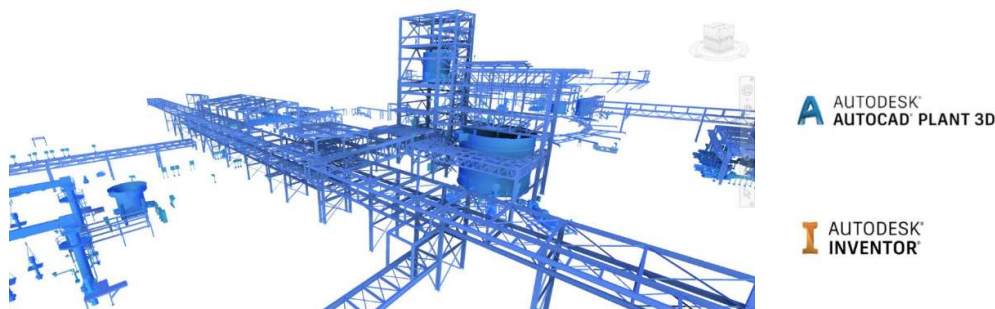
Outro aspecto revelante foi a colaboração remota, uma vez que a realidade virtual permitiu que equipes distribuídas geograficamente se conectassem em um mesmo ambiente virtual compartilhado. Todos os participantes das equipes puderam discutir e revisar os projetos em tempo real, mesmo que estivessem localizados em diferentes partes do mundo. Isso possibilitou explorar detalhes e realizar simulações e testar diferentes cenários.

Outra vantagem da Realidade Virtual foi que os participantes puderam perceber a proporção real dos objetos de maneira precisa, sendo particularmente importante em projetos complexos em que disciplinas como arquitetura, elétrica, instrumentação e tubulação muitas vezes ocupam espaços compartilhados ou muito próximos. Durante as sessões de *Design Review* os participantes forneceram *feedbacks* imediatos uns com os outros sobre elementos específicos, foram criadas anotações e comentários no próprio modelo (*Issues* - Problemas), para direcionar as ações de resolução para um responsável, indicando um prazo para a solução, entre outros recursos que a plataforma ACC permitiu ao se integrar com o *Workshop XR*. Dessa forma, a imersão nos ambientes virtuais auxiliou não somente na identificação de problemas de projeto

que não são evidentes em outros tipos de representações, como também agilizou o processo de tomada de decisões e soluções de pendências. Ao final de cada sessão de *Design Review* obtiveram-se os resultados das análises e as indicações dos pontos para adequação e isso permitiu que as correções e ajustes ocorressem antes que o projeto evoluísse para fases mais avançadas. De toda forma, as sessões de *Design Review* ocorreram de forma planejada e coordenada ao longo do desenvolvimento do projeto.

A Figura 39 mostra a fase inicial de uma planta industrial na plataforma ACC, onde o modelo da disciplina de mecânica apresenta o *layout* das edificações no *software AutoCAD Plant 3D* com o modelamento estimado (pré-dimensionado) das estruturas metálicas e inseridos os equipamentos modelados no *Autodesk Inventor* ou em *softwares* similares.

Figura 39: Modelo BIM preliminar das estruturas e equipamentos

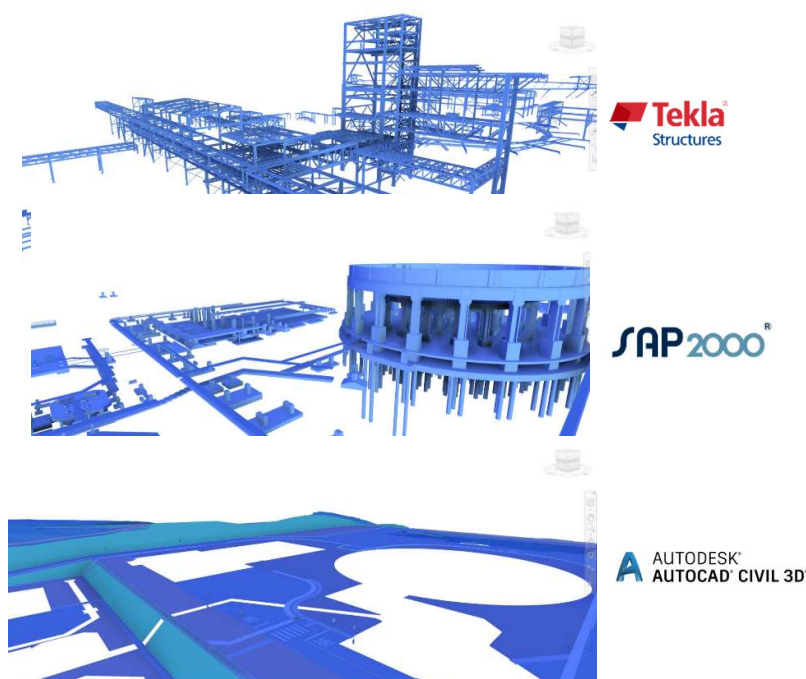


O *layout* permitiu uma visão geral do tamanho e da capacidade resistente dos componentes estruturais, antes de realizar cálculos detalhados o que auxilia nas fases iniciais do projeto. Para tanto, considera-se fatores como carga, materiais a serem utilizados, condições ambientais e outros parâmetros relevantes. Utilizam-se métodos simplificados e fórmulas empíricas para chegar a estimativas das dimensões e capacidades necessárias (pré-dimensionamento). Isso permite avaliar a viabilidade do arranjo e fornece as diretrizes para as etapas subsequentes. É importante destacar que os projetos geralmente passam por fases de refinamento e análises mais detalhadas à medida que novas informações são disponibilizadas e o projeto evolui. Com base na aprovação do plano de carga preliminar foi realizada a primeira sessão de *Design Review*.

Seguindo no desenvolvimento do modelo BIM federado após o atendimento dos comentários provenientes do *Design Review*, os planos de cargas atualizados foram enviados para as disciplinas de estruturas de concreto e metálica para o desenvolvimento dos projetos estruturais nos *softwares SAP 2000* e *Tekla*. O modelamento do projeto detalhado possui mais informações do que as contidas no projeto básico, incluindo as furações das placas de base, os chumbadores

de fixação, os *inserts* metálicos, as chapas de desgaste entre outros. O modelo contém as informações e dimensões necessárias para a análise das interfaces multidisciplinares para a análise ergonômica de validação das atividades de operação e manutenção das instalações. A aplicação de cores nas estruturas, equipamentos e demais elementos dos modelos BIM pode melhorar a visualização das instalações pelas equipes que realizarão as análises críticas do projeto e podem auxiliar no alinhamento dos limites de fornecimento. Nessa etapa a infraestrutura iniciou as atividades no *software* Civil 3D para definição dos principais platôs, elevações e planos de corte e aterro Figura 40.

Figura 40: Modelo BIM das estruturas metálicas, concreto



Após as retroalimentações¹⁴ de estrutura metálica, concreto e infraestrutura, as disciplinas de elétrica, tubulação, instrumentação e comunicação iniciaram a modelagem dos itens principais que fazem interface com as estruturas das instalações, assim como os detalhes, para que o conceito do projeto fosse novamente aprovado em uma segunda reunião de *Design Review*.

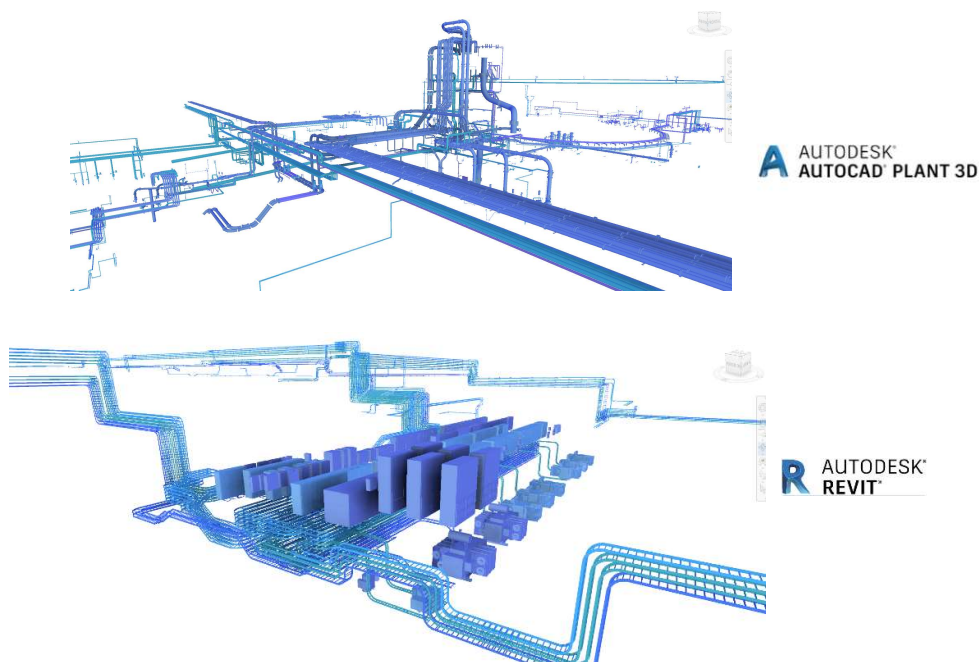
Nesse momento foi indispensável a análise crítica do cliente e das partes interessadas, pois os ajustes e alterações ainda são pertinentes. Após o atendimento dos comentários da sessão de *Design Review* a engenharia detalhada pôde avançar e as modificações conceituais (que por

¹⁴ A retroalimentação pode ser considerada como um processo de retorno dos resultados de uma etapa para inserção de arquivos externos a plataforma de Plant Design e consolidação do modelo federado.

ventura viessem a ocorrer) certamente demandariam esforço elevado com impactos nos custos e prazos.

Importante ressaltar que os documentos e modelos de fornecedores também foram validados e liberados para que as disciplinas pudessem seguir com suas modelagens considerando os detalhes como chumbadores, *grouts*, aberturas no concreto, inclinações de pisos, *inserts* metálicos, furos em placas de base, furações em vigas para fixação de equipamentos, todas as linhas de tubulação, válvulas, instrumentos *in-line*, bocais inteligentes, bandejamentos secundários, eletrodutos de força, controle e iluminação, luminárias prediais, luminárias de emergência, equipamentos do fornecedor, painéis de controle, painéis de instrumentos, instrumentos, câmeras de TV, controle de acesso, entre outros conforme Figura 41.

Figura 41: Modelo BIM das estrutura tubulação e elétrica



Ao final das modelagens pelas disciplinas, o BIM federado retroalimentado ao longo dessa etapa, ficou pronto para a realização da consolidação interdisciplinar em mais uma sessão de *Design Review*. Para detecção de interferências foi utilizada a ferramenta de *clash detective* com análise crítica dos modelos e a coordenação do projeto definiu as ações de correção para cada disciplina. Tal processo melhorou a coordenação do projeto, reduziu conflitos e facilitou as tomadas de decisões durante todas as fases de projeto (Conceitual, Básico e Detalhado). O modelo BIM federado finalizado foi apresentado e aprovado pelo cliente e as disciplinas iniciaram a extração dos desenhos e documentos nas plataformas dos próprios *softwares*.

Dessa forma, para se alcançar o modelo BIM federado consolidado de uma planta industrial, conforme apresentado na Figura 42 uma sequência lógica de ações interdependentes foi articulada entre as disciplinas de tal forma que cada uma recebesse as informações para o início das suas atividades. A plataforma ACC permitiu que as informações necessárias, o modelo BIM federado e os entregáveis do projeto estivessem disponibilizados nos módulos *Docs* e *Design Collaboration* ao longo de toda a etapa de desenvolvimento.

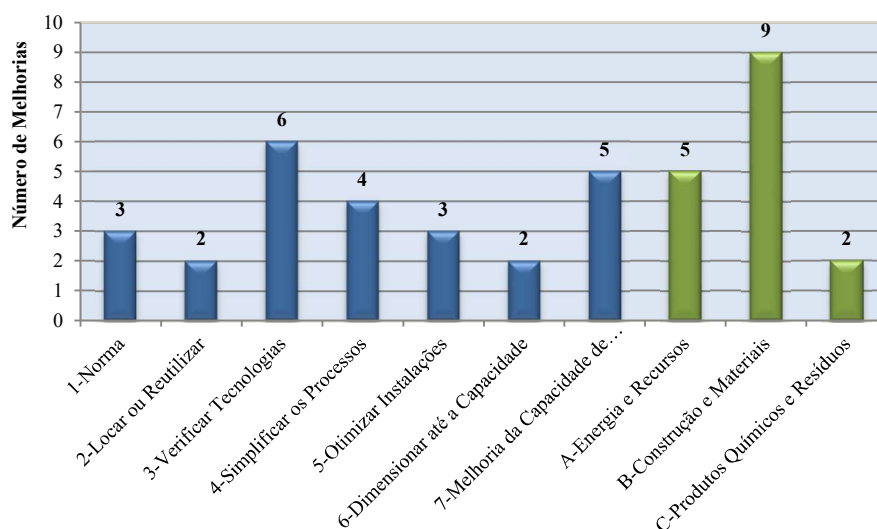
Figura 42: Modelo BIM federado disponibilizado na nuvem da Autodesk ACC



Em resumo um plano de execução BIM com os critérios e padrões adotados para a construção do modelo federado assim como os requisitos de modelagem das informações para cada disciplina foi estabelecido no início da Fase de Design e seguido para que ao final atendessem aos requisitos não somente da fase projetual como também às fases subsequentes de construção e operação.

Para garantir que o Projeto de Capital atendessem aos requisitos e padrões estabelecidos foram aplicadas Práticas de Melhoria do Valor (VIP) e mostra número de ações propostas para a melhorias das instalações para serem aplicadas no desenvolvimento do projeto básico, incluindo as alternativas de gestão ambiental, conforme Figura 43.

Figura 43: Classificação das ações de melhoria (VIP) e Categorias Verdes



4.2.3 Fase de Construção

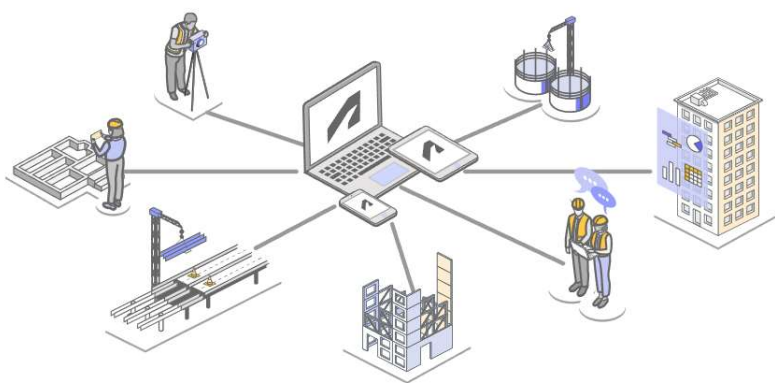
A Fase de construção foi concebida para auxiliar os gestores a aplicar o *framework-DT* em Projeto de Capital nessa fase. O *Canvas* foi utilizado para definir o Perfil do Cliente (gestores das áreas da construção, qualidade e segurança) foram avaliadas as experiências negativas (*Pains*) nas diferentes tarefas (*Jobs*) e levantados quais os resultados positivos deveriam ser alcançados para que mudanças (*Gains*) fossem concretizadas. A partir daí obteve-se uma relação de estratégias para auxiliar os gestores a lidar com as dores percebidas e alcançar os resultados desejados conforme mostrado na Tabela 7.

Tabela 7: Resultado do *Canvas* para Etapa 3 Construção do Empreendimento

Perguntas chaves	Proposta de valor
O que eu vou fazer?	Adotar uma plataforma em nuvem (espaço virtual) para integrar fluxos de trabalho e capturar informações em tempo real via aplicativos móveis (IoT) nas diversas etapas da construção.
Para quem vou fazer?	Gestores responsáveis pela Construção;
Como vou fazer?	Adotar a metodologia BIM e utilizar os módulos <i>Docs, Build, Cost Management e Insight</i> do ACC para compartilhar informações e fluxos de trabalho.
Quanto vou ganhar?	Melhor eficiência na comunicação entre equipes e melhor qualidade técnica da construção, maior segurança, redução de retrabalhos, de custos e prazos.
Quanto vai custar?	Valores relativos à aquisição de licenças dos <i>softwares</i> e treinamento de equipes.

De posse desses indicadores foi montada a Proposta de Valor da Fase 3 que consistiu em adotar um ambiente virtual, em nuvem, com base no modelo 3D BIM e dados inteligentes que associados pudessem refletir o avanço físico e financeiro do processo de construção, por meio de aquisição de dados por aplicativos móveis (IoT). A plataforma ACC tem um papel importante na fase de construção. Ela garantiu a integração das informações entre engenharia, construção, gerenciamento e montagem, com a tramitação dos documentos em um único ambiente o que favoreceu a colaboração e coordenação das equipes e dos fluxos de trabalho (Figura 44).

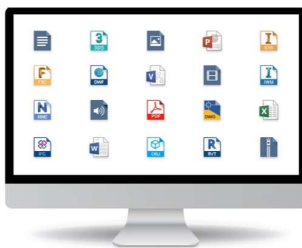
Figura 44: Coordenação entre equipes pelo ACC



Fonte: Autodesk (2024)

O módulo *Docs* permitiu o acesso a toda documentação de projeto em campo, a partir de qualquer dispositivo conectado à internet (Figura 45). Todos os documentos do projeto disponibilizados na ferramenta como plantas 2D, modelos 3D, vídeos, relatórios, cronogramas, nuvem de pontos em suas diversas extensões (.doc, .xls, .pdf, .dwg, nwd, .ifc, etc.) foram visualizados de forma nativa sem a necessidade de instalação de *softwares* como *Word*, *Excel*, *Adobe*, *Navisworks*, *Recap*, Civil 3D e Primavera P6, o que contribuiu para a disseminação da informação de forma abrangente reduzindo os silos (barreiras) de informações.

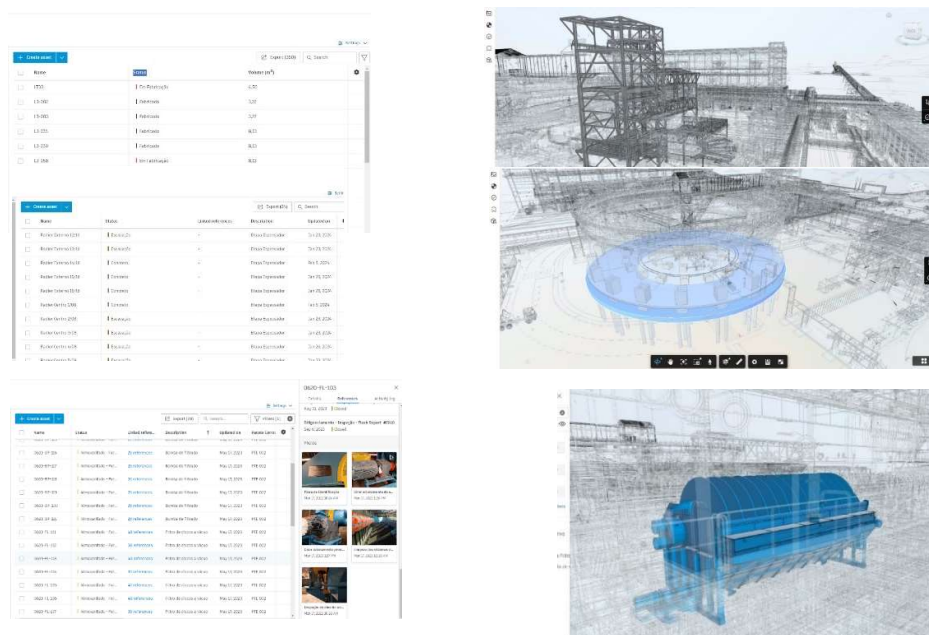
Figura 45: Módulo *Docs* - Documentação de projeto



Fonte: Autodesk (2024)

O gerenciamento das estruturas, equipamentos mecânicos, elétricos e instrumentos (os recursos) desde a fase de especificações até o comissionamento ocorreu na plataforma do ACC na guia *Assets* disponível no módulo *Build* (Figura 46). Com ele as equipes de diligenciamento e inspeção mantiveram atualizados os registros do processo de fabricação desde as suas fases iniciais com fotos, vídeos, *status* (customizáveis), criação de formulários, *checklists*, listas, registro de problemas, não conformidades entre outros aspectos relacionados ao fornecimento e entrega.

Figura 46: Módulo *Build* (Guia *Assets*)



Dessa forma, foi possível que todas as equipes do projeto, ao acessar a plataforma ACC, acompanhassem em tempo real, os avanços e a atualização das informações. A guia *Assets* também foi utilizada para o acompanhamento da execução de estruturas em concreto armado, montagem de pré-moldados e estruturas metálicas.

A utilização do aplicativo móvel em *tablets* e celulares Figura 47 permitiu que as equipes de gerenciamento da construção e de diligenciamento tivessem mais autonomia para criarem relatórios diretamente das áreas em construção, nos fornecedores, dentre outros para atualizar a plataforma ACC em tempo real.

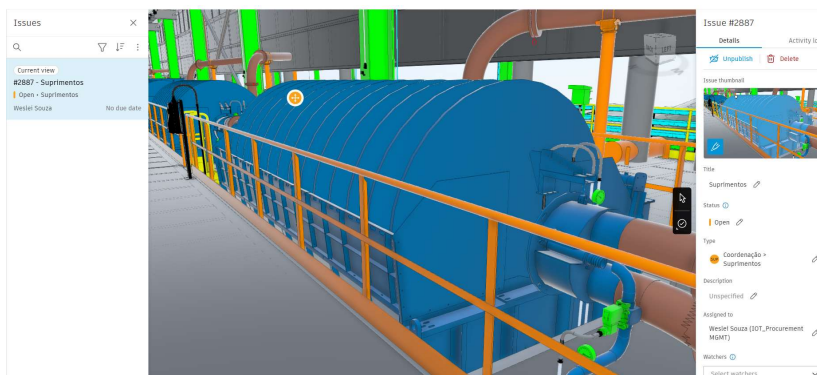
Figura 47: Relatórios realizados no *tablet* no local do fabricante.



Os registros de fotos, vídeos e documentação técnica, assim como *checklists*, problemas, não-conformidades e abertura de formulários para indicações de avanço físico foram inseridos no ACC de maneira simples e rápida. De forma integrada, a guia de *Issues* do módulo *Build*, foi utilizada como um ambiente para notificações de intercorrências que permitiu rastrear, gerenciar e resolver problemas de forma colaborativa durante o ciclo de vida de um projeto. Questões relacionadas à construção, projetos de engenharia, planejamento, suprimentos, qualidade, meio ambiente, contratos entre outras detectadas em qualquer momento da obra foram vinculadas ao modelo BIM federado, detalhadas, enviadas aos responsáveis com data para atendimento.

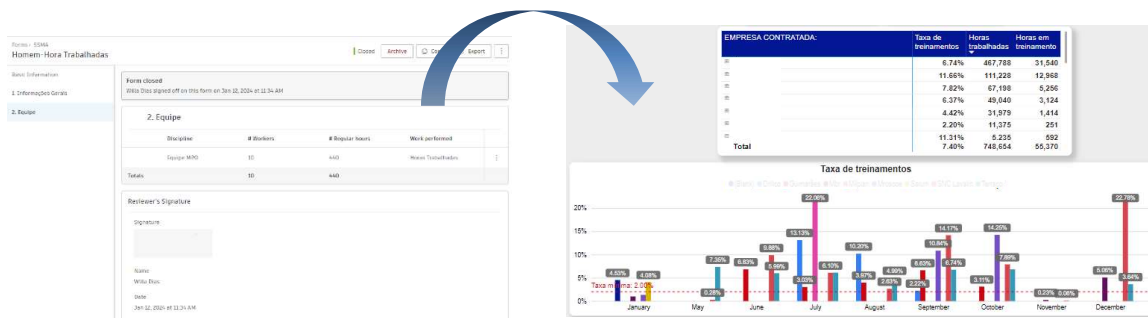
Com o compartilhamento em nuvem das informações os usuários recebiam as notificações, e acessavam suas respectivas tarefas, documentos referentes a elas, podiam alterar o seu *status* de execução, preencher listas de verificações, entre outros, utilizando dispositivos móveis ou o navegador da *web*. Tais recursos melhoram a comunicação, a eficiência e a qualidade dos projetos de construção (Figura 48).

Figura 48: Módulo *Build* (Guia *Issues*) – Mapeamento de problemas



Outra guia do módulo Build utilizada na plataforma ACC na Fase de construção foi de Forms que permitiu às equipes criarem e gerenciarem formulários personalizados para coletar e organizar informações importantes como: diário de atividades, solicitações de mudança, relatórios de inspeção, registros de treinamentos, segurança, entre outros formulários pertinentes para a fase de construção (Figura 49). Com essa funcionalidade, as equipes mantiveram um registro completo das informações essenciais para desenvolver e acompanhar a construção, referenciando localizações, documentos, modelos, problemas, recursos. Os formulários foram criados com o objetivo de coletar informações, em tempo real, à medida que a construção evoluía e os dados obtidos em campo foram integrados ao módulo *Insight* foi possível acompanhamento por meio da criação de *dashboards* gerenciais com indicadores de desempenho (*Key Performance Indicator* - KPI's), com isso as os gestores puderam tomar decisões mais informadas, com maior eficiência e colaboração entre as equipes.

Figura 49: Módulo *Build* (Guia *Forms*) integrado ao Módulo *Insight* (Guia *Dashboards*)



O RFI (*Request For Information*) foi utilizado para conectar as equipes de obra às equipes de projeto de forma rápida e organizada (Figura 50). Para tanto, em uma consulta técnica da engenharia ou em um questionamento técnico de obra foram abertas RFI's para iniciar o fluxo de tramitação de informações que ajudou a resolver problemas e esclarecer dúvidas de maneira oportuna, simplificada e mais ágil. Cada RFI continha o escopo da solicitação, os responsáveis envolvidos, o *status* geral, prazos de resposta e outras métricas importantes. O histórico dos dados coletados foi organizado em relatórios e *dashboards* que permitiram identificar tendências e as áreas que necessitavam de atenção adicional.

Figura 50: Módulo *Build* (Guia *RFI*) – Questionamentos técnicos

RFIs
#453 | Open In review

Submitted carolina costa | Jan 11, 2024 | Forward to Reviewers

In review
Coordinator: Alvaro Manfrin | Due: Jan 14, 2024

Answer Reviewers Answer Coordinator 5

General Information

Question: 1) Conforme debatido nas reuniões, segue no anexo o status final das peças afetadas pela revisão da plataforma de elevação 707.500 do prédio da Filtragem.
Note: Esta consulta técnica cancela e substitui a consulta técnica CTE-DPC-GPF-0-23-1057

Status: Open In review
RFI type: Consulta Técnica de Engenharia
Ball in court: Alvaro Manfrin

Due date: Jan 14, 2024
Location: Unspecified
Location details: Unspecified
Co-reviewers: Unspecified

Cost impact: Unspecified
Schedule impact: Unspecified
Watchers: Unspecified

Additional Information

Priority: Normal
Discipline: Unspecified
Category: Unspecified

External ID: Unspecified
Avaliação Preliminar: Unspecified
Contratada: Unspecified
Data de Devolução: Unspecified
Finalização: Unspecified

References (1)

Add references

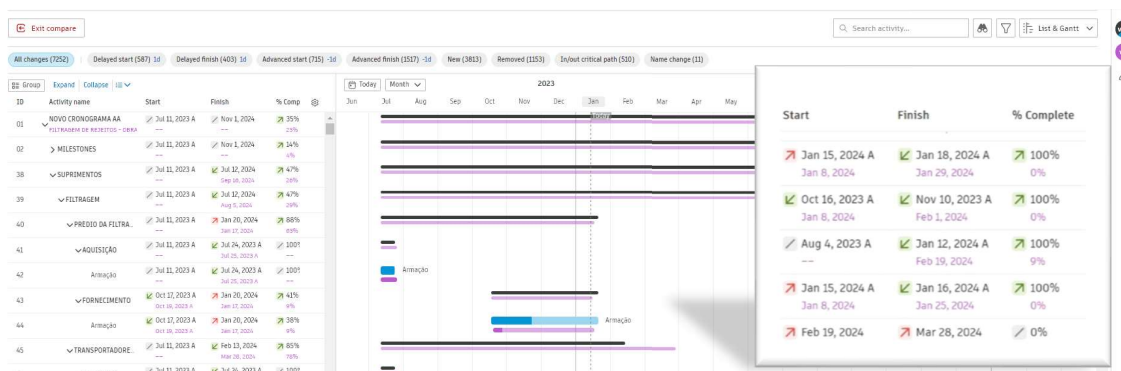
Files: CTE1004.xlsx

Activity log

Add a comment, use '@' to

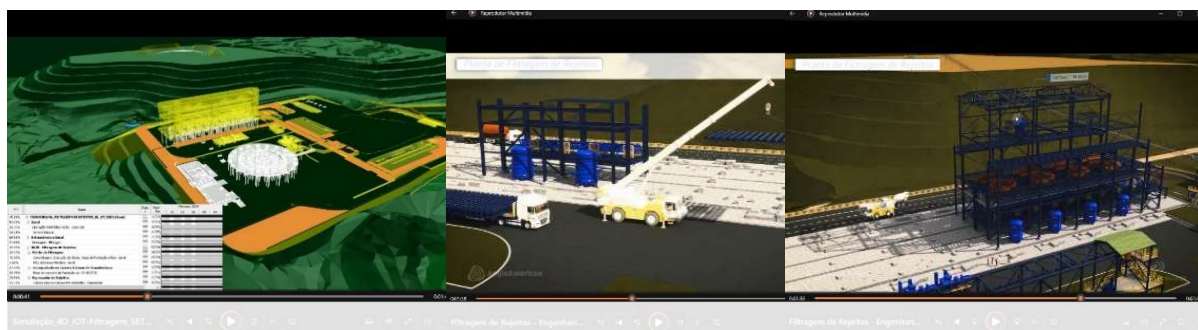
- A file reference was added
CTE1004.xlsx
carolina costa on 1/12/2024 at 5:23 PM
- A reference was removed
The reference has been removed or you don't have permission to view it:
carolina costa on 1/12/2024 at 5:23 PM

Para a visualização e acompanhamento do planejamento de execução da construção e dos cronogramas das empresas subcontratadas de fornecimento de serviços foi adotada a guia Schedule do módulo Build do ACC para a gestão de avanço físico da construção (Figura 51). Dessa forma, as equipes tiveram acesso, em tempo real, a todas as atividades previstas e planejadas para a obra, sejam elas de fornecedores, empreiteiros, dentre outras, em um único repositório de informações. Os cronogramas foram importados diretamente dos *softwares* de planejamento como o Primavera P6 ou *MS Project* (.xer e .mpp). O *Schedule* permitiu ainda que as equipes utilizassem o recurso de comparação entre as diversas versões dos cronogramas identificando aquelas atividades que foram adiantadas (setas verdes) e aquelas que foram postergadas (setas vermelhas) de forma intuitiva.

Figura 51: Módulo *Build* (Guia *Schedule*) Comparação entre versões de cronogramas

Com as informações atualizadas no cronograma master, o modelo BIM 4D foi utilizado para representar como o empreendimento iria evoluir ao longo do tempo pela *timeliner* do *Navisworks* (Figura 52). Estudos de construtibilidade também foram realizados e auxiliaram na escolha da estratégia mais adequada.

Figura 52: BIM 4D *timeliner* *Navisworks* e estudos de construtibilidade



O módulo de *Cost Management* da plataforma ACC foi utilizado para a gestão do *CapEx*, aprovações de mudanças, acompanhamento dos contratos, análises e previsões (Figura 53). Permitiu o controle de alterações dos custos e orçamentos pelas *Change Orders*, coordenação de contratos e de despesas, e ainda a análise das alterações realizadas bem como as devidas aprovações. É um importante recurso na fase de construção que reúne todas as funções citadas acima com o cronograma permitindo tomadas de decisões rápidas e assertivas.

Figura 53:- Módulo *Cost Management* (Guia Budget)

AUTODESK Construction Cloud

Cost Management

Home

Budget

Cost

Change Order

Forecast

Files

Reports

Members

Settings

Account Grouping Filter

<

O *ACC Project Admin* foi a guia da plataforma responsável pela gestão das configurações de contas de usuários, das permissões e níveis de acesso. Com esse recurso cada membro do projeto tinha determinado nível de permissão para visualização, edição das informações e recebia notificações personalizadas.

4.2.4 Fase de Operação e Manutenção

A aplicação do *framework-DT* em Projeto de Capital na fase 4 foi realizada para auxiliar os gestores no início das atividades de operação da planta industrial. O *Canvas* foi utilizado para definir o Perfil do Cliente (gestores das áreas de inspeção e manutenção) e com base nas suas experiências negativas (*Pains*) nas suas tarefas realizadas (*Jobs*) e nas suas expectativas de resultados positivos (*Gains*) foi desenvolvida uma Proposta de Valor (Tabela 8). A partir dos questionamentos (o que fazer? para quem fazer? como fazer? quanto ganhar? quanto vai custar?) foi definida a adoção de um ambiente virtual, em nuvem, com base nos módulos Docs e Build ACC. A intenção foi manter as informações digitais vivas referentes às estruturas, equipamentos mecânicos, elétricos, instrumentos da planta industrial devidamente atualizados com informações dos fabricantes tais como manuais, garantias e certificados.

Tabela 8: Resultado do *Canvas* para Etapa 4 Operação do Empreendimento

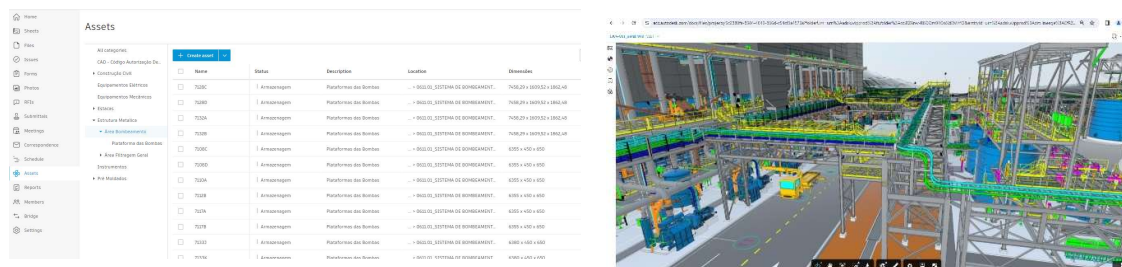
Perguntas chaves	Proposta de valor
O que eu vou fazer?	Adotar uma plataforma em nuvem (espaço virtual) para utilizar os dados de estruturas, equipamentos e instrumentos atualizados da engenharia e da construção.
Para quem vou fazer?	Gestores responsáveis pela Operação;
Como vou fazer?	Utilizar os módulos <i>Docs e Build</i> do ACC.
Quanto vou ganhar?	Melhor eficiência na comunicação entre equipes e melhor qualidade técnica das operações.
Quanto vai custar?	Valores relativos à aquisição de licenças dos <i>softwares</i> e treinamento de equipes.

Existem diversas possibilidades de uso das tecnologias na fase de operação e manutenção, porém torna-se essencial que os projetos, os modelos BIM e as informações digitais estejam atualizadas e compatíveis com as estruturas efetivamente construídas no início das operações. O ambiente de manutenção foi considerado desde o projeto para facilitar as ações de serviço e dessa forma, ao longo do ciclo de vida do empreendimento as modificações realizadas foram armazenadas em um banco de dados em nuvem que proporcionarão maior eficiência na fase de operação do projeto. Pretende-se com essas ações evitar, ou reduzir ao máximo, a necessidade de realização de “*As-Built*” o que normalmente ocorre nos projetos tradicionais.

A estrutura foi concebida com robustez e ductilidade suficientes para que eventuais esforços acidentais, não consideradas no dimensionamento, mas com possibilidade de ocorrência prevista em análise de risco, não causem falha desproporcional à ação causadora. O

monitoramento das estruturas, dos equipamentos mecânicos, elétricos e instrumentos após a fase de comissionamento deverá ocorrer na plataforma do ACC na mesma guia *Assets* disponível no módulo *Build* (Figura 54)

Figura 54: Módulo *Build* (Guia *Assets*) para manutenção de estruturas e equipamentos



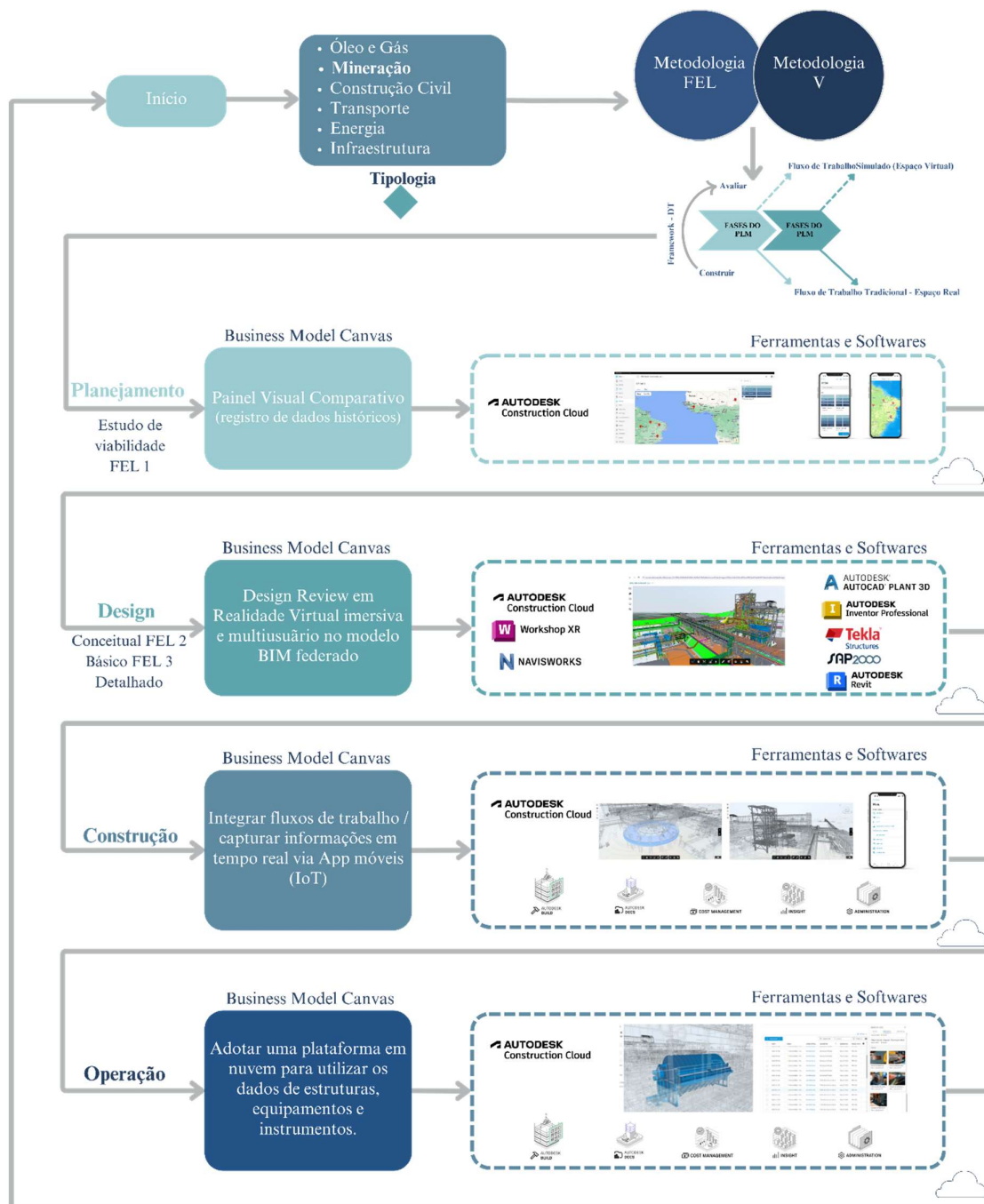
Com ele as equipes de inspeção e manutenção poderão incluir as análises de risco, de incidentes e gestões de mudanças na mesma plataforma. Assim como os registros de avarias, degradações, perigos de incêndio, explosões, condições ambientais anormais, impactos, colisões, registro de problemas, não conformidades entre outros aspectos relacionados ao fornecimento e entrega. Dessa forma, será possível que todas as equipes do projeto, ao acessar a plataforma ACC, acompanhem em tempo real, os avanços e a atualização das informações. Serão definidos também os locais e métodos de controle remoto dos ativos e das regiões de alto risco, o que permitirá a construção de conexões entre o modelo virtual BIM e a estrutura física existente, refletindo no controle do estado real das estruturas e equipamentos. Este monitoramento poderá ser feito por meio de sensores, drones, câmeras, entre outros, ou seja, poderão ser estabelecidas interfaces entre o modelo virtual BIM, as conexões IoT, as funcionalidades dos softwares das plataformas em nuvem e adicionando-se a estas simulações de DT para uma estrutura de campo. Após detectado um defeito será possível ainda determinar qual a sua probabilidade de falha e do processamento de dados serão emitidas ordens de serviço para execução da manutenção em campo.

4.2.5 Fluxograma de aplicação do *framework-DT*

Após percorrido todos os passos e fases anteriores para desenvolver o *framework-DT* para a implementação do *Digital Twins* em Projetos de Capital das estruturas de edificações industriais, a Figura 55 mostra de forma esquemática o fluxograma de aplicação do *framework-DT* no projeto de referência. Conforme visto empregou-se simultaneamente modelos de

negócios (BMC), metodologia FEL e modelo V ao longo do ciclo de vida. A plataforma em nuvem ACC viabilizou a integração do BIM e IoT para desenvolver o *framework-DT* para estruturas de edificações industriais.

Figura 55: Fluxograma do *framework-DT*

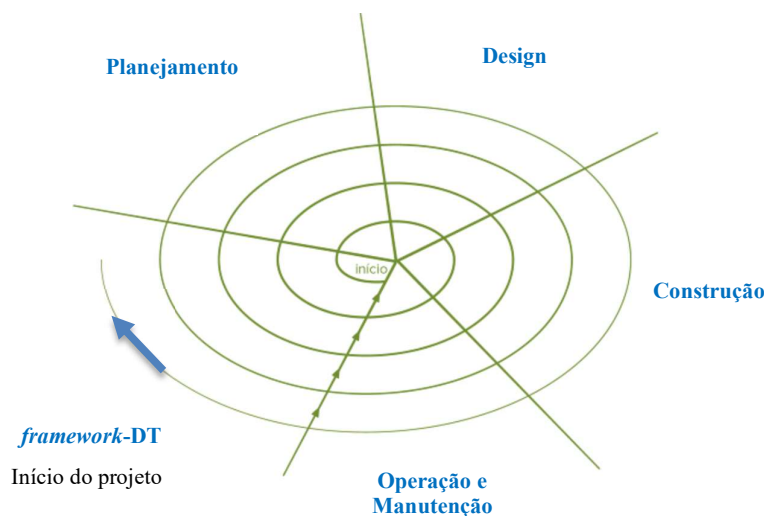


A criação da representação virtual de uma contraparte real física com conexões entre elas, permitiu que simulações e validações analíticas fossem executadas de forma antecipada para controlar, monitorar, otimizar e analisar com precisão estruturas de edificações industriais. Na sequência a Espiral foi usada para validar analiticamente o *framework-DT* ao final de cada fase de implementação avaliando quais os benefícios alcançados em relação aos métodos tradicionais.

4.3 Passo 3 – Validar o *framework-DT* em Projeto de Capital

Para garantir que versões cada vez mais refinadas do *framework-DT* sejam implementadas, foram realizadas validações analíticas a partir de um circuito em torno da espiral, que inicia na linha mais próxima ao centro da espiral, conforme exemplificado na Figura 56. Em cada volta completa na espiral, foram recebidos *feedbacks* dos usuários em relação a avaliação e desempenho de cada Proposta de Valor implementada.

Figura 56: Modelo espiral de validação



Fonte: Adaptado de Pressman, 2021.

Os pontos positivos e os pontos negativos detectados em cada fase deverão resultar em ajustes na aplicação do *framework-DT* nos próximos projetos. Além disso, no processo evolutivo devem ser consideradas mudanças nas ferramentas (novas versões) e no lançamento de novas tecnologias. Ressalta-se aqui que as aplicações em *framework-DT* não se limitam às apresentadas nessa pesquisa e considera-se que existam diferentes possibilidades e que elas irão

variar de acordo com o segmento e os problemas enfrentados em cada Projeto de Capital. Devem ser considerados ainda novos fornecedores, assim como ao longo do ciclo de vida do empreendimento podem surgir novos problemas e novas necessidades. Moldar o futuro em um ambiente virtual no qual todos possam criar juntos de qualquer lugar estratégico do planeta torna-se essencial.

4.4 Considerações Finais

A implementação do *framework-DT* proposto nas quatro fases (planejamento, design, construção, operação e manutenção) no contexto industrial para estruturas de edificações industriais se mostrou aderente. A metodologia FEL possibilitou um melhor alinhamento interno nas entregas, com análises antecipadas de lacunas na elaboração do projeto, para atender as necessidades reais dos profissionais que atuam em PC, sejam eles engenheiros, arquitetos, projetistas, técnicos, gerentes, analistas, empreiteiros ou qualquer parte interessada. A partir do modelo em V foi possível potencializar o uso do BIM ao permitir que a entidade física, conectada ao seu modelo virtual equivalente, trocasse informações em ambas as direções como um DT. Foi importante integrar o *Canvas* ao *framework* para que o DT nascesse como resultado de uma Proposta de Valor alinhado aos objetivos do negócio dentro de um contexto sustentável.

A criação do Painel Visual Comparativo entre estudos bem-sucedidos auxiliou os gestores na aprovação dos projetos nos portões FEL. Os processos decisórios que muitas vezes ocorrem de forma intuitiva, passou a contar com um maior número de informações organizadas e disponibilizadas na nuvem, com acesso por dispositivos móveis com baixo investimento financeiro.

O uso das sessões de *Design Review* em realidade virtual imersiva e multiusuário no modelo BIM federado, trouxe vantagens em relação às representações realizadas em telas convencionais. Tal fato favoreceu a socialização nos ambientes virtuais para solucionar problemas que seriam detectados somente após o início das obras. As equipes distribuídas geograficamente puderam se conectar em um mesmo ambiente virtual e os comentários foram realizados no próprio modelo BIM federado pela criação de *Issues*. As ações de resolução dos problemas foram direcionadas para um responsável, indicando um prazo para a solução.

A adoção de uma plataforma em nuvem para integrar os fluxos de trabalho e capturar informações em tempo real via aplicativos móveis (IoT), nas diversas etapas da construção,

auxiliou nos quatro pilares básicos da construção: segurança, qualidade, cronograma e custos. Os *workflows* de trabalho digitais customizados proporcionaram eficiência e produtividade nas atividades rotineiras. Os tempos de respostas foram reduzidos e aumentou a segurança e rastreabilidade dos registros.

As inspeções de diligenciamento em fornecedores foram inseridas na plataforma em nuvem via aplicativos móveis no próprio local de fabricação e as informações foram registradas durante todo processo. O uso da plataforma pelas equipes de controle de custos permitiu uma análise detalhada e unificada para acompanhamento do *CapEx* por uma estrutura segmentada. As alterações no orçamento foram registradas à medida que o projeto evoluía com as previsões e fluxo de caixa em tempo real.

As empresas contratadas se integraram à plataforma em nuvem e isso melhorou a forma como os colaboradores acompanhavam e coletavam as informações do dia a dia do gerenciamento da construção. Ferramentas auxiliares como *Power BI* integradas a nuvem, permitiram a criação de *dashboards* para acompanhamento dos principais KPI's (*Key Performance Indicator*) da construção. A manutenção das informações e dos modelos em uma mesma plataforma em nuvem garantiu transparência, maior interoperabilidade e reutilização dos dados que ficaram disponíveis para as fases de operação e manutenção. Considerando que o *framework* é flexível, antes de cada novo empreendimento as equipes devem ser consultadas para mapeamento das suas dores e novas Propostas de Valor devem ser avaliadas e consideradas em um processo de melhoria contínua.

A adoção do *framework-DT* se mostrou como uma oportunidade para controlar, monitorar, antecipar, otimizar e analisar com precisão as estruturas de edificações industriais. A criação da representação virtual de uma contraparte real física com conexões entre elas, permitiu que simulações e validações analíticas fossem executadas de forma antecipada e com isso os requisitos dos fluxos de trabalho tradicional foram inseridos no espaço virtual. A adoção do conceito de DT como um avanço tecnológico em Projetos de Capital refletiu em melhoria na colaboração, qualidade, segurança e produtividade durante todo o ciclo de vida do empreendimento. Percebe-se que a sustentabilidade devidamente integrada aos processos decisórios, pode se tornar um catalisador de ganhos financeiros em longo prazo, com resultados ambientais e sociais positivos a sociedade.

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos na pesquisa “*framework para Digital Twins: integração entre o BIM IoT e plataformas em nuvem para projetos estruturais industriais*” permitem as seguintes conclusões:

- Para o efetivo uso do DT em Projeto de Capital são necessárias ações e interações humanas provenientes da combinação de diferentes tecnologias;
- O conceito de DT se mostrou um avanço tecnológico que pode ser aplicado para gerenciar e melhorar os processos de planejamento, projeto, construção e operação de ativos;
- O DT oferece uma capacidade exclusiva de gerenciar a complexidade de fluxos de dados em tempo real, sobrepostos aos dados estáticos de projeto e engenharia;
- O DT permite aumentar a velocidade, a segurança e a eficiência operacional, além de auxiliar na melhoria dos processos de tomadas de decisões;
- A integração do BMC ao *framework* garantiu que o *Digital Twin* nascesse como resultado de uma Proposta de Valor alinhado aos objetivos do negócio e dentro de um contexto sustentável;
- A metodologia FEL auxiliou no alinhamento interno das entregas, e permitiu análises antecipadas de problemas durante a elaboração do projeto;
- O modelo em V fomentou a virtualização do ambiente real no virtual e a plataforma em nuvem ACC criou um ambiente comum, que utilizou o BIM como uma das muitas fontes de dados na criação do DT, isso permitiu automação de processos de rotina, atualizações de avanços, além de outros acompanhamentos;
- As sessões de *Design Review* no “metaverso” com realidade virtual, imersiva e multiusuário trouxeram vantagens em relação às representações realizadas em telas convencionais;
- As ferramentas auxiliares como *Power BI* integradas ao ACC permitiram a criação de *dashboards* para acompanhamento dos principais indicadores de performance da construção, visualizados em gráficos e tabelas atualizadas em tempo real;
- O uso das metodologias aplicadas possibilitou potencializar o uso do BIM ao permitir que a entidade física conectada ao seu modelo virtual equivalente, trocasse informações em ambas as direções como num *Digital Twin* mantendo o registro e o histórico das informações necessárias para as fases seguintes de operação e de manutenção.

5.1 Propostas para pesquisas futuras

Durante o desenvolvimento da pesquisa, observou-se oportunidades para futuros trabalhos como:

- Realizar estudo similar ao apresentado, em outros Projetos de Capital, em diferentes setores da indústria, ou ainda em empreendimentos situados em outros países;
- Adotar outras plataformas em nuvem e *softwares* de *Plant Design* na implantação do *framework-DT*;
- Pesquisar e adotar sensores avançados para monitorar condições estruturais, ambientais e operacionais associados à plataforma em nuvem;
- Desenvolver algoritmos de *machine learning* para melhorar a precisão e eficiência da planta em operação;
- Integrar a inteligência artificial para análise de dados obtidos pelos sensores na otimização de processos e na predição de problemas;
- Utilizar o histórico de dados armazenado para análises preditivas, com objetivo de antecipar falhas e melhorar a eficiência do empreendimento;
- Adotar modelos de realidade virtual para desenvolver interfaces de treinamentos em áreas de risco, manutenção e suporte remoto;
- Estudar técnicas para garantir a segurança dos dados e comunicações entre sistemas digitais e estratégias de proteção contra ciberataques e acessos não autorizados.

6 REFERENCIAS

ABBASNEJAD, Behzad *et al.* Building Information Modelling (BIM) adoption and implementation enablers in AEC firms: a systematic literature review. *Architectural Engineering and Design Management*, v. 17, n. 5–6, p. 411–433, 2 nov. 2021. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17452007.2020.1793721>>.

ABDI. Processo de projeto BIM: coletânea Guias BIM ABDI-MDIC. *Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial*, v. 1, n. Brasília, 2017.

ABDIRAD, Hamid; DOSSICK, Carrie S. Restructuration of architectural practice in integrated project delivery (IPD): two case studies. *Engineering, Construction and Architectural Management*, v. 26, n. 1, p. 104–117, 18 fev. 2019.

ABNT. NBR ISO 9000/2015 - Sistemas de gestão da qualidade - Fundamentos e vocabulário. 2015.

ABUHUSSAIN, Mohammed Awad *et al.* Integrating Building Information Modeling (BIM) for optimal lifecycle management of complex structures. *Structures*, v. 60, p. 105831, fev. 2024.

AFOLABI, Adedeji *et al.* Assessment of the Linkages and Leakages in a Cloud-Based Computing Collaboration among Construction Stakeholders. 29 mar. 2018, Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 29 mar. 2018. p. 673–683.

AGRAWAL, Ashwin *et al.* Digital Twin: Where do humans fit in? *Automation in Construction*, v. 148, p. 104749, abr. 2023.

AKEN, Joan E. Van. Management Research Based on the Paradigm of the Design Sciences: The Quest for Field-Tested and Grounded Technological Rules. *Journal of Management Studies*, v. 41, n. 2, p. 219–246, 10 mar. 2004.

ALBALKHY, Wassim; SWEIS, Rateb; LAFHAJ, Zoubeir. Barriers to Adopting Lean Construction in the Construction Industry-The Case of Jordan. *Buildings*, v. 11, 23 maio 2021.

ALCÁCER, V.; CRUZ-MACHADO, V. Scanning the Industry 4.0: A Literature Review on Technologies for Manufacturing Systems. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, v. 22, n. 3, p. 899–919, jun. 2019.

ALLISON, Markku *et al.* *Integrated Project Delivery: An Action Guide for Leaders*. [S.l.: s.n.], 2018.

ALMAATOUK, Qusay; BIN OTHMAN, Mohd Shahizan; AL-KHAZRAJI, Ayman. A review on the potential of cloud-based collaboration in construction industry. mar. 2016, [S.l.]: IEEE, mar. 2016. p. 1–5.

ALRESHIDI, Eissa; MOURSHED, Monjur; REZGUI, Yacine. Requirements for cloud-based BIM governance solutions to facilitate team collaboration in construction projects. *Requirements Engineering*, v. 23, n. 1, p. 1–31, 20 mar. 2018.

AL-SAEED, Yahya; EDWARDS, David John; SCAYSBROOK, Stephen. Automating construction manufacturing procedures using BIM digital objects (BDOs). *Construction Innovation*, v. 20, n. 3, p. 345–377, 8 fev. 2020.

AMEL-ZADEH, Amir; SERAFEIM, George. Why and How Investors Use ESG Information: Evidence from a Global Survey. *Financial Analysts Journal*, v. 74, n. 3, p. 87–103, 1 jul. 2018.

ANDERL, Reiner *et al.* Digital twin technology – An approach for Industrie 4.0 vertical and horizontal lifecycle integration. *it - Information Technology*, v. 60, n. 3, p. 125–132, 1 jul. 2018. Disponível em: <<https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/itit-2017-0038/html>>.

ANDERSSON, Svante *et al.* Sustainable development—Direct and indirect effects between economic, social, and environmental dimensions in business practices. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 6 mar. 2022. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/csr.2261>>.

ANGJELIU, Grigor; CORONELLI, Dario; CARDANI, Giuliana. Development of the simulation model for Digital Twin applications in historical masonry buildings: The integration between numerical and experimental reality. *Computers & Structures*, v. 238, p. 106282, out. 2020. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0045794920300857>>.

ANSARI, Fazel; HOLD, Philipp; KHOBREH, Marjan. A knowledge-based approach for representing jobholder profile toward optimal human–machine collaboration in cyber physical production systems. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, v. 28, p. 87–106, jan. 2020. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1755581719300719>>.

ARAM, S.; EASTMAN, C. Integration of PLM Solutions and BIM Systems for the AEC Industry. 11 ago. 2013a, [S.l.: s.n.], 11 ago. 2013.

ARAM, S.; EASTMAN, C. Integration of PLM Solutions and BIM Systems for the AEC Industry. 11 ago. 2013b, [S.l.: s.n.], 11 ago. 2013. Disponível em:

<http://www.iaarc.org/publications/proceedings_of_the_30th_isarc/integration_of_plm_solutions_and_bim_systems_for_the_aec_industry.html>.

ARAUJO, Beatriz Campos; LOPES, Harlenn dos Santos. Gestão Empresarial: Design Science Research e Business Process Management integradas para uma construtora civil. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 16, p. e517111638586, 16 dez. 2022.

ARAÚJO, Davi Lucas Arruda De *et al.* Modelo de Negócio: As Operações de uma Distribuidora de Combustíveis no Complexo Industrial Portuário de Suape/PE. *Future Studies Research Journal: Trends and Strategies*, v. 9, n. 1, p. 25–50, 2 jan. 2017.

ASLAM, Mughees; GAO, Zhili; SMITH, Gary. Integrated implementation of Virtual Design and Construction (VDC) and lean project delivery system (LPDS). *Journal of Building Engineering*, v. 39, p. 102252, jul. 2021.

AWOTAR, Mundita; SUNGKUR, Roopesh Kevin. Optimization of Software Testing. *Procedia Computer Science*, v. 132, p. 1804–1814, 2018.

AWOUDA, Ahmed *et al.* IoT-Based Framework for Digital Twins in the Industry 5.0 Era. *Sensors*, v. 24, n. 2, p. 594, 17 jan. 2024.

AXIS STEEL. *BIM dimensions – 3D, 4D, 5D, 6D, 7D BIM explained*. Disponível em: <<https://axissteel.com/the-dimensions-of-bim-explained>>.

BABAEI, Ata; LOCATELLI, Giorgio; SAINATI, Tristano. What is wrong with the front-end of infrastructure megaprojects and how to fix it: A systematic literature review. *Project Leadership and Society*, v. 2, p. 100032, dez. 2021.

BALLARD, Glenn; HOWELL, Gregory. Implementing Lean Construction: Stabilizing Work Flow. *Proceedings of the 2nd Annual Meeting of the International Group for Lean Construction*, 1 jan. 1994.

BARAZZETTI, Luigi *et al.* HBIM and augmented information: towards a wider user community of image and range-based reconstructions. 2015, [S.l: s.n.], 2015. p. 35–42.

BELLO, Sururah A. *et al.* Cloud computing in construction industry: Use cases, benefits and challenges. *Automation in Construction*, v. 122, p. 103441, fev. 2021.

BERTONI, Alessandro *et al.* Digital Twins of Operational Scenarios in Mining for Design of Customized Product-Service Systems Solutions. *Procedia CIRP*, v. 109, p. 532–537, 2022.

- BHAGWAT, Pranav; SHINDE, Rahul. Clash detection - A new tool in project management. *International Journal of Scientific Research in Science*, v. 2, n. 4, p. 193–197, 2016.
- BIAS. GESTÃO DE CONTEÚDO ECM. 2024. Disponível em: <<https://www.biasdanismanlik.com/EcmIcerikYonetimi>>. Acesso em: 17 fev. 2024.
- BITITCI, Umit; COCCA, Paola; ATES, Aylin. Impact of visual performance management systems on the performance management practices of organisations. *International Journal of Production Research*, v. 54, n. 6, p. 1571–1593, 18 mar. 2016.
- BOCKEN, N.M.P. *et al.* A literature and practice review to develop sustainable business model archetypes. *Journal of Cleaner Production*, v. 65, p. 42–56, fev. 2014.
- BOJE, Calin *et al.* Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research. *Automation in Construction*, v. 114, p. 103179, jun. 2020.
- BOONS, Frank *et al.* Sustainable innovation, business models and economic performance: an overview. *Journal of Cleaner Production*, v. 45, p. 1–8, abr. 2013.
- BOUJAOUDEH KHOURY, Karen. Effective Communication Processes for Building Design, Construction, and Management. *Buildings*, v. 9, n. 5, p. 112, 5 maio 2019.
- BOYES, Hugh *et al.* The industrial internet of things (IIoT): An analysis framework. *Computers in Industry*, v. 101, p. 1–12, out. 2018.
- BRESSANELLI, Gianmarco *et al.* Circular Economy in the Digital Age. *Sustainability*, v. 14, n. 9, p. 5565, 5 maio 2022.
- BRUNET, Maude. On the relevance of theory and practice in project studies. *International Journal of Project Management*, v. 40, n. 1, p. 22–24, jan. 2022.
- BUALLAY, Amina; AL-AJMI, Jasim; BARONE, Elisabetta. Sustainability engagement's impact on tourism sector performance: linear and nonlinear models. *Journal of Organizational Change Management*, 2021.
- CARTON, Guillaume; MOURICOU, Philippe. A quoi sert la recherche en management ? Une analyse systématique de la littérature anglo-saxonne sur le débat rigueur-pertinence (1994-2013). *Management*, v. 20, n. 2, p. 166, 2017.
- CBIC. Fundamentos BIM - Parte 1: Implementação do BIM para Construtoras e Incorporadoras. *Câmara Brasileira da Indústria da Construção*, v. Brasília, 2016a.

CBIC. Fundamentos BIM - Parte 2: Implementação do BIM para Construtoras e Incorporadoras. *Câmara Brasileira da Indústria da Construção*, 2016b.

CHANG, W.; GRADY, N. *NIST Big Data Interoperability Framework*. Gaithersburg, MD: [s.n.], out. 2019.

CHANIAS, Simon; MYERS, Michael D.; HESS, Thomas. Digital transformation strategy making in pre-digital organizations: The case of a financial services provider. *The Journal of Strategic Information Systems*, v. 28, n. 1, p. 17–33, mar. 2019.

CHAVES, I. G. *O Design Centrado no Humano Conectado e Colaborativo*. 2019. 314 f. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

CHEN, Long; WHYTE, Jennifer. Understanding design change propagation in complex engineering systems using a digital twin and design structure matrix. *Engineering, Construction and Architectural Management*, v. 29, n. 8, p. 2950–2975, 16 ago. 2022.

CHEN, Simin; SONG, Yu; GAO, Peng. Environmental, social, and governance (ESG) performance and financial outcomes: Analyzing the impact of ESG on financial performance. *Journal of Environmental Management*, v. 345, p. 118829, nov. 2023.

CHEN, Zhen-Song *et al.* Optimization-based probabilistic decision support for assessing building information modelling (BIM) maturity considering multiple objectives. *Information Fusion*, v. 102, p. 102026, fev. 2024.

CHEN, Ziyue; HUANG, Lizhen. Digital Twin in Circular Economy: Remanufacturing in Construction. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, v. 588, n. 3, p. 032014, 1 nov. 2020.

CHENG, Jack C.P. *et al.* Thermal performance improvement for residential heritage building preservation based on digital twins. *Journal of Building Engineering*, v. 82, p. 108283, abr. 2024.

CHENGER, Denise; WOICESHYN, Jaana. Executives' Decision Processes at the Front End of Major Projects: The Role of Context and Experience in Value Creation. *Project Management Journal*, v. 52, n. 2, p. 176–191, 21 abr. 2021.

CHESBROUGH, Henry. Business Model Innovation: Opportunities and Barriers. *Long Range Planning*, v. 43, n. 2–3, p. 354–363, abr. 2010.

CHUANG, Tzu-Yi; YANG, Min-Jung. Change component identification of BIM models for facility management based on time-variant BIMs or point clouds. *Automation in Construction*, v. 147, p. 104731, mar. 2023.

CIB. International Council for Research and Innovation in Building and Construction. 2020.

CIFE. *Center for Integrated Facility Engineering*. Disponível em: <<https://cife.stanford.edu/>>. Acesso em: 28 jan. 2024.

CIMINO, Chiara; NEGRI, Elisa; FUMAGALLI, Luca. Review of digital twin applications in manufacturing. *Computers in Industry*, v. 113, p. 103130, dez. 2019.

COUPRY, Corentin *et al.* BIM-Based Digital Twin and XR Devices to Improve Maintenance Procedures in Smart Buildings: A Literature Review. *Applied Sciences*, v. 11, n. 15, p. 6810, 24 jul. 2021.

CZERNIAWSKI, Thomas; LEITE, Fernanda. Automated digital modeling of existing buildings: A review of visual object recognition methods. *Automation in Construction*, v. 113, p. 103131, 2020.

DABOUN, Omar; MD YUSOF, Aminah; KHOSO, Ali Raza. Relationship Management in Construction Projects: Systematic Literature Review. *Engineering Management Journal*, v. 35, n. 2, p. 120–143, 3 abr. 2023. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10429247.2022.2041962>>.

DALLASEGA, Patrick; RAUCH, Erwin; LINDER, Christian. Industry 4.0 as an enabler of proximity for construction supply chains: A systematic literature review. *Computers in Industry*, v. 99, p. 205–225, ago. 2018.

DAVE, Bhargav *et al.* A framework for integrating BIM and IoT through open standards. *Automation in Construction*, v. 95, p. 35–45, nov. 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926580517305964>>.

DENG, Min; MENASSA, Carol C.; KAMAT, Vineet R. From BIM to digital twins: a systematic review of the evolution of intelligent building representations in the AEC-FM industry. *Journal of Information Technology in Construction*, v. 26, p. 58–83, 3 fev. 2021. Disponível em: <<https://www.itcon.org/paper/2021/5>>.

DING, Kai; FAN, Liuqun; LIU, Chen. Manufacturing system under I4.0 workshop based on blockchain: Research on architecture, operation mechanism and key technologies. *Computers & Industrial Engineering*, v. 161, p. 107672, nov. 2021.

DRESCH, Aline; LACERDA, Daniel Pacheco; JUNIOR, José Antônio Valle Antunes. *Design science research: método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia*. [S.l.]: Bookman Editora, 2020.

DUQUE-GRISALES, Eduardo; AGUILERA-CARACUEL, Javier. Environmental, Social and Governance (ESG) Scores and Financial Performance of Multilatinas: Moderating Effects of Geographic International Diversification and Financial Slack. *Journal of Business Ethics*, v. 168, n. 2, p. 315–334, 16 jan. 2021.

DURDYEV, Serdar *et al.* Barriers to the use of integrated project delivery (IPD): a quantified model for Malaysia. *Engineering, Construction and Architectural Management*, v. 27, n. 1, p. 186–204, 22 jul. 2019.

EAIDGAH, Youness *et al.* Visual management, performance management and continuous improvement. *International Journal of Lean Six Sigma*, v. 7, n. 2, p. 187–210, 6 jun. 2016.

EASTMAN, C. *et al.* *Manual de BIM: um guia de modelagem da informação da construção para arquitetos, engenheiros, gerentes, construtores e incorporadores*. . Porto Alegre: Bookman: [s.n.], 2014

ENDERS, Martin Robert; HOSSBACH, Nadja. Dimensions of digital twin applications-a literature review. 2019.

ENEYEW, Dagimawi D.; CAPRETZ, Miriam A. M.; BITSUAMLAK, Girma T. Toward Smart-Building Digital Twins: BIM and IoT Data Integration. *IEEE Access*, v. 10, p. 130487–130506, 2022.

ENRÍQUEZ, J.G. *et al.* An approach to characterize and evaluate the quality of Product Lifecycle Management Software Systems. *Computer Standards & Interfaces*, v. 61, p. 77–88, jan. 2019. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0920548917303239>>.

EUROPEAN COMMISSION. Industry 5.0 - Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry. 2021. Disponível em: <https://research-and-innovation.ec.europa.eu/knowledge-publications-tools-and-data/publications/all-publications/industry-50-towards-sustainable-human-centric-and-resilient-european-industry_en>. Acesso em: 26 fev. 2024.

EVANS, Martin; FARRELL, Peter. A strategic framework managing challenges of integrating lean construction and integrated project delivery on construction megaprojects, towards global

integrated delivery transformative initiatives in multinational organisations. *Journal of Engineering Design and Technology*, v. 21, 22 abr. 2022.

EVANS, Steve *et al.* Business Model Innovation for Sustainability: Towards a Unified Perspective for Creation of Sustainable Business Models. *Business Strategy and the Environment*, v. 26, n. 5, p. 597–608, 5 jul. 2017.

EXAME. *Bússola LIVE – Big Data e IA: a força dos algoritmos para os negócios*. Disponível em: <<https://exame.com/bussola/bussola-live-big-data-e-ia-a-forca-dos-algoritmos-para-os-negocios/>>. Acesso em: 24 fev. 2024.

FEFERBAUM, Marina. *Metodologia da Pesquisa em Direito: técnicas e abordagens para elaboração de monografias, dissertações e teses*. 3ª Edição ed. [S.l.]: Saraiva Jur, 2022.

FELICIANO-CESTERO, María M. *et al.* Is digital transformation threatened? A systematic literature review of the factors influencing firms' digital transformation and internationalization. *Journal of Business Research*, v. 157, p. 113546, mar. 2023.

FERREIRA, Ana Paula da Silva Chagas. TCC - Proposta de melhorias para a área de integridade estrutural : um procedimento operacional padrão para a gerência de manutenção e gestão de ativos de uma empresa de mineração. 2021.

FINOCCHIO JUNIOR. *Project Model Canvas*. [S.l.]: Campus, 2013.

FOSSE, Roar; BALLARD, Glenn; FISCHER, Martin. Virtual Design and Construction: Aligning BIM and Lean in Practice. 9 jul. 2017, [S.l: s.n.], 9 jul. 2017. p. 499–506.

FRIEDE, Gunnar; BUSCH, Timo; BASSEN, Alexander. ESG and financial performance: aggregated evidence from more than 2000 empirical studies. *Journal of Sustainable Finance & Investment*, v. 5, n. 4, p. 210–233, 2 out. 2015.

FUJINO, Naoji; OGAWA, Koji; MINOWA, Morihiko. Wireless Network Technologies to Support the Age of IoT. *FUJITSU Sci. Tech. Journal*, v. 52, n. 4, p. 68–76, 2016.

FULLER, Aidan *et al.* Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. *IEEE Access*, v. 8, p. 108952–108971, 2020.

GAO, Shang *et al.* Mapping and Clustering Analysis on Environmental, Social and Governance Field a Bibliometric Analysis Using Scopus. *Sustainability*, v. 13, n. 13, p. 7304, 29 jun. 2021. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/13/13/7304>>.

GARRIDO-HIDALGO, Celia *et al.* An end-to-end Internet of Things solution for Reverse Supply Chain Management in Industry 4.0. *Computers in Industry*, v. 112, p. 103127, nov. 2019.

GARY, Susan N. Best interests in the long term: fiduciary duties and ESG integration. *U. Colo. L. Rev.*, v. 90, p. 731, 2019.

GEISSDOERFER, Martin; VLADIMIROVA, Doroteya; EVANS, Steve. Sustainable business model innovation: A review. *Journal of Cleaner Production*, v. 198, p. 401–416, out. 2018.

GERHARD, Detlef; NEGES, Matthias; WOLF, Mario. Transfer of digital twin concepts to the production of precast concrete parts in the construction industry. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, v. 115, n. s1, p. 58–61, 7 abr. 2020. Disponível em: <<https://www.degruyter.com/document/doi/10.3139/104.112313/html>>.

GIL, Antonio Carlos. *Como Elaborar Projetos de Pesquisa*. 7ª Ed ed. [S.l.]: Atlas Exatas, Humanas, Soc (Grupo Gen), 2022.

GREIF, Toni; STEIN, Nikolai; FLATH, Christoph M. Peeking into the void: Digital twins for construction site logistics. *Computers in Industry*, v. 121, p. 103264, out. 2020. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S016636152030498X>>.

GRIEVES, Michael; VICKERS, John. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems BT - Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches. In: KAHLEN, FRANZ-JOSEF; FLUMERFELT, SHANNON; ALVES, ANABELA (Org.). . Cham: Springer International Publishing, 2017. p. 85–113. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4>.

GURGATZ, JESSICA FERNANDES; RIGONI, RAFAEL ANTÔNIO MAGALHÃES. Benefícios do uso da metodologia BIM no desenvolvimento de projetos estruturais. *Journal of Exact Sciences*, v. 39, p. 19–27, out. 2023.

HALONEN, Artturi. Autodesk Construction Cloud in Industrial Construction. 2022. Disponível em: <<https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-202203304210>>. Acesso em: 16 fev. 2024.

HAMIL, Stephen. *BIM dimensions - 3D, 4D, 5D, 6D BIM explained*. Disponível em: <<https://www.thenbs.com/knowledge/bim-dimensions-3d-4d-5d-6d-bim-explained>>.

HAMZEH, Farook *et al.* Integrated project delivery as an enabler for collaboration: a Middle East perspective. *Built Environment Project and Asset Management*, v. 9, n. 3, p. 334–347, 5 jul. 2019.

HANISCH, Marvin. Prescriptive Theorizing in Management Research: A New Impetus for Addressing Grand Challenges. *Journal of Management Studies*, 15 jan. 2024.

HAZRATHOSSEINI, Arman; MORADI AFRAPOLI, Ali. The advent of digital twins in surface mining: Its time has finally arrived. *Resources Policy*, v. 80, p. 103155, jan. 2023. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301420722005980>>.

HEESOM, David *et al.* Developing a collaborative HBIM to integrate tangible and intangible cultural heritage. *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, v. 39, n. 1, p. 72–95, 2020.

HEVNER *et al.* Design Science in Information Systems Research. *MIS Quarterly*, v. 28, n. 1, p. 75, 2004.

HEXAGON. Hexagon Documentation. Administration and Configuration of HxGN SDx. 2024. Disponível em: <<https://docs.hexagonppm.com/r/en-US/Administration-and-Configuration-of-HxGN-SDx/992388>>. Acesso em: 17 fev. 2024.

HOLLER, Manuel; UEBERNICKEL, Falk; BRENNER, Walter. Digital twin concepts in manufacturing industries-a literature review and avenues for further research. 2016, [S.l.]: Korean Institute of Industrial Engineers Seoul, Korea, 2016. p. 1–9.

HONGHONG, Song *et al.* Digital twin enhanced BIM to shape full life cycle digital transformation for bridge engineering. *Automation in Construction*, v. 147, p. 104736, mar. 2023.

HOSAMO, Haidar Hosamo; SVENNEVIG, Paul Ragnar; *et al.* A Digital Twin predictive maintenance framework of air handling units based on automatic fault detection and diagnostics. *Energy and Buildings*, v. 261, p. 111988, abr. 2022.

HOSAMO, Haidar Hosamo; IMRAN, Aksa; *et al.* A Review of the Digital Twin Technology in the AEC-FM Industry. *Advances in Civil Engineering*, v. 2022, p. 1–17, 17 mar. 2022.

HUANG, M.Q.; NINIĆ, J.; ZHANG, Q.B. BIM, machine learning and computer vision techniques in underground construction: Current status and future perspectives. *Tunnelling and Underground Space Technology*, v. 108, p. 103677, fev. 2021.

HWANG, Bon-Gang; NGO, Jasmine; HER, Priscilla Wan Yi. Integrated Digital Delivery: Implementation status and project performance in the Singapore construction industry. *Journal of Cleaner Production*, v. 262, p. 121396, jul. 2020.

- IDEO. The Field Guide to Human-Centered Design: Design kit. 2015. Disponível em: <https://d1r3w4d5z5a88i.cloudfront.net/assets/guide/Field%20Guide%20to%20Human-Centered%20Design_IDEOorg_English-0f60d33bce6b870e7d80f9cc1642c8e7.pdf>.
- INGRAM, Jonathan. *Understanding BIM*. [S.l.]: Routledge, 2020.
- JACKSON, W T; SCOTT, Daniel; SCHWAGLER, Nathan. Using the business model canvas as a methods approach to teaching entrepreneurial finance. v. 18, p. 99–112, 1 jan. 2015.
- JASKULA, Klaudia *et al.* Common data environments in construction: state-of-the-art and challenges for practical implementation. *Construction Innovation*, 29 jan. 2024.
- JAVOID, Mohd; HALEEM, Abid; SUMAN, Rajiv. Digital Twin applications toward Industry 4.0: A Review. *Cognitive Robotics*, v. 3, p. 71–92, 2023.
- JIANG, Feng *et al.* Digital twin and its implementations in the civil engineering sector. *Automation in Construction*, v. 130, p. 103838, out. 2021. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926580521002892>>.
- JONES, Barry. Integrated Project Delivery (IPD) for Maximizing Design and Construction Considerations Regarding Sustainability. *Procedia Engineering*, v. 95, p. 528–538, 2014.
- JOUAN, Pierre; HALLOT, Pierre. Digital twin: Research framework to support preventive conservation policies. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, v. 9, n. 4, p. 228, 2020.
- JOYCE, Alexandre; PAQUIN, Raymond L. The triple layered business model canvas: A tool to design more sustainable business models. *Journal of Cleaner Production*, v. 135, p. 1474–1486, nov. 2016.
- JUPP, Julie R. Cross industry learning: a comparative study of product lifecycle management and building information modelling. *International Journal of Product Lifecycle Management*, v. 9, n. 3, p. 258, 2016.
- KAEWUNRUEN, Sakdirat; PENG, Shijie; PHIL-EBOSIE, Olisa. Digital Twin Aided Sustainability and Vulnerability Audit for Subway Stations. *Sustainability*, v. 12, n. 19, p. 7873, 23 set. 2020.
- KENSEK, Karen. *BIM: Fundamentos e Aplicações*. 1ª ed. [S.l.: s.n.], 2018.
- KERZNER, Harold. *Gestão de Projetos: As Melhores Práticas*. 4ª edição ed. [S.l.]: Bookman editora, 2020.

- KHAJAVI, Siavash H *et al.* Digital twin: vision, benefits, boundaries, and creation for buildings. *IEEE access*, v. 7, p. 147406–147419, 2019.
- KIESER, Alfred; NICOLAI, Alexander; SEIDL, David. The Practical Relevance of Management Research: Turning the Debate on Relevance into a Rigorous Scientific Research Program. *The Academy of Management Annals*, v. 9, n. 1, p. 143–233, 11 jan. 2015.
- KOLADE, Oluwaseun; OWOSENI, Adebowale. Employment 5.0: The work of the future and the future of work. *Technology in Society*, v. 71, p. 102086, nov. 2022.
- KRAUS, Sascha *et al.* Digital entrepreneurship. *International Journal of Entrepreneurial Behavior & Research*, v. ahead-of-p, n. ahead-of-print, 20 set. 2018.
- KRITZINGER, Werner *et al.* Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, v. 51, n. 11, p. 1016–1022, 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2405896318316021>>.
- KULKARNI, Jayshri; DESAI, Arpan; SIM, Chow-Yen-Desmond. Two port CPW-fed MIMO antenna with wide bandwidth and high isolation for future wireless applications. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, v. 31, n. 8, p. e22700, 2021.
- KUNZ, John; FISCHER, Martin. Virtual design and construction. *Construction Management and Economics*, v. 38, n. 4, p. 355–363, 2 abr. 2020.
- LAURENT, Jean; LEICHT, Robert M. Practices for Designing Cross-Functional Teams for Integrated Project Delivery. *Journal of Construction Engineering and Management*, v. 145, n. 3, mar. 2019.
- LAWANI, Ama *et al.* Naturalistic decision making and decision drivers in the front end of complex projects. *International Journal of Project Management*, v. 41, n. 6, p. 102502, ago. 2023.
- LEE, Donghwan; CHA, Gichun; PARK, Seunghee. A study on data visualization of embedded sensors for building energy monitoring using BIM. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, v. 17, n. 6, p. 807–814, 8 jun. 2016. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s12541-016-0099-4>>.
- LENG, Jiewu *et al.* Industry 5.0: Prospect and retrospect. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 65, p. 279–295, out. 2022.

- LI, Clyde Zhengdao *et al.* An Internet of Things-enabled BIM platform for on-site assembly services in prefabricated construction. *Automation in Construction*, v. 89, p. 146–161, maio 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926580517306039>>.
- LI, Jennifer; GREENWOOD, David; KASSEM, Mohamad. Blockchain in the built environment and construction industry: A systematic review, conceptual models and practical use cases. *Automation in construction*, v. 102, p. 288–307, 2019.
- LI, Lianhui; LEI, Bingbing; MAO, Chunlei. Digital twin in smart manufacturing. *Journal of Industrial Information Integration*, v. 26, p. 100289, mar. 2022.
- LI, Lingzhi *et al.* Developing a BIM-enabled building lifecycle management system for owners: Architecture and case scenario. *Automation in Construction*, v. 129, p. 103814, set. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103814>>. Acesso em: 16 fev. 2024.
- LI, Yingpan; MA, Xiaofei. Research on the Informatization Management of Green Construction Based on Cloud-BIM. 14 ago. 2017, Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 14 ago. 2017. p. 585–592.
- LIBONI, Lara Bartocci *et al.* Smart industry and the pathways to HRM 4.0: implications for SCM. *Supply Chain Management: An International Journal*, 2019.
- LIM, Kendrik Yan Hong; ZHENG, Pai; CHEN, Chun-Hsien. A state-of-the-art survey of Digital Twin: techniques, engineering product lifecycle management and business innovation perspectives. *Journal of Intelligent Manufacturing*, v. 31, n. 6, p. 1313–1337, 18 ago. 2020.
- LIN, Tzu-Chieh; WANG, Kung Jeng; SHENG, Margaret L. To assess smart manufacturing readiness by maturity model: a case study on Taiwan enterprises. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, v. 33, n. 1, p. 102–115, 2 jan. 2020.
- LIN, Yu-Cheng; CHEUNG, Weng-Fong. Developing WSN/BIM-based environmental monitoring management system for parking garages in smart cities. *Journal of Management in Engineering*, v. 36, n. 3, p. 4020012, 2020.
- LIU, Jinfeng *et al.* Dynamic Evaluation Method of Machining Process Planning Based on Digital Twin. *IEEE Access*, v. 7, p. 19312–19323, 2019.
- LIU, Kewei *et al.* Review on the Developments of Structure, Construction Automation, and Monitoring of Intelligent Construction. *Buildings*, v. 12, n. 11, p. 1890, 4 nov. 2022.

LIU, Mengnan *et al.* Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 58, p. 346–361, 2021.

LIU, Mingqiang *et al.* SYSTEM DYNAMICS MODELING FOR CONSTRUCTION MANAGEMENT RESEARCH: CRITICAL REVIEW AND FUTURE TRENDS. *JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING AND MANAGEMENT*, v. 25, n. 8, p. 730–741, 22 ago. 2019. Disponível em: <<https://journals.vilniustech.lt/index.php/JCEM/article/view/10518>>.

LIU, Yan; VAN NEDERVEEN, Sander; HERTOOGH, Marcel. Understanding effects of BIM on collaborative design and construction: An empirical study in China. *International Journal of Project Management*, v. 35, n. 4, p. 686–698, maio 2017.

LIU, Yifan *et al.* Evaluating the Impact of Virtual Reality on Design Review Meetings. *Journal of Computing in Civil Engineering*, v. 34, n. 1, jan. 2020.

LIU, Ziwen *et al.* Transition from building information modeling (BIM) to integrated digital delivery (IDD) in sustainable building management: A knowledge discovery approach based review. *Journal of Cleaner Production*, v. 291, p. 125223, abr. 2021.

LOAIZA, Jonatan H.; CLOUTIER, Robert J.; LIPPERT, Kari. Proposing a Small-Scale Digital Twin Implementation Framework for Manufacturing from a Systems Perspective. *Systems*, v. 11, n. 1, p. 41, 11 jan. 2023.

LODGAARD, Eirin; DRANSFELD, Sebastian. Organizational aspects for successful integration of human-machine interaction in the industry 4.0 era. *Procedia CIRP*, v. 88, p. 218–222, 2020.

LOU, Shanhe *et al.* A human-cyber-physical system enabled sequential disassembly planning approach for a human-robot collaboration cell in Industry 5.0. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, v. 87, p. 102706, jun. 2024.

LU, Qiuchen; PARLIKAD, Ajith Kumar; *et al.* Developing a Digital Twin at Building and City Levels: Case Study of West Cambridge Campus. *Journal of Management in Engineering*, v. 36, n. 3, maio 2020. Disponível em: <<https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29ME.1943-5479.0000763>>.

LU, Qiuchen; CHEN, Long; *et al.* Semi-automatic geometric digital twinning for existing buildings based on images and CAD drawings. *Automation in Construction*, v. 115, p. 103183, 2020.

- LU, Yuqian *et al.* Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, v. 61, p. 101837, fev. 2020.
- LU, Yuqian *et al.* Outlook on human-centric manufacturing towards Industry 5.0. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 62, p. 612–627, jan. 2022.
- LU, Yuqian; XU, Xun; WANG, Lihui. Smart manufacturing process and system automation – A critical review of the standards and envisioned scenarios. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 56, p. 312–325, jul. 2020.
- LV, Zhihan *et al.* Building the metaverse using digital twins at all scales, states, and relations. *Virtual Reality & Intelligent Hardware*, v. 4, n. 6, p. 459–470, dez. 2022.
- MA, Yuxin *et al.* A visual analytical approach for transfer learning in classification. *Information Sciences*, v. 390, p. 54–69, jun. 2017.
- MACCHI, Marco *et al.* Exploring the role of digital twin for asset lifecycle management. *IFAC-PapersOnLine*, v. 51, n. 11, p. 790–795, 2018a.
- MACCHI, Marco *et al.* Exploring the role of digital twin for asset lifecycle management. *IFAC-PapersOnLine*, v. 51, n. 11, p. 790–795, 2018b.
- MACHADO, Caio; BRAHMI, Bani; KAMARI, Aliakbar. *Understanding the Benefits of BIM/Lean/IPD framework when carried-out simultaneously*. [S.l.: s.n.], 2020.
- MADNI, Azad M; MADNI, Carla C; LUCERO, Scott D. Leveraging digital twin technology in model-based systems engineering. *Systems*, v. 7, n. 1, p. 7, 2019.
- MADUBUIKE, Obinna C.; ANUMBA, Chimay J.; KHALLAF, Rana. A review of digital twin applications in construction. *Journal of Information Technology in Construction*, v. 27, p. 145–172, 23 fev. 2022.
- MAGRANI, Eduardo. *A internet das coisas*. Rio de Janeiro: [s.n.], 2018.
- MALAGNINO, Ada *et al.* From Traditional Construction Industry Process Management to Building Lifecycle Management. 2017, [S.l.]: Springer, 2017. p. 335–344.
- MANSOURI, Shahrzad; AKHAVIAN, Reza. The Status Quo and Future Potentials of Data Analytics in AEC/FM: A Quantitative Analysis of Academic Research and Industry Outlook. 29 mar. 2018, Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 29 mar. 2018. p. 90–100.

MARCO, Alberto De; KARZOUNA, Ahmad. Assessing the Benefits of the Integrated Project Delivery Method: A Survey of Expert Opinions. *Procedia Computer Science*, v. 138, p. 823–828, 2018.

MASSA, Lorenzo; TUCCI, Christopher L.; AFUAH, Allan. A Critical Assessment of Business Model Research. *Academy of Management Annals*, v. 11, n. 1, p. 73–104, jan. 2017.

MCKINSEY. Computação em nuvem pode gerar US\$ 3 tri até 2030. 2023.

MDIC. Estratégia BIM BR. Estratégia Nacional de Disseminação do Building Information Modelling – BIM. *Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços*, 2018.

MEDEIROS, B. C. *Life Cycle Canvas (LCC): análise de modelo de gestão visual para o planejamento de projetos*. 2017. 207 f. Centro de Ciências Sociais Aplicadas – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2017.

MENDES, Francisco André Pereira; POZNYAKOV, Karolina. Benefícios da metodologia FEL como suporte à gestão de portfólio e de partes interessadas. . *Boletim do Gerenciamento* v. 32, n. 32, p. 40–51, 2022. Disponível em: <<https://nppg.org.br/revistas/boletimdogerenciamento/article/view/698>>. Acesso em: 16 fev. 2024>. Acesso em: 17 fev. 2024.

MENG, Xianhai; DAS, Simran; MENG, Junyu. Integration of Digital Twin and Circular Economy in the Construction Industry. *Sustainability*, v. 15, n. 17, p. 13186, 1 set. 2023.

MO, Fan *et al.* A framework for manufacturing system reconfiguration and optimisation utilising digital twins and modular artificial intelligence. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, v. 82, p. 102524, ago. 2023.

MODOR INTELLIGENCE. *Infrastructure Sector Market Size & Share Analysis - Growth Trends & Forecasts (2024 - 2029)*. Disponível em: <<https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/infrastructure-sector>>. Acesso em: 9 fev. 2024.

MOYLAN, William A.; ARAFAH, Nadia. Integrated Project Delivery: Complicated Collaboration or Improbable Panacea. *PM World Journal*, 2017.

MRAD, Cyrine; FRÖLÉN RIBEIRO, Luís. A Review of Europe's Circular Economy in the Building Sector. *Sustainability*, v. 14, n. 21, p. 14211, 31 out. 2022.

- MUIANGA, Elisa *et al.* Evolutionary model for gradual transition to Integrated Project Delivery (IPD). v. 38, p. 144, 24 abr. 2023.
- MUNIRATHINAM, Sathyan. Industry 4.0: Industrial Internet of Things (IIOT). [S.l: s.n.], 2020. p. 129–164.
- NAMBISAN, Satish. Digital Entrepreneurship: Toward a Digital Technology Perspective of Entrepreneurship. *Entrepreneurship Theory and Practice*, v. 41, n. 6, p. 1029–1055, 1 nov. 2017.
- NARVAEZ ROJAS, Carolina *et al.* Society 5.0: A Japanese Concept for a Superintelligent Society. *Sustainability*, v. 13, n. 12, p. 6567, 9 jun. 2021.
- NAVES, F. *Odisseia da Apollo 13, foi há meio século*. Disponível em: <<https://www.dn.pt/vida-e-futuro/odisseia-da-apollo-13-foi-ha-meio-seculo--12057700.html>>.
- NEGRI, Elisa; FUMAGALLI, Luca; MACCHI, Marco. A review of the roles of digital twin in CPS-based production systems. *Procedia manufacturing*, v. 11, p. 939–948, 2017.
- NEWMAN, David; BEGG, Steve; WELSH, Matthew. Can 1 h of training lead to better project decision-making? *EURO Journal on Decision Processes*, v. 8, n. 1–2, p. 89–124, maio 2020. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2193943821000066>>.
- NIKOLOGIANNI, Anastasia; MAYOUF, Mohammad; GULLINO, Silvia. Building Information Modelling (BIM) and the impact on landscape: A systematic review of evolvments, shortfalls and future opportunities. *Cleaner Production Letters*, v. 3, p. 100016, dez. 2022.
- NOSRATABADI, Saeed *et al.* Sustainable Business Models: A Review. *Sustainability*, v. 11, n. 6, p. 1663, 19 mar. 2019.
- OESTERREICH, Thuy Duong; TEUTEBERG, Frank. Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry. *Computers in Industry*, v. 83, p. 121–139, dez. 2016.
- OLÁH, Judit *et al.* Impact of Industry 4.0 on Environmental Sustainability. *Sustainability*, v. 12, n. 11, p. 4674, 8 jun. 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/12/11/4674>>.

OLIVEIRA, Geiza Lima De *et al.* Metodologia TECLIM para uso racional de água na indústria: o banco de ideias no contexto da metodologia front-end loading. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 21, n. 4, p. 753–764, dez. 2016.

ONU. Organização das Nações Unidas. ONU News, Perspectiva Global Reportagens Humanas . *Desenvolvimento Econômico*. , 2019. Disponível em: <<https://news.un.org/pt/story/2019/04/1666621>>. Acesso em: 20 jan. 2024.

OPOKU, De-Graft Joe *et al.* Digital twin application in the construction industry: A literature review. *Journal of Building Engineering*, v. 40, p. 102726, ago. 2021. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352710221005842>>.

ORAE, Mehran *et al.* Collaboration in BIM-based construction networks: A bibliometric-qualitative literature review. *International Journal of Project Management*, v. 35, n. 7, p. 1288–1301, out. 2017.

OSTERWALDER, A. *The Business Model Ontology a Proposition in a Design Science Approach*. 2004. Université de Lausanne, 2004.

OSTERWALDER, A. *et al.* Value Proposition Design: How to Create Products and Services Customers Want. 2014.

OSTERWALDER, A.; PIGNEUR, Y. *Business model generation – inovação em modelos de negócios: um manual para visionários, inovadores e revolucionários*. Rio de Janeiro: Alta Books, 2011.

OWUSU, Emmanuel Kingsford *et al.* Contemporary Review of Anti-Corruption Measures in Construction Project Management. *Project Management Journal*, v. 50, n. 1, p. 40–56, 28 fev. 2019. Disponível em: <<http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/8756972818808983>>.

OZBEKLER, Turkan Muge; OZTURKOGLU, Yucel. Analysing the importance of sustainability-oriented service quality in competition environment. *Business Strategy and the Environment*, v. 29, n. 3, p. 1504–1516, 8 mar. 2020.

OZTURK, Gozde Basak. Digital Twin Research in the AECO-FM Industry. *Journal of Building Engineering*, v. 40, p. 102730, ago. 2021.

PAL, Gautam; ATKINSON, Katie; LI, Gangmin. Managing Heterogeneous Data on a Big Data Platform: A Multi-criteria Decision Making Model for Data-Intensive Science. fev. 2020, [S.l.]: IEEE, fev. 2020. p. 229–239.

PALLARÉS, Francisco J. *et al.* Structural health monitoring (SHM) and Nondestructive testing (NDT) of slender masonry structures: A practical review. *Construction and Building Materials*, v. 297, p. 123768, ago. 2021.

PAMUCAR, Dragan *et al.* Selection of the best Big Data platform using COBRAC-ARTASI methodology with adaptive standardized intervals. *Expert Systems with Applications*, v. 239, p. 122312, abr. 2024.

PÄRN, E.A.; EDWARDS, D.J.; SING, Michael C.P. Origins and probabilities of MEP and structural design clashes within a federated BIM model. *Automation in Construction*, v. 85, p. 209–219, jan. 2018.

PEREIRA, A.C.; ROMERO, F. A review of the meanings and the implications of the Industry 4.0 concept. *Procedia Manufacturing*, v. 13, p. 1206–1214, 2017.

PIMENTEL, M.; FILIPPO, D.; DOS SANTOS, T. M. Design Science Research: pesquisa científica atrelada ao design de artefatos. *RE@D - Revista de Educação a Distância e Elearning*, mar. 2020.

PMI. *A guide to the project managment body of knowledge (PMBOK Guide)*. Seventh ed. [S.l.]: Project Management Institute, 2021.

PRADO, Darci. *Gerenciamento de projetos de capital: para expansão da capacidade produtiva*. [S.l.]: Falconi Editora, 2014.

PRESSMAN, R. S.; MAXIM B.R. *Engenharia de software: uma abordagem profissional*. 9^a ed. Porto Alegre: AMGH, 2021.

QI, Qinglin *et al.* Digital Twin Service towards Smart Manufacturing. *Procedia CIRP*, v. 72, p. 237–242, 2018.

QI, Qinglin; TAO, Fei. Digital twin and big data towards smart manufacturing and industry 4.0: 360 degree comparison. *Ieee Access*, v. 6, p. 3585–3593, 2018.

QUEIROZ, Maciel M. *et al.* Smart production systems drivers for business process management improvement. *Business Process Management Journal*, v. 26, n. 5, p. 1075–1092, 20 fev. 2020.

RACHINGER, Michael; KORAJMAN, Ines; ROPPOSCH, Christiana. *Systematic literature review of business model innovation in business ecosystems*. [S.l: s.n.], 2019.

- RAFSANJANI, Hamed Nabizadeh; NABIZADEH, Amir Hossein. Towards digital architecture, engineering, and construction (AEC) industry through virtual design and construction (VDC) and digital twin. *Energy and Built Environment*, v. 4, n. 2, p. 169–178, abr. 2023.
- RAJESH, R.; RAJENDRAN, Chandrasekharan. Relating Environmental, Social, and Governance scores and sustainability performances of firms: An empirical analysis. *Business Strategy and the Environment*, v. 29, n. 3, p. 1247–1267, 17 mar. 2020.
- RASHEED, Adil; SAN, Omer; KVAMSDAL, Trond. Digital Twin: Values, Challenges and Enablers From a Modeling Perspective. *IEEE Access*, v. 8, p. 21980–22012, 2020.
- RASHIDIAN, Sara; DROGEMULLER, Robin; OMRANI, Sara. Building Information Modelling, Integrated Project Delivery, and Lean Construction Maturity Attributes: A Delphi Study. *Buildings*, v. 13, p. 281, 18 jan. 2023.
- RAUCH, Erwin; LINDER, Christian; DALLASEGA, Patrick. Anthropocentric perspective of production before and within Industry 4.0. *Computers & Industrial Engineering*, v. 139, p. 105644, 2020.
- RAUTER, Romana; JONKER, Jan; BAUMGARTNER, Rupert J. Going one's own way: drivers in developing business models for sustainability. *Journal of Cleaner Production*, v. 140, p. 144–154, jan. 2017.
- REISINGER, Julia; HOLLINSKY, Patrick; KOVACIC, Iva. Design Guideline for Flexible Industrial Buildings Integrating Industry 4.0 Parameters. *Sustainability*, v. 13, n. 19, p. 10627, 24 set. 2021. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/13/19/10627>>.
- RISCHMOLLER, Leonardo *et al.* Integration Enabled by Virtual Design & Construction as a Lean Implementation Strategy. 18 jul. 2018, [S.l: s.n.], 18 jul. 2018. p. 240–249.
- RODRIGUES, W; SILVA, M. P. Metodologia FEL Aplicada a Projetos de Capital em Empresa do Agronegócio. 2020, [S.l: s.n.], 2020.
- ROGAGE, Kay *et al.* Beyond digital shadows: A Digital Twin for monitoring earthwork operation in large infrastructure projects. *AI in Civil Engineering*, v. 1, n. 1, p. 7, 28 dez. 2022.
- ROMERO, Fernando; ANDERY, Paulo. *Gestão de megaprojetos: Uma abordagem lean*. [S.l.]: Editora Brasport, 2016.

ROSENGART, Alessandro *et al.* The Green Value Engineering Methodology: A Sustainability-Driven Project Management Tool for Capital Projects in Process Industry. *Sustainability*, v. 15, n. 20, p. 14827, 12 out. 2023.

ROUHANI, Saeed; ROTBEI, Sayna. Big data platforms: in the lens of selection and evaluation approach. *Journal of Decision Systems*, v. 32, n. 1, p. 19–48, 21 dez. 2022.

SAAD, Ali M.; DULAIMI, Mohammed; ZULU, Sambo Lyson. Broader use of the Modern Methods of Construction (MMC) in the UK public sector: A Business Model Canvas (BMC) perspective. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, v. 9, n. 2, p. 100035, jun. 2023.

SAAKSVUORI, Antti; IMMONEN, Anselmi. *Product lifecycle management systems*. [S.l.]: Springer, 2008.

SACKS, Rafael *et al.* *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers*. 3rd ed. ed. [S.l.: s.n.], 2018.

SACKS, Rafael *et al.* Construction with digital twin information systems. *Data-Centric Engineering*, v. 1, 2020.

SACKS, Rafael *et al.* Interaction of Lean and Building Information Modeling in Construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, v. 136, n. 24, p. 968–981, 2010.

SASSEN, Remmer; HINZE, Anne-Kathrin; HARDECK, Inga. Impact of ESG factors on firm risk in Europe. *Journal of Business Economics*, v. 86, n. 8, p. 867–904, 23 nov. 2016.

SCHALTEGGER, Stefan; HANSEN, Erik G.; LÜDEKE-FREUND, Florian. Business Models for Sustainability. *Organization & Environment*, v. 29, n. 1, p. 3–10, 16 mar. 2016.

SCHNEIDER, Paul. Managerial challenges of Industry 4.0: an empirically backed research agenda for a nascent field. *Review of Managerial Science*, v. 12, n. 3, p. 803–848, 20 jul. 2018.

SEATON, Hugh *et al.* *Digital twins from design to handover of constructed assets*. . London: [s.n.], 2022.

SEBRAE. Entenda a diferença entre ESG e sustentabilidade 2023. 2023. Disponível em: <<https://sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/entenda-a-diferenca-entre-esg-e-sustentabilidade,4af474cd892a2810VgnVCM100000d701210aRCRD>>. Acesso em: 16 fev. 2024.

SEPASGOZAR, Samad *et al.* BIM and Digital Twin for Developing Convergence Technologies as Future of Digital Construction. *Buildings*, v. 13, n. 2, p. 441, 4 fev. 2023.

SEPASGOZAR, Samad M.E. *et al.* Metrics development and modelling the mixed reality and digital twin adoption in the context of Industry 4.0. *Engineering, Construction and Architectural Management*, v. 28, n. 5, p. 1355–1376, 10 jun. 2021.

SERRÃO, Samara Moraes. Metodologia FEL (Front-End Loading) como recurso para o gerenciamento de projetos. *Revista Técnico científica n.32*, 2023. Disponível em: <<https://revistatecie.crea-pr.org.br/index.php/revista/article/view/799>>. Acesso em: 17 fev. 2024.

SERUGGA, Joas; KAGIOGLOU, Mike; TZORTZOPOULOS, Patricia. A Utilitarian Decision—Making Approach for Front End Design—A Systematic Literature Review. *Buildings*, v. 10, n. 2, p. 34, 19 fev. 2020.

SGA. *Integrated Digital Delivery*. Disponível em: <<https://www1.bca.gov.sg/buildsg/digitalisation/integrated-digital-delivery-idd>>. Acesso em: 15 jun. 2024.

SHAHZAD, Muhammad *et al.* Digital Twins in Built Environments: An Investigation of the Characteristics, Applications, and Challenges. *Buildings*, v. 12, n. 2, p. 120, 25 jan. 2022.

SHAKIL, Mohammad Hassan. Environmental, social and governance performance and financial risk: Moderating role of ESG controversies and board gender diversity. *Resources Policy*, v. 72, p. 102144, ago. 2021.

SHEN, Kaining; DING, Lan; WANG, Cynthia. Development of a Framework to Support Whole-Life-Cycle Net-Zero-Carbon Buildings through Integration of Building Information Modelling and Digital Twins. *Buildings*, v. 12, n. 10, p. 1747, 20 out. 2022.

SKOG, Daniel A.; WIMELIUS, Henrik; SANDBERG, Johan. Digital Disruption. *Business & Information Systems Engineering*, v. 60, n. 5, p. 431–437, 16 out. 2018.

SLEITI, Ahmad K.; KAPAT, Jayanta S.; VESELY, Ladislav. Digital twin in energy industry: Proposed robust digital twin for power plant and other complex capital-intensive large engineering systems. *Energy Reports*, v. 8, p. 3704–3726, nov. 2022.

SOTO-ACOSTA, Pedro; PLACER-MARURI, Emilio; PEREZ-GONZALEZ, Daniel. A case analysis of a product lifecycle information management framework for SMEs. *International Journal of Information Management*, v. 36, n. 2, p. 240–244, 2016.

STANITSAS, Marios; KIRYTOPOULOS, Konstantinos; LEOPOULOS, Vrassidas. Integrating sustainability indicators into project management: The case of construction industry. *Journal of Cleaner Production*, v. 279, p. 123774, jan. 2021.

STEENKAMP, L.P.; HAGEDORN-HANSEN, D.; OOSTHUIZEN, G.A. Visual Management System to Manage Manufacturing Resources. *Procedia Manufacturing*, v. 8, p. 455–462, 2017.

STINGL, Verena; GERALDI, Joana. A research agenda for studying project decision-behaviour through the lenses of simple heuristics. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 162, p. 120367, jan. 2021. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0040162520311938>>.

SUSILA, Nagarajan; SRUTHI, Anand; USHA, Sakthivel. Impact of cloud security in digital twin. [S.l.: s.n.], 2020. p. 247–263.

TANBOUR, Emad. Effectiveness of Utilizing Immersive Virtual Reality for Weekly Design Review Team Meetings in Capstone Mechanical Engineering Courses. 2022, [S.l.]: ASEE Conferences, 2022.

TANG, Shu *et al.* A review of building information modeling (BIM) and the internet of things (IoT) devices integration: Present status and future trends. *Automation in Construction*, v. 101, p. 127–139, maio 2019. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926580518305764>>.

TANG, Shu *et al.* BIM assisted Building Automation System information exchange using BACnet and IFC. *Automation in Construction*, v. 110, p. 103049, fev. 2020. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926580519301645>>.

TAO, Fei *et al.* Digital twin towards smart manufacturing and industry 4.0. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 58, p. 1–2, jan. 2021.

TAO, Fei; ZHANG, Meng; NEE, A.Y.C. Applications of Digital Twin. *Digital Twin Driven Smart Manufacturing*. [S.l.]: Elsevier, 2019. p. 29–62.

TCHANA, Yvan; DUCCELLIER, Guillaume; REMY, Sébastien. Designing a unique Digital Twin for linear infrastructures lifecycle management. *Procedia CIRP*, v. 84, p. 545–549, 2019.

TEIXEIRA, Julio Monteiro; MERINO, Eugenio Andrés Díaz. GESTÃO VISUAL DE PROJETOS: UMA PROPOSTA PARA FACILITAR O PROCESSO DE DESIGN. dez. 2014, São Paulo: Editora Edgard Blücher, dez. 2014. p. 1280–1291.

TEIXEIRA, L. C. M.; LOPES, H. E. G. Aplicação do modelo canvas para o modelo de negócios do Banco do Brasil e da Caixa Econômica Federal. *Revista Gestão e Tecnologia*, p. 73–99, maio 2016.

TENG, Yue *et al.* Using cooperative game theory to determine profit distribution in IPD projects. *International Journal of Construction Management*, v. 19, n. 1, p. 32–45, 2 jan. 2019.

TEULIER, R; BAGIEU, M. *Building Information Modeling: Shared Modeling, Mutual Data, the New Art of Building*. [S.l.]: Wiley, 2024. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=q1XrEAAAQBAJ>>.

TEZEL, Algan; AZIZ, Zeeshan. Benefits of visual management in construction: cases from the transportation sector in England. *Construction Innovation*, v. 17, n. 2, p. 125–157, 3 abr. 2017.

TJELL, Janni; BOSCH-SIJTSEMA, Petra M. Visual Management in Mid-sized Construction Design Projects. *Procedia Economics and Finance*, v. 21, p. 193–200, 2015.

TUEGEL, Eric J. *et al.* Reengineering Aircraft Structural Life Prediction Using a Digital Twin. *International Journal of Aerospace Engineering*, v. 2011, p. 1–14, 2011.

TUHAISE, Valerian Vanessa; TAH, Joseph Handibry Mbatu; ABANDA, Fonbeyin Henry. Technologies for digital twin applications in construction. *Automation in Construction*, v. 152, p. 104931, ago. 2023.

TVENGE, Nina *et al.* Added value of a virtual approach to simulation-based learning in a manufacturing learning factory. *Procedia CIRP*, v. 88, p. 36–41, 2020.

UHLEMANN, Thomas H.-J.; LEHMANN, Christian; STEINHILPER, Rolf. The Digital Twin: Realizing the Cyber-Physical Production System for Industry 4.0. *Procedia CIRP*, v. 61, p. 335–340, 2017. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827116313129>>.

VIANA, Daniela *et al.* O papel da gestão visual no planejamento e controle integrado colaborativo para sistemas construtivos sob encomenda. 2021, Oslo: [s.n.], 2021.

VRCHOTA, Jaroslav *et al.* Critical Success Factors of the Project Management in Relation to Industry 4.0 for Sustainability of Projects. *Sustainability*, v. 13, n. 1, p. 281, 30 dez. 2020.

WALI; ALI; FARDA. Assessing the Effectiveness of Integrated Project Delivery (IPD) in Complementary Construction Practices. *Journal of Reproducible Research*, 2024.

WANG, Baicun *et al.* Human Digital Twin in the context of Industry 5.0. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, v. 85, p. 102626, fev. 2024.

WANG, Baicun *et al.* Toward human-centric smart manufacturing: A human-cyber-physical systems (HCPS) perspective. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 63, p. 471–490, abr. 2022.

WANG, Hao; MENG, Xianhai. Transformation from IT-based knowledge management into BIM-supported knowledge management: A literature review. *Expert Systems with Applications*, v. 121, p. 170–187, maio 2019.

WANG, Jinjiang *et al.* Digital twin-driven virtual commissioning of machine tool. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, v. 81, p. 102499, 2023. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0736584522001818>>.

WANG, Peng *et al.* Sensor Control in Anti-Submarine Warfare—A Digital Twin and Random Finite Sets Based Approach. *Entropy*, v. 21, n. 8, p. 767, 6 ago. 2019.

WANG, Weixi *et al.* BIM Information Integration Based VR Modeling in Digital Twins in Industry 5.0. *Journal of Industrial Information Integration*, v. 28, p. 100351, jul. 2022.

WANG, Zhaojing *et al.* Blockchain-based framework for improving supply chain traceability and information sharing in precast construction. *Automation in Construction*, v. 111, p. 103063, mar. 2020. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926580519305059>>.

WESSEL, Lauri *et al.* Unpacking the Difference Between Digital Transformation and IT-Enabled Organizational Transformation. *Journal of the Association for Information Systems*, v. 22, n. 1, p. 102–129, 15 jan. 2021.

WEST, Timothy D; BLACKBURN, Mark. Is digital thread/digital twin affordable? A systemic assessment of the cost of DoD's latest manhattan project. *Procedia computer science*, v. 114, p. 47–56, 2017.

WHANG, Seoung-Wook; PARK, Kenneth Sungho; KIM, Sangyong. Critical success factors for implementing integrated construction project delivery. *Engineering, Construction and Architectural Management*, v. 26, n. 10, p. 2432–2446, 18 set. 2019.

WIERINGA, R. J. *Design Science Methodology: for Information Systems and Software Engineering*. [S.l.]: Springer, 2014.

WILLIAMS, Terry *et al.* PMI - A systematic literature review: The front end of projects. 2019.

XIA, Haishan *et al.* Study on city digital twin technologies for sustainable smart city design: A review and bibliometric analysis of geographic information system and building information modeling integration. *Sustainable Cities and Society*, v. 84, p. 104009, set. 2022.

XIE, Haiyan *et al.* Knowledge map and forecast of digital twin in the construction industry: State-of-the-art review using scientometric analysis. *Journal of Cleaner Production*, v. 383, p. 135231, jan. 2023.

XIE, Xiang *et al.* Digital twin enabled fault detection and diagnosis process for building HVAC systems. *Automation in Construction*, v. 146, p. 104695, fev. 2023.

XU, Li Da; XU, Eric L.; LI, Ling. Industry 4.0: state of the art and future trends. *International Journal of Production Research*, v. 56, n. 8, p. 2941–2962, 18 abr. 2018. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00207543.2018.1444806>>.

XU, Jinghai *et al.* Developing a digital twin model for monitoring building structural health by combining a building information model and a real-scene 3D model. *Measurement*, v. 217, p. 112955, ago. 2023.

XU, Yan *et al.* A digital-twin-assisted fault diagnosis using deep transfer learning. *Ieee Access*, v. 7, p. 19990–19999, 2019.

XUE, Fan *et al.* From Semantic Segmentation to Semantic Registration: Derivative-Free Optimization–Based Approach for Automatic Generation of Semantically Rich As-Built Building Information Models from 3D Point Clouds. *Journal of Computing in Civil Engineering*, v. 33, n. 4, jul. 2019.

YE, Zijian *et al.* A digital twin approach for tunnel construction safety early warning and management. *Computers in Industry*, v. 144, p. 103783, jan. 2023.

YIN, Yue *et al.* A state-of-the-art survey on Augmented Reality-assisted Digital Twin for futuristic human-centric industry transformation. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, v. 81, p. 102515, jun. 2023.

YOU, Zhijia; FENG, Lingjun. Integration of Industry 4.0 Related Technologies in Construction Industry: A Framework of Cyber-Physical System. *IEEE Access*, v. 8, p. 122908–122922, 2020.

ZAKHARCHENKO, Anastasiya; STEPANETS, Oleksandr. DIGITAL TWIN VALUE IN INTELLIGENT BUILDING DEVELOPMENT. *Advanced Information Systems*, v. 7, n. 2, p. 75–86, 12 jun. 2023.

ZERJAV, Vedran; MCARTHUR, Jenny; EDKINS, Andrew. The multiplicity of value in the front-end of projects: The case of London transportation infrastructure. *International Journal of Project Management*, v. 39, n. 5, p. 507–519, jul. 2021.

ZHANG, Chao *et al.* A deep learning-enabled human-cyber-physical fusion method towards human-robot collaborative assembly. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, v. 83, p. 102571, out. 2023.

ZHANG, Yubing *et al.* BIM-based approach for the integrated assessment of life cycle carbon emission intensity and life cycle costs. *Building and Environment*, v. 226, p. 109691, dez. 2022.

ZHANG, Zhiqian; PAN, Wei. Virtual reality supported interactive tower crane layout planning for high-rise modular integrated construction. *Automation in Construction*, v. 130, p. 103854, out. 2021.

ZHAO, Jianfeng *et al.* Developing a conceptual framework for the application of digital twin technologies to revamp building operation and maintenance processes. *Journal of Building Engineering*, v. 49, p. 104028, maio 2022.

ZHAO, Rui; CHEN, Zhe; XUE, Fan. A blockchain 3.0 paradigm for digital twins in construction project management. *Automation in Construction*, v. 145, p. 104645, jan. 2023.

ZHENG, Xiaochen; LU, Jinzhi; KIRITSIS, Dimitris. The emergence of cognitive digital twin: vision, challenges and opportunities. *International Journal of Production Research*, v. 60, n. 24, p. 7610–7632, 17 dez. 2022.

ZHENG, Yide; ZHANG, Yi; LIN, Jiarui. BIM-based time-varying system reliability analysis for buildings and infrastructures. *Journal of Building Engineering*, v. 76, p. 106958, out. 2023.

ZHOU, Ji *et al.* Human–Cyber–Physical Systems (HCPSs) in the Context of New-Generation Intelligent Manufacturing. *Engineering*, v. 5, n. 4, p. 624–636, ago. 2019. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2095809919306514>>.

ZOU, Yang; JONES, Steve; KIVINIEMI, Arto. BIM and knowledge based risk management system: A conceptual model. 2015.