



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

MATHEUS GOMES MARTINS

**PROTÓTIPO DE CONTRATO INTELIGENTE COM BLOCKCHAIN E BIM NA
EXECUÇÃO DE OBRAS: UMA APLICAÇÃO NA CONCRETAGEM DE PAREDES
MOLDADAS IN LOCO**

Salvador
2025

MATHEUS GOMES MARTINS

**PROTÓTIPO DE CONTRATO INTELIGENTE COM BLOCKCHAIN E BIM NA
EXECUÇÃO DE OBRAS: UMA APLICAÇÃO NA CONCRETAGEM DE PAREDES
MOLDADAS IN LOCO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Reymard Savio Sampaio de Melo

Coorientadora: Profa. Dra. Dayana Bastos Costa

Agência Financiadora: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)

Salvador

2025

M386Martins, Matheus Gomes.

Protótipo de contrato inteligente com blockchain e BIM na execução de obras: uma aplicação na concretagem de paredes moldadas *in loco* / Matheus Gomes Martins. – Salvador, 2025.

223f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Reymard Savio Sampaio de Melo.

Coorientadora: Profa. Dra. Dayana Bastos Costa.

Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, 2025.

1. Contratos – construção civil. 2. Blockchain. 3. Modelagem da informação da construção. 4. Pagamentos - construção civil. I. Melo, Reymard Savio Sampaio de. II. Costa, Dayana Bastos. III. Universidade Federal da Bahia. IV. Título.

CDD: 692.8

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Bernadete Sinay Neves, Escola Politécnica – UFBA.

MATHEUS GOMES MARTINS

PROTÓTIPO DE CONTRATO INTELIGENTE COM BLOCKCHAIN E BIM NA EXECUÇÃO DE OBRAS: UMA APLICAÇÃO NA CONCRETAGEM DE PAREDES MOLDADAS IN LOCO

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia.

Aprovada em 25 de julho de 2025.

BANCA EXAMINADORA:

Documento assinado digitalmente
gov.br
REYMAR SAVIO SAMPAIO DE MELO
Data: 31/07/2025 10:19:06-0300
Verifique em <https://validar.itd.gov.br>

Prof.(a) Dr.(a) Reymary Savio Sampaio de Melo
Orientador. PPEC: Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil - UFBA

Documento assinado digitalmente
gov.br
DAYANA BASTOS COSTA
Data: 29/07/2025 15:55:00-0300
Verifique em <https://validar.itd.gov.br>

Prof.(a) Dr.(a) Dayana Bastos Costa. Coorientadora.
PPEC: Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil - UFBA

Documento assinado digitalmente
gov.br
FABIANO ROGERIO CORREA
Data: 28/07/2025 09:21:39-0300
Verifique em <https://validar.itd.gov.br>

Prof.(a) Dr.(a) Fabiano Rogerio Corrêa
PPG: Programa de Mestrado Profissional em Inovação na Construção- USP

Documento assinado digitalmente
gov.br
HERMAN AUGUSTO LEPIKSON
Data: 25/07/2025 18:58:25-0300
Verifique em <https://validar.itd.gov.br>

Prof.(a) Dr.(a) Herman Augusto Lepikson
PPG: Programa de Pós-Graduação em Gestão e Tecnologia Industria-SENAI.

Dedico este trabalho aos meus pais Joilda Gomes e Mario Martins por todo amor, esforço, companheirismo e motivação incondicionais que foram essenciais para que eu chegasse até aqui.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por Sua bondade e misericórdia, por me dar forças e guiar meus passos no desenvolvimento deste trabalho.

Às minhas tias, Ana Lúcia e Rita Martins, pelas orações e apoio; ao meu tio Alcides Gomes, que sempre me incentivou e aos demais membros da minha família, por torcerem por mim.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Reymard Sávio Sampaio de Melo, que é uma grande referência em motivação, conhecimento e competência. Agradeço profundamente pela orientação de excelência, pela confiança ao aceitar me orientar, e por todo o esforço dedicado para nortear e viabilizar este trabalho da melhor maneira possível.

À minha coorientadora, Profa. Dra. Dayana Bastos Costa, pelo acolhimento tanto como orientando quanto no grupo de pesquisa. Sou muito grato pela oportunidade de crescer academicamente e pessoalmente sob sua orientação. Ao Prof. Dr. Emerson de Andrade Marques Ferreira, pelas contribuições imprescindíveis à pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo financiamento da bolsa de estudos, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro que possibilitou a finalização do protótipo.

À empresa participante do projeto, por disponibilizar os canteiros de obras e oferecer o suporte técnico necessário durante as etapas de campo. Agradeço também aos profissionais que participaram do estudo, em especial a Natan Ramalho, que colaborou significativamente para que o protótipo fosse desenvolvido.

À GoLedger e ao CO Marcos Sarres, pela parceria técnico-científica, pelo imenso conhecimento e pela dedicação oferecidos para a realização deste trabalho; e a Mário Augusto, por toda a assistência prestada.

Aos bolsistas Fernanda Santana e Bruna de Almeida, Victoria Leal, pelo grande esforço e dedicação ao projeto. Agradeço especialmente a Shênio Alves, que voluntariamente trabalhou arduamente para concluir o protótipo. Ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC), pela importante contribuição.

Aos meus irmãos em Cristo, que oraram e me apoiaram em todo o processo, para que tudo ocorresse conforme a vontade de Deus.

Aos membros do GETEC, pelo apoio e carinho, especialmente a Caroline Araújo, Matheus Santos e Alisson de Souza pelas contribuições pontuais e essenciais para a finalização do protótipo.

E, finalmente, a todos os professores e amigos que fizeram parte da minha trajetória, contribuindo para a minha formação como profissional e como ser humano.

Sim, coisas grandiosas fez o SENHOR por nós, e por isso, estamos alegres. Aqueles que semeiam com lágrimas colherão com cânticos de alegria.

Salmos 126:3, 5

RESUMO

A cadeia de suprimentos do concreto na construção civil ainda depende de processos analógicos que dificultam a rastreabilidade, comprometem a confiabilidade das transações e geram conflitos entre contratantes e fornecedores. Tais problemas são especialmente críticos em sistemas moldados in loco, onde o controle sobre a entrega, o recebimento e o pagamento do concreto é fragmentado. Este estudo propõe um protótipo de contrato inteligente, denominado BIMLedger, integrando tecnologias de blockchain, contratos inteligentes e Building Information Modeling (BIM), com o objetivo de otimizar o fluxo de pagamento no sistema de paredes de concreto moldadas in loco. A pesquisa adota a abordagem Design Science Research (DSR), estruturada nas etapas de: (i) Conscientização, com uma Revisão Sistemática da Literatura sobre lacunas nos modelos atuais de pagamento automatizado; (ii) Sugestão, por meio de um estudo exploratório em um empreendimento real; (iii) Desenvolvimento, com modelagem de processos em um segundo empreendimento, incluindo fluxos de recebimento, verificação e validação de entrega via BIM; (iv) Avaliação, com testes experimentais do contrato inteligente em ambiente de simulação e avaliação qualitativa por entrevistas; e (v) Conclusão, com proposições para escalabilidade e aplicação do protótipo. Os principais resultados incluem o Modelo Entidade-Relacionamento (MER), o Diagrama Entidade-Relacionamento (DER), os modelos BIM derivados da edificação, os fluxogramas de negócio e o protótipo BIMLedger. Conclui-se que o BIMLedger é uma solução viável para a transformação digital do fluxo de pagamento no setor da construção, com potencial de redução de litígios, aceleração dos pagamentos e fortalecimento da governança contratual.

Palavras-chave: Livro-razão distribuído. Modelagem da Informação da Construção. Contratos Inteligentes. Hyperledger Fabric. Concreto.

ABSTRACT

The concrete supply chain in the construction industry still relies on analog processes that hinder traceability, compromise transaction reliability, and lead to conflicts between contractors and suppliers. These challenges are especially critical in cast-in-place systems, where the control over concrete delivery, receipt, and payment is fragmented. This study proposes a smart contract prototype, named BIMLedger, which integrates blockchain technology, smart contracts, and Building Information Modeling (BIM) with the goal of optimizing the payment flow for cast-in-place concrete wall systems. The research adopts the Design Science Research (DSR) approach, structured in the following stages: (i) Awareness, through a Systematic Literature Review (SLR) on current gaps in automated payment models; (ii) Suggestion, by means of an exploratory study conducted on a real construction project; (iii) Development, involving process modeling in a second project, including delivery receipt, verification, and validation flows supported by BIM; (iv) Evaluation, through experimental testing of the smart contract in a simulation environment and qualitative assessment via semi-structured interviews; and (v) Conclusion, presenting proposals for scalability and broader application of the prototype. The main outcomes include a Relational Entity Model (REM), an Entity-Relationship Diagram (ERD), BIM models derived from the building, business flowcharts and the BIMLedger prototype itself. It is concluded that BIMLedger is a viable solution for the digital transformation of payment flows in the construction sector, with the potential to reduce disputes, accelerate payments, and strengthen contractual governance.

Keywords: Distributed ledger. Building Information Modeling. Smart Contracts. Hyperledger Fabric. Concrete.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Funcionamento de uma rede blockchain.....	9
Figura 2 – Estrutura básica de transações na rede blockchain.....	10
Figura 3 – Blocos de transação encadeados numa Blockchain	11
Figura 4 – Diferenças entre redes centralizadas e redes distribuídas (P2P).....	17
Figura 5 – Uma rede Fabric com MSPs federados e em execução com vários chaincoides instalados	18
Figura 6 – Fluxo de transações no Hyperledger Fabric.....	20
Figura 7 – Componentes das Transações no Hyperledger Fabric	24
Figura 8 – Dimensões Consolidadas do BIM	33
Figura 9 – Fluxograma (AS-IS) do estado atual do pagamento de concreto.....	48
Figura 10 – Fluxograma (AS-IS) do estado atual do pagamento de notas fiscais....	49
Figura 11 – Fluxo de pagamento de notas fiscais	50
Figura 12 – Fluxograma (TO-BE) do futuro fluxo de liberação de pagamento do concreto	52
Figura 13 – Fluxograma (TO-BE) do futuro fluxo de pagamentos de notas fiscais ...	53
Figura 14 – Estrutura do contrato inteligente com integração BIM, Blockchain e IPD.	56
Figura 15 – Visão geral da plataforma Iot-BIM habilitada para Blockchain	62
Figura 16 – Interações entre os membros do contrato inteligente.....	66
Figura 17 – Delineamento geral da pesquisa	73
Figura 18 – Diagrama do protocolo de revisão sistemática.....	74
Figura 19 – Edificação em fase de construção.....	77
Figura 20 – Ilustração do empreendimento da obra A	78
Figura 21 – Ilustração do Empreendimento B	81
Figura 22 – Detalhamento das etapas dos TRLs	89
Figura 23 – Tabela de Histórico de Movimentação do Documento	100
Figura 24 – DER do fluxo de pagamento do concreto.....	102
Figura 25 – Modelagem 3D pavimento tipo (1° ao 9°) e térreo sem laje	106
Figura 26 – Modelagem 3D pavimento tipo (10° ao 17°) e térreo sem laje.....	106
Figura 27 – Modelo BIM final da edificação	109
Figura 28 – Parâmetros de Rastreamento e Status do modelo BIM no Revit	111
Figura 29 – Representação 3D no visualizado da Autodesk Platform Service.....	112

Figura 30 – Diagrama BPMN (AS-IS) atualizado do processo do pagamento da nota fiscal.....	115
Figura 31 – Diagrama BPMN (TO-BE) simplificado do fluxo de pagamento do concreto.	117
Figura 32 – Estrutura geral do método para desenvolvimento do BIMLedger	119
Figura 33 – Organizações do BIMLedger criadas na GoFabric.....	121
Figura 34 – Grupo empresarial criado na GoFabric	122
Figura 35 – Canal-BIM associado ao grupo empresarial	123
Figura 36 – Autoridade Certificadora da organização construtora	124
Figura 37 – Autoridade Certificadora da organização concreteira.....	125
Figura 38 – Autoridade Certificadora da organização laboratório	125
Figura 39 – Visualização do chaincode	128
Figura 40 – Estrutura da política de endosso	129
Figura 41 – Seção de APIs e Golnitus da construtora	130
Figura 42 – Seção de APIs e Golnitus do laboratório	131
Figura 43 – Seção de APIs e Golnitus da concreteira.....	131
Figura 44 – QR CODE de acesso ao funcionamento do BIMLedger	134
Figura 45 – Resultados da avaliação experimental do BIMLedger	137
Figura 46 – Resultado da avaliação das entrevistas	140
Figura 47 – Diagrama BPMN (AS-IS) atualizado do fluxo de pagamento de concreto	181
Figura 48 – Aba Gerenciar no Revit	182
Figura 49 – Janela de Parâmetros do projeto	183
Figura 50 – Janela de propriedades de parâmetros	184
Figura 51 – Parâmetros inseridos no elemento do modelo BIM	185
Figura 52 – Opção My Applications no portal da APS.....	186
Figura 53 – Janela de criação da aplicação.	186
Figura 54 – Janela de configurações da aplicação	187
Figura 55 – Comando .env	188
Figura 56 – Execução do comando npm start.....	188
Figura 57 – Janela de apresentação da tradução do modelo BIM	189
Figura 58 – Modelo BIM derivado	189
Figura 59 – Opção Builder	191
Figura 60 – Opção New Template.....	191

Figura 61 – Opções do Template	192
Figura 62 – Preenchimento das informações dos Assets	193
Figura 63 – Assets criados	194
Figura 64 – Propriedade do Asset ValidarQualidade	195
Figura 65 – Configuração de permissões ativo concreto	196
Figura 66 – Configuração de permissões concreteira, construtora e laboratório	197
Figura 67 – Configuração de permissões ativos de pagamento.....	198
Figura 68 – Tela de acesso do usuário	199
Figura 69 – Menu para seleção de agentes do BIMLedger.....	200
Figura 70 – Menu mudar agente com opções.....	201
Figura 71 – Criação de uma construtora	201
Figura 72 – Botões para criação de uma solicitação de concreto pela construtora.	202
Figura 73 – Ações para visualização, edição e exclusão de cada solicitação.....	202
Figura 74 – Tela de solicitação do concreto no BIMLedger	203
Figura 75 – Criação da concreteira no BIMLedger.....	204
Figura 76 – Criação de um lote para entrega do concreto	205
Figura 77 – Criação da validação da qualidade do concreto.....	206
Figura 78 – Criação da solicitação de pagamento	207
Figura 79 – Tela de simulação de pagamento com a geração do comprovante	208
Figura 80 – Visualização do modelo BIM	209
Figura 81 – Código para realização do login.....	211
Figura 82 – Código para mudança de agente	212
Figura 83 – Código responsável por gerenciar o usuário logado	212
Figura 84 – Etapa de renderização na tabela de leitura	213
Figura 85 – Código para requisição ao back-end.....	213
Figura 86 – Código para chamado de renderização da tabela.....	214
Figura 87 – Trecho do código de processamento dos campos e dados dos Assets	214
Figura 88 – Trecho de código de validação de uma solicitação	215
Figura 89 – Código do objeto de requisição	216
Figura 90 – Código para editar e deletar o Asset	217
Figura 91 – Códigos do script e API.....	217
Figura 92 – Código de configuração do viewer da APS	218
Figura 93 – Código para processamento do pagamento	219

Figura 94 – Código para mapeamento dos objetos para realizar o pagamento	220
Figura 95 – Código para percorrer as solicitações para realização do pagamento.	221
Figura 96 – Modelo de comprovante de pagamento de uma transação	222

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Comparativo entre as redes blockchain	16
Quadro 2 – Evidências das limitações encontradas para a integração BIM e Blockchain	43
Quadro 3 – Natureza do estudo	44
Quadro 4 – Registro de dados sobre os requisitos tecnológicos aplicados no uso da rede Blockchain.....	45
Quadro 5 – Dados das entrevistas.....	82
Quadro 6 – Dados das reuniões.....	86
Quadro 7 – Descrição das ferramentas utilizadas para desenvolver o protótipo	88
Quadro 8 – Constructos, variáveis e fontes de evidência para avaliação de desempenho	91
Quadro 9 – Constructos, variáveis e fontes de evidência para avaliação dos requisitos do usuário	95
Quadro 10 – Constructos, variáveis para avaliação do artefato pelos entrevistados	96
Quadro 11 – Descrição das etapas das entrevistas semiestruturadas.....	97
Quadro 12 – Perfis dos profissionais dos participantes das entrevistas.....	98
Quadro 13 – Detalhamento do nível de informações necessárias do modelo BIM .	108
Quadro 14 – Composição do código do parâmetro de rastreamento.....	110
Quadro 15 – Comparativo entre o BIMLedger e outros contratos inteligentes	135
Quadro 16 – Pontos positivos e oportunidades de melhoria da avaliação dos participantes.....	142
Quadro 17 – Produção científica deste estudo.....	156

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Escala de avaliação de nível de capacidade visualização de dados	92
Tabela 2 – Escala de avaliação da nível de desempenho com carga crescente	92
Tabela 3 – Escala de avaliação de nível de facilidade de integração	93
Tabela 4 – Escala de nível de validação de entrada de dados	93
Tabela 5 – Composição de custos de serviços para desenvolvimento do BIMLedger	144

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABPMP	<i>Association of Business Process Professionals.</i>
AIA	<i>American Institute of Architects</i>
AECO	Arquitetura Engenharia Construção e Operações
API	<i>Application Programming Interface</i>
APS	<i>Autodesk Platform Services</i>
AWS	<i>Amazon Web Services</i>
BaaS	<i>Blockchain and BIM as Service</i>
BIM	<i>Building Information Modeling</i>
BPM	<i>Business Process Modeling</i>
BPMN	<i>Business Process Modeling and Notation</i>
BS	<i>British Standard</i>
CA	<i>Certification Authorities</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CDN	<i>Content Delivery Network</i>
CEN/TC	<i>Committee European Normative/ Technical Committee</i>
CIS	<i>Cimsteel Integration Version</i>
CFT	<i>Crash Fault Tolerant</i>
CPF	Cadastro de Pessoa Física
CR	<i>Constructive Research</i>
CSS	<i>Cascading Style Sheets</i>
DER	Diagrama de Entidade-Relacionamento
DFD	Diagrama de Fluxo de Dados
DLT	<i>Distributed Ledger Technology</i>
DSR	<i>Design Science Research</i>
EN	<i>European Normative</i>
FIDIC	<i>Federação Internacional de Engenheiros Conselheiros</i>
GETEC	<i>Gestão e Tecnologia das Construções</i>
HLF	<i>Hyper Ledger Fabric</i>
HTML	<i>HyperText Markup Language</i>
IaaS	<i>Infrastructure as a Service</i>
IBM	<i>International Business Machines Corporation</i>
IFC	<i>Industry Foundation Classe</i>

ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
IPD	<i>Integrated Project Delivery</i>
IPFS	<i>Inter Planetary File System</i>
LOD-Dev	<i>Level of Development</i>
LOD-Det	<i>Level of Detail</i>
LOIN	<i>Level of Information Need</i>
LGPD	Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais
MSP	<i>Membership Service Provider</i>
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
OSN	<i>Orderer Service Nodes</i>
PBFT	<i>Practical Byzantine Fault Tolerance</i>
PKI	<i>Public Key Infrastructure</i>
POB	<i>Proof of Burn</i>
POET	<i>Proof of Elapsed Time</i>
PTM	<i>Peer Transaction Manager</i>
RDBMS	<i>Relational Database Management System</i>
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i>
SAAS	<i>Syntactically Awesome Style Sheets</i>
SaaS	<i>Software as a Service</i>
SDK	<i>Software Development Kit</i>
SGX	<i>Software Guard Extensions</i>
SQL	<i>Structured Query Language</i>
TEE	<i>Trusted Execution Environment</i>
TRL	<i>Technology Readiness Levels</i>
UFBA	Universidade Federal da Bahia
URN	<i>Uniform Resource Name</i>
XML	<i>Extensible Markup Language</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 JUSTIFICATIVA	1
1.2 PROBLEMA DE PESQUISA	4
1.3 QUESTÕES DE PESQUISA	6
1.3.1 Questão Principal	6
1.3.2 Questões Secundárias	6
1.4 OBJETIVOS DA PESQUISA	6
1.4.1 Objetivo Principal.....	6
1.4.2 Objetivos Secundários.....	6
1.5 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA.....	7
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO	7
2 FUNDAMENTOS DE BLOCKCHAIN E BIM	8
2.1 BLOCKCHAIN: CONCEITOS E ESTRUTURA.....	8
2.2 ALGORITMOS DE CONSENSO	14
2.3 REDE PEER - TO - PEER.....	16
2.4 HYPERLEDGER FABRIC	18
2.4.1 Arquitetura Hyperledger Fabric.....	19
2.4.2 Membership Service Provider.....	21
2.4.3 Canais	21
2.4.4 Ledger	22
2.4.5 Chaincode	23
2.4.6 Política de Endosso.....	25
2.4.7 Plataforma GoFabric.....	25
2.5 MODELAGEM DE DADOS.....	27
2.5.1 Modelo Entidade-Relacionamento.....	28
2.5.2 Diagrama Entidade-Relacionamento	30
2.6 MODELAGEM DA INFORMAÇÃO DA CONSTRUÇÃO.....	31
2.6.1 Nível De Desenvolvimento do Modelo BIM	33
2.6.2 Nível de Informação Necessária.....	35
2.6.3 Interoperabilidade	37
2.6.4 Extensibilidade	38

3 CONTRATOS INTELIGENTES NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	39
3.1 FUNDAMENTOS DE CONTRATOS INTELIGENTES.....	39
3.1.1 Integração entre BIM e blockchain para uso de contratos inteligentes.....	40
3.1.2 Proposta para automatização de pagamento de concreto	46
3.1.3 Protótipo de contrato Inteligente com integração entre o método IPD, BIM e blockchain.	56
3.1.4. Protótipo de contrato Inteligente para construção modular com integração entre BIM, blockchain e IoT.....	61
3.1.5. Protótipo de contrato Inteligente para gestão da cadeia de suprimentos com integração entre BIM blockchain e IoT.	63
3.2. CONSIDERAÇÕES FINAIS DOS CAPÍTULOS 2 E 3	67
4 MÉTODO DE PESQUISA.....	69
4.1 ESTRATÉGIA DE PESQUISA.....	69
4.2 DELINEAMENTO DA PESQUISA	71
4.3 ETAPA DE CONSCIENTIZAÇÃO	74
4.3.1 Revisão Sistemática da Literatura	74
4.3.2 Capacitações em blockchain	75
4.4 ETAPA DE SUGESTÃO	76
4.4.1 Descrição da Empresa	76
4.4.2 Descrição do insumo	77
4.4.3 Descrição da Obra A	78
4.4.4 Coleta de dados	78
4.4.5 Modelagem de dados na Obra A.....	79
4.4.6 Desenvolvimento do modelo BIM preliminar	79
4.5 ETAPA DE DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO	80
4.5.1 Descrição da Obra B	81
4.5.2 Compreensão do fluxo de recebimento ao pagamento de concreto	81
4.5.3 Desenvolvimento de modelo BIM final.....	82
4.5.4 Desenvolvimento do Modelo BIM Derivado.....	83
4.5.5 Modelagem de negócios.....	84
4.5.6 Orquestração do contrato inteligente.....	85
4.5.7 Nível de Maturidade Tecnológica do BIMLedger	89
4.6 ETAPA DE AVALIAÇÃO DO MÉTODO.....	90
4.6.1 Avaliação experimental.....	90

4.6.2	Entrevistas semiestruturadas para avaliação	94
4.6.3	Descrição das entrevistas.....	97
4.7	ETAPA DE CONCLUSÃO	99
5	APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	100
5.1	RESULTADOS DA ETAPA DE SUGESTÃO	100
5.1.1	DER	100
5.1.2	MER.....	103
5.1.3	Modelos BIM preliminar	106
5.2	RESULTADOS DA ETAPA DE DESENVOLVIMENTO.....	107
5.2.1	Modelo BIM final.....	107
5.2.2.	Modelo BIM derivado.....	112
5.2.3	Fluxo de pagamento do concreto (AS-IS) atualizado	113
5.2.4	Fluxo de pagamento da nota fiscal (AS/S) atualizado	115
5.2.5	Fluxo de pagamento do concreto (<i>TO-BE</i>) simplificado	117
5.2.6.	Método para desenvolvimento do BIMLedger	119
5.2.7.	Camada Contrato Inteligente	120
5.2.8.	Camada BIM.....	133
5.2.9.	Funcionamento do BIMLedger	134
5.2.10	Estudo comparativo.....	135
5.3	RESULTADOS DA ETAPA DE AVALIAÇÃO	137
5.3.1	Constructo Funcionalidade	137
5.3.2	Constructo Escalabilidade	138
5.3.3	Constructo Interoperabilidade.....	139
5.3.4	Constructo Segurança	139
5.4	AVALIAÇÃO DA PERCEPÇÃO DOS ENTREVISTADOS	140
5.5	ESTIMATIVA DE CUSTO NO DESENVOLVIMENTO DO BIMLEDGER .144	144
5.6	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	146
6	CONCLUSÃO	153
6.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	153
6.2	PRODUÇÕES CIENTÍFICAS	156
6.3	LIMITAÇÕES DA PESQUISA.....	157
6.4	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	160
REFERÊNCIAS.....		162
Apêndice A – Formulário para avaliação do fluxo de pagamento		175

Apêndice B – Formulário da avaliação do protótipo.....	176
Apêndice C – Fluxo de pagamento do concreto	181
Apêndice D – Criação dos parâmetros de identidade.....	182
Apêndice E – Criação do modelo BIM derivado	186
Apêndice F – Criação do contrato inteligente	191
Apêndice G – Procedimentos de uso do BIMLedger	199
Apêndice H – Criação do <i>front-end</i>	210
Apêndice I – Comprovante de pagamento	222

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA

Devido à complexidade e ao grande número de partes interessadas envolvidas nas construções, o número de contratos envolvidos também é elevado. No setor privado da construção civil, os contratos são em grande parte geridos internamente em cada uma das organizações envolvidas. Além disso, os contratantes administram o progresso de um serviço ou a entrega de um ou mais insumos para verificar se os contratados cumprem os termos especificados e as suas obrigações (Azman *et al.*, 2014; Mason, 2017).

Segundo a Federação Internacional de Engenheiros Consultores (FIDIC, 2017), os pagamentos referentes às etapas da obra são geralmente realizados por meio de um sistema hierárquico de repasses financeiros. Nesse modelo, os valores são transferidos do contratante para o contratado principal, e deste para os subcontratados, seguindo sucessivamente ao longo da cadeia de suprimentos. Devido a essa estrutura sequencial e dependente, o sistema tradicional de pagamento progressivo pode gerar sérios problemas caso haja atrasos ou inadimplência em qualquer nível da cadeia.

Problemas de pagamento levam a consequências indesejáveis, incluindo atrasos, aumento de custos, redução de desempenho, disputas e falências, que podem ameaçar o sucesso dos empreendimentos (Sambasivan; Soon, 2007; Tran, 2012). Falhas no pagamento são identificadas como uma das principais causas de disputas em obras na indústria da construção civil (Ramachandra; Rotimi, 2011; 2014).

As más práticas de pagamento não só têm um impacto negativo nas condições financeiras da maioria dos participantes no contrato, mas a confiança entre as partes também pode ser gravemente prejudicada em determinadas circunstâncias, o que gera até disputas judiciais (Manu; Ankrah; Chinyio, 2015). Portanto, há uma necessidade crescente de um sistema de pagamento progressivo com uma gestão de dados automatizados, integrados, eficientes e confiáveis alcançarem projetos bem-sucedidos (Ju; Ding; Skibniewski, 2017).

No contexto do pagamento de concreto para lajes e paredes de uma edificação de múltiplos pavimentos, a dificuldade em rastrear informações relacionadas à entrega, execução e eventuais falhas, assim como a demora na comunicação entre a construtora, a concreteira e o laboratório de qualidade, são os principais fatores que geram conflitos entre as partes envolvidas. Esses problemas resultam, principalmente,

em retrabalho, atrasos na conclusão do pagamento e no cumprimento do cronograma da obra (Piccoli *et al.*, 2023).

Com o advento da Indústria 4.0, o setor da construção civil tem buscado soluções com base tecnológica para digitalizar e automatizar o processo de pagamentos de insumos ou serviços, a fim de garantir transparência, eficiência e clareza nos dados obtidos. Neste esforço, observa-se o uso de novas tecnologias digitais, como blockchain, contratos inteligentes e a Modelagem da Informação da Construção (BIM). Neste aspecto, alguns autores têm destacado o potencial da tecnologia blockchain como base para os contratos inteligentes para transformar a administração de pagamentos na indústria da construção (Shi *et al.*, 2021; Shemov *et al.*, 2020; Tezel *et al.*, 2020).

As tecnologias blockchain e contratos inteligentes têm recebido atenção crescente nos últimos anos como uma nova alternativa para melhorar o processo tradicional de pagamento de progresso de empreendimentos (Sonmez; Ahmadisheykhsarmast; Gungor, 2022). O potencial do blockchain e dos contratos inteligentes para proteger os principais contratantes, subcontratantes e fornecedores contra a insolvência ou atrasos nos pagamentos foi destacado nos estudos de Cardeira (2015), Wang *et al.*, (2017) Mason (2017), Ahmadisheykhsarmast e Sonmez (2018), Li *et al.*, (2019) e Tezel *et al.*, (2020).

Os contratos inteligentes podem ser definidos como aqueles que são totalmente executáveis sem intervenção humana ou autoaplicáveis, monitorando insumos externos de fontes confiáveis, a fim de serem liquidados de acordo com as estipulações do contrato (Mason, 2017; Peters; Panayi; Chapelle, 2021). Os objetivos gerais dos contratos inteligentes são satisfazer as condições contratuais comuns, minimizar as expectativas e minimizar a necessidade de intermediários confiáveis (Szabo, 2012).

A blockchain pode ser usada para introduzir uma plataforma neutra e confiável para armazenamento imutável de dados, troca de informações, salvamento de contratos inteligentes e automatização de pagamentos (Yaga *et al.*, 2018; Xu *et al.*, 2019).

No que se refere ao BIM, o nível de adoção da tecnologia encontra-se em um patamar diferente em comparação à blockchain. Pesquisas recentes revelam que, em uma análise territorial, os avanços relacionados à transformação digital no setor são modestos, refletindo uma realidade generalizada em todo o país. Os índices que avaliam a percepção de progresso na adoção do BIM, particularmente no que diz

respeito à maturidade da tecnologia, permanecem consistentemente baixos em todas as cinco regiões brasileiras (Câmera Brasileira de BIM CBIM; BIM Fórum Brasil BFB, 2024).

Para as empresas privadas do setor da construção que já utilizam a metodologia BIM em seus processos, a integração entre BIM e blockchain para o desenvolvimento de contratos inteligentes pode servir como um catalisador do uso da plataforma dentro das construtoras. Essa adoção incentiva à aplicação do BIM em diversas fases do ciclo de vida do empreendimento, resultando em significativas melhorias para as organizações.

Um dos benefícios da aplicação do BIM é a possibilidade de criar um modelo digital único, conhecido como modelo *as planned*, utilizado na fase de planejamento do empreendimento. Esse modelo inicial reúne informações fundamentais, como a geometria e o volume da edificação. À medida que a obra avança, o modelo é atualizado com dados adicionais, incluindo cronograma, custos, segurança, qualidade e outros aspectos relevantes.

No caso específico do pagamento automatizado do sistema de paredes de concreto moldadas in loco, que também contempla as lajes, a utilização do modelo BIM é fundamental. O modelo BIM pode incorporar informações detalhadas sobre prazos e custos da concretagem, bem como as especificações técnicas do concreto. Além disso, ele pode conter o status da concretagem, o que ajuda a rastrear quais pavimentos e elementos já foram concretados.

Esses dados servem como um banco de dados para a construtora, permitindo o controle de recebimento, aplicação e ensaios do concreto. Dessa forma, o modelo BIM se torna uma ferramenta importante para um monitoramento preciso de todo o concreto lançado na obra, garantindo sua qualidade e rastreabilidade. Em última análise, essas informações são essenciais tanto para o contratante quanto para o contratado, pois garantem maior transparência e precisão em todo o processo.

Por outro lado, para as empresas que ainda não utilizam o BIM, os avanços proporcionados pela Indústria 4.0, aliados à formulação de legislações que incentivam seu uso, indicam uma tendência de que o BIM se torne uma ferramenta padrão para construtoras. O BIM destaca-se por abordar aspectos cruciais, como o compartilhamento de informações, a interoperabilidade entre sistemas e a colaboração eficiente ao longo de todo o ciclo de vida de uma edificação. Isso inclui desde as etapas iniciais de viabilidade até os estágios finais de demolição e reciclagem (Isikdag, 2015).

Turk e Klinc (2017) afirmam que plataformas blockchain (por exemplo, Ethereum e Hyperledger) podem ser integradas ao modelo BIM para adicionar novos recursos. Tais recursos podem registrar todas as modificações em modelos BIM tridimensionais ao longo das etapas da construção, o que permite que as partes interessadas monitorem com mais facilidade essas alterações. Di *et al.* (2020) apontaram que a associação entre contratos inteligentes e BIM pode automatizar toda a fase de entrega, e o pagamento automático pode ser emitido através da conexão entre o modelo BIM, ou seja, o estado atualizado do ativo e o contrato computacional.

Neste sentido, a tecnologia Blockchain e contratos inteligentes não apenas melhoram a colaboração na indústria da construção, mas também mantêm todos os participantes informados sobre o status do projeto e todas as mudanças, como projeto BIM 3D, procedimentos no local de construção e fluxo de materiais e conclusão de serviços (Oraee *et al.*, 2019). Portanto, os benefícios do uso de contratos inteligentes e a integração com o BIM são algumas das combinações mais promissoras.

1.2 PROBLEMA DE PESQUISA

No contexto da literatura nacional, observam-se aplicações de blockchain e contratos inteligentes em setores como saúde, agricultura e computação. No entanto, na indústria da construção civil, as iniciativas ainda são incipientes. Um dos poucos estudos identificados é o de Oliveira Júnior (2021), que desenvolveu um contrato inteligente para o pagamento de serviços de manutenção de um campo de futebol e de uma quadra poliesportiva. Vale destacar que esse contrato foi implementado de forma isolada, sem integração com outras tecnologias digitais. No cenário internacional, foi identificado sete estudos, publicados até maio de 2025, que exploram a integração entre BIM e blockchain para o pagamento de insumos ou serviços. Dentre esses, apenas Hamledari e Fischer (2021) relataram a aplicação em um caso real, integrando BIM, blockchain e Internet das Coisas, *Internet of Things* (IoT).

Groesen e Pauwels (2022) desenvolveram um contrato inteligente semiautomático na rede Ethereum com o objetivo de rastrear e automatizar o pagamento de elementos pré-fabricados de concreto. O modelo BIM foi elaborado no software Revit com nível de detalhamento *Level of Development* (LOD-Dev) 400 e armazenado em nuvem utilizando o banco de dados Google Firebase. Para extrair os dados do modelo BIM e vinculá-los ao contrato inteligente, os autores utilizaram a API do Firebase integrada ao serviço oráculo *Provable Oracle Service*, que permite importar

dados externos para a blockchain. Embora o estudo represente um avanço relevante na integração entre BIM e blockchain, ele não apresenta a modelagem de dados necessária à concepção da lógica do contrato inteligente. A ausência dessa modelagem compromete a padronização e a confiabilidade na estruturação dos dados que alimentam o contrato, conforme destacam Qing e Yu-liu (2009) e Mosley *et al.* (2010).

No estudo conduzido por Sonmez, Ahmadisheykhsarmast e Gungor (2022), foi desenvolvido um contrato inteligente semiautomático na rede Ethereum para o pagamento de diferentes etapas da construção de uma edificação. O modelo BIM foi produzido no Revit com nível de desenvolvimento LOD 350, e um *plugin* específico foi desenvolvido na linguagem C sharp (C#) por meio da Revit API para integrar o modelo à blockchain. Um dos principais desafios enfrentados nesse estudo diz respeito ao custo das transações, que são realizadas em Ether (ETH), a criptomoeda nativa da Ethereum. Isso implica na necessidade de conversão para moedas fiduciárias, tornando o processo suscetível às flutuações cambiais. Além disso, o contrato não contempla o gerenciamento da qualidade do material, impossibilitando que o pagamento seja condicionado às verificações realizadas.

Elghaish, Abrishami e Hosseini (2020) propuseram um contrato inteligente semiautomático utilizando a rede Hyperledger Fabric para automatizar o pagamento das etapas de construção de um conjunto habitacional. A integração entre o modelo BIM e a blockchain foi realizada por meio de uma API desenvolvida com a ferramenta IBM Blockchain Cloud Beta 2. Embora o estudo apresente uma solução tecnicamente viável, ele é limitado a projetos conduzidos sob o regime contratual *Integrated Project Delivery* (IPD), o que restringe sua aplicabilidade a outros contextos organizacionais. Além disso, os autores não informam os custos envolvidos no desenvolvimento do contrato, dificultando a análise da viabilidade econômica do sistema proposto.

Embora os estudos analisados tenham contribuído para o avanço do conhecimento sobre a integração entre BIM, blockchain e contratos inteligentes na automação de pagamentos, ainda persistem limitações relevantes. Uma lacuna comum é a ausência da modelagem de dados como base para estruturar a arquitetura dos contratos inteligentes. Essa modelagem é essencial para garantir a padronização dos dados, facilitar a interoperabilidade e assegurar a integridade das informações armazenadas na blockchain. Além disso, os dois primeiros estudos enfrentam desafios relacionados aos altos custos de desenvolvimento da infraestrutura, enquanto o terceiro omite os custos por transação e desenvolvimento do contrato. No caso específico do

pagamento de concreto, o processo apresenta características complexas: envolve múltiplos setores da construtora, requer colaboração entre profissionais, e depende do cumprimento de prazos para emissão de notas fiscais e efetivação dos pagamentos, o que torna ainda mais desafiadora a automação desse fluxo.

Diante dessas limitações, torna-se necessário aprofundar os estudos sobre a aplicação de contratos inteligentes integrados ao BIM e à blockchain no setor da construção civil. Persistem lacunas significativas a serem exploradas, especialmente no que diz respeito à modelagem de dados e à validação prática dessas soluções. Além disso, a escassez de estudos com aplicação em cenários reais evidencia a necessidade de propostas mais maduras e contextualizadas. Assim, a questão principal e as questões secundárias desta pesquisa são apresentadas a seguir.

1.3 QUESTÕES DE PESQUISA

1.3.1 Questão Principal

Como integrar um modelo BIM *as planned* a uma rede blockchain para desenvolvimento de um protótipo de contrato inteligente para pagamento semiautomatizado do sistema de paredes de concreto moldadas *in loco*?

1.3.2 Questões Secundárias

O presente trabalho possui as seguintes questões secundárias:

- a) Como estruturar a modelagem de dados do fluxo de pagamento semiautomatizado de concreto para apoiar o desenvolvimento do contrato inteligente?
- b) Como são os processos de recebimento, pagamento e rastreabilidade do concreto para o sistema de paredes moldadas *in loco*?
- c) Qual é o custo estimado para o desenvolvimento do protótipo?

1.4 OBJETIVOS DA PESQUISA

1.4.1 Objetivo Principal

Desenvolver um protótipo de contrato inteligente para o pagamento semiautomatizado do sistema de paredes de concreto moldadas *in loco*, com base na integração entre um modelo BIM *as-planned* e tecnologia blockchain.

1.4.2 Objetivos Secundários

- a) Estruturar a modelagem de dados do fluxo de pagamento de concreto para subsidiar o desenvolvimento do contrato inteligente;

- b) Mapear os processos de recebimento, pagamento e rastreamento do concreto para o sistema de paredes moldadas *in loco*;
- c) Estimar os custos de desenvolvimento do protótipo.

1.5 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Os requisitos considerados como delimitadores do escopo da pesquisa são:

- a) O Diagrama Entidade-Relacionamento foi desenvolvido por meio da ferramenta MySQL Workbench;
- b) Para a construção do contrato inteligente foi utilizada rede Hyperledger Fabric;
- c) A orquestração do contrato inteligente foi realizada por meio da plataforma GoFabric;
- d) O modelo BIM foi desenvolvido a partir de licença educacional do software Autodesk Revit;
- e) O *front-end* foi desenvolvido por meio da biblioteca React.JS.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta pesquisa está dividida em seis capítulos. **O Capítulo 1** consiste na Introdução, na qual são apresentadas a justificativa do trabalho, o problema, as questões, os objetivos, as delimitações e a estrutura da pesquisa.

Os Capítulos 2 e 3 Os capítulos de revisão da literatura abordam os conceitos fundamentais de blockchain, modelagem de dados, tecnologia BIM e contratos inteligentes, destacando sua integração com o BIM como base conceitual para a pesquisa.

O Capítulo 4 apresenta o método de pesquisa, contemplando a estratégia de pesquisa adotada e o delineamento da pesquisa com a descrição das etapas e atividades que foram realizadas.

O Capítulo 5 apresenta os resultados alcançados no presente estudo bem como a respectiva discussão, contemplando, a modelagem de dados, o mapeamento do fluxo de pagamento do concreto, o modelo BIM, o protótipo de contrato inteligente desenvolvido e a avaliação dos resultados.

O Capítulo 6 as principais conclusões do trabalho com base nos resultados alcançados, as limitações encontradas e as sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTOS DE BLOCKCHAIN E BIM

Neste capítulo são discutidos conceitos e definições necessários para uma compreensão adequada dos temas envolvidos no estudo. Inicialmente são destacados aspectos referentes à tecnologia blockchain, seguido do detalhamento dos componentes da rede Hyperledger Fabric.

Este capítulo aborda ainda sobre os fundamentos da modelagem de dados, incluindo o desenvolvimento do Modelo Entidade-Relacionamento e o Diagrama Entidade-Relacionamento voltado para suporte de desenvolvimento de uma rede blockchain. Além disso, é apresentada uma revisão sobre o BIM, contendo aspectos da sua funcionalidade, LOD, *Level of Information Need* (LOIN) interoperabilidade e extensibilidade. Por fim, é apresentada uma revisão sobre contratos inteligentes na construção civil, a integração entre BIM, blockchain e contratos inteligentes e estudos que desenvolveram contratos inteligentes para pagamentos no setor da construção.

2.1 BLOCKCHAIN: CONCEITOS E ESTRUTURA

O registro de transações não é algo recente, sejam elas transações de bens ou até mesmo transações financeiras. Esta transação é realizada com recurso de um *ledger* (livro-razão), no qual são realizados registros, especialmente, atividades de negócio e dinheiro pago ou recebido (Cambridge, 2019). O *ledger* mantém um estado e um conjunto ordenado de transações que o determinam (Linux, 2018). Este, no entanto, foi sempre mantido por organizações centrais, como é o exemplo de sistemas bancários, cartórios, empresas, ou o governo (Yaga *et al.*, 2018).

A blockchain surgiu em 2008, por meio de um artigo intitulado “Bitcoin: um sistema de dinheiro eletrônico ponto-a-ponto” (em inglês, Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System), escrito por um autor sob o pseudônimo de Satoshi Nakamoto (Diniz, 2017). A rede criada por Nakamoto teve como objetivo a criação de um sistema descentralizado capaz de validar transações sem necessidade de uma autoridade central agindo como validador do processo (Antonopoulos, 2017).

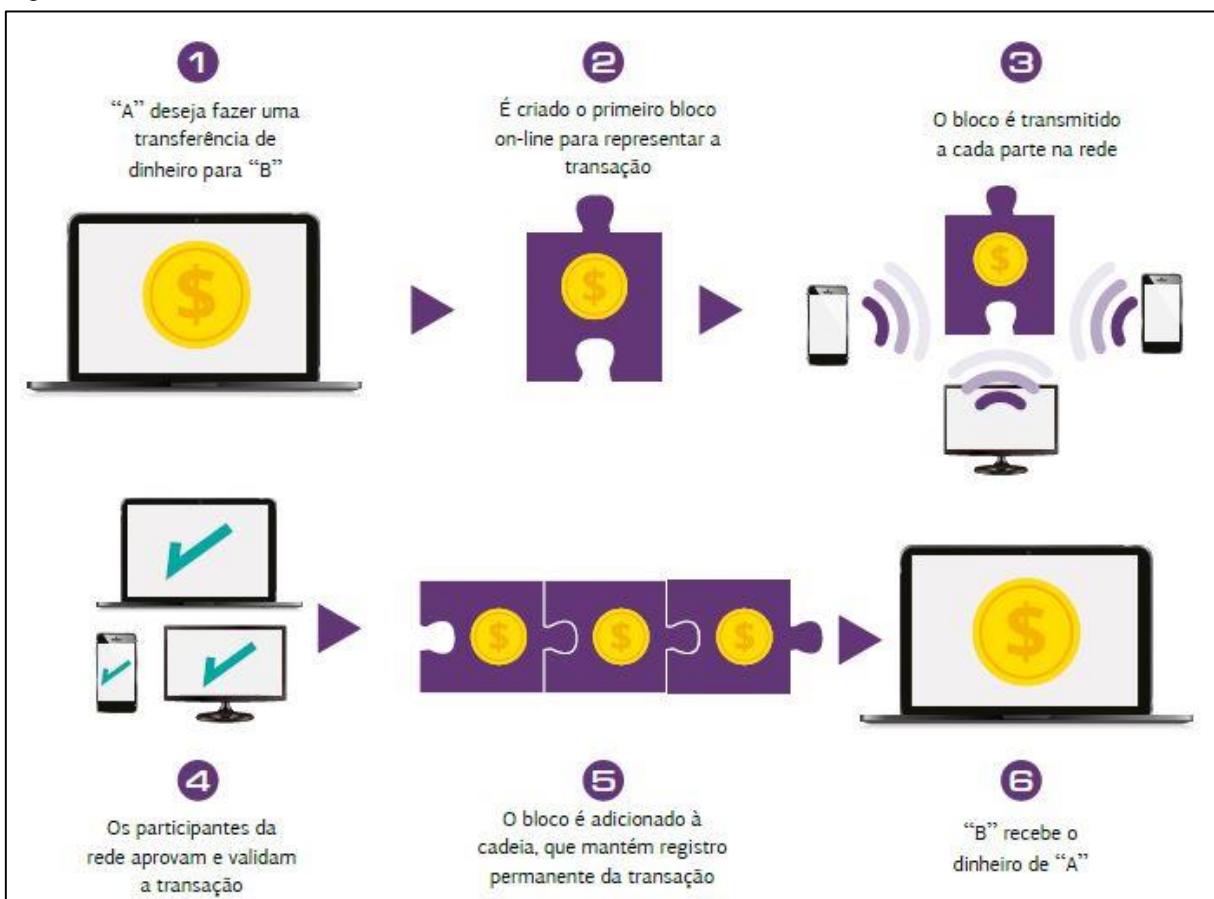
Blockchain pertence à classe de *Distributed Ledger Technology* (DLT), que é um banco de dados distribuído estruturado como um livro-razão. Isso significa que ele registra todo o histórico de transações nos dados que armazena, e várias cópias do livro-razão estão disponíveis. Cada cópia é gerenciada por uma entidade chamada peer que significa nós de pares ou simplesmente pares. Os nós são uma rede de

computadores com papel fundamental, pois hospedam os livros-razão e os contratos inteligentes (Perboli *et al.*, 2020).

A Blockchain agrupa as transações em blocos, que são então adicionados ao livro razão, um após o outro (Zheng *et al.*, 2018). Como cada bloco contém o *hash* do seu antecessor, cada bloco não pode ser alterado sem alterar também todos os subsequentes.

Após a verificação e validação da informação, cria-se um registro desta com data e hora, sendo impossível a alteração dessa informação devido à criptografia. Esse registro está diretamente relacionado ao anterior e ao posterior, como se fossem correntes inseparáveis (Ulrich, 2014). A Figura 1 ilustra como funciona uma transação na blockchain.

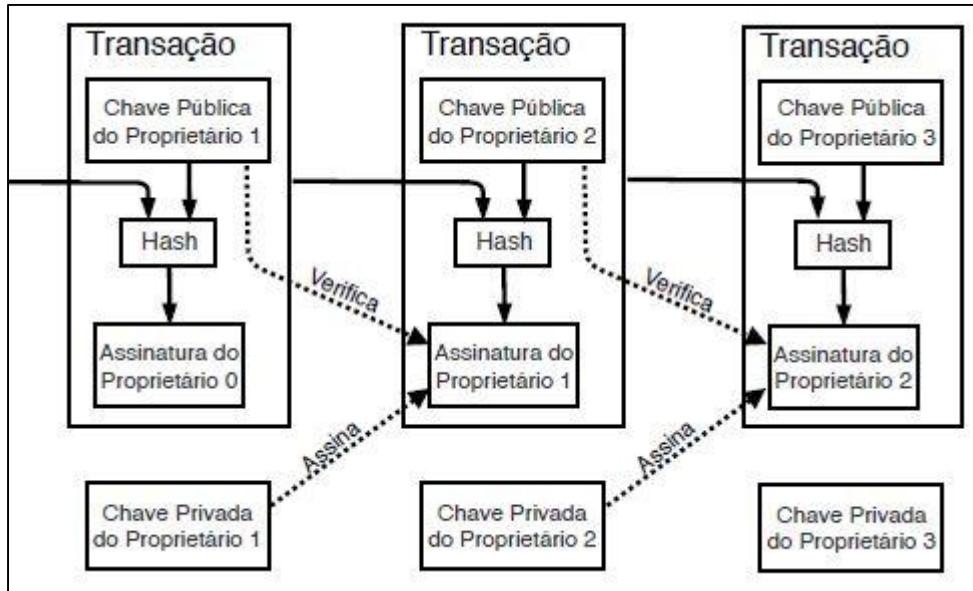
Figura 1 – Funcionamento de uma rede blockchain



Fonte: Diniz (2017).

A função *hash* é definida como um conjunto de dados matemáticos que geram um resumo numérico semelhante a uma impressão digital (Chicarino *et al.*, 2017). Uma assinatura digital é gerada ao criptografar a transação com a chave privada do proprietário. Além disso, o beneficiário tem a possibilidade de verificar toda a cadeia de propriedade do recurso que irá adquirir, conforme Figura 2 (Nakamoto, 2008).

Figura 2 – Estrutura básica de transações na rede blockchain



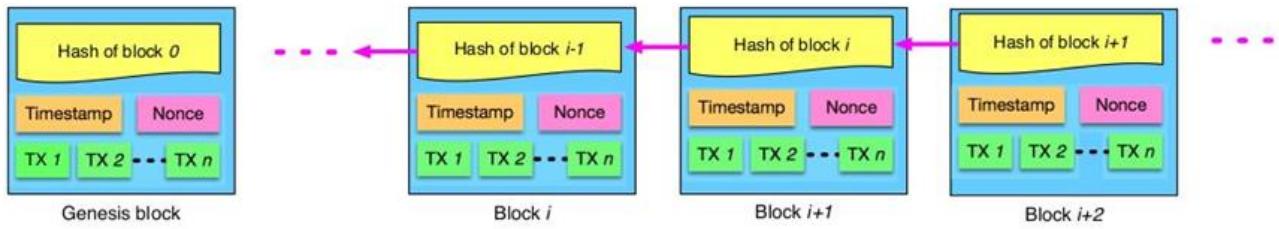
Fonte: Adaptado de Nakamoto (2008)

Após realizar a assinatura digital na transação, a rede distribuída verifica a veracidade do processo antes de inserir a nova transação no blockchain através do processo de mineração ou validação, gerando maior transparência e confiança. Ambos os processos, são responsáveis em inserir um novo bloco na rede após a aprovação de todos os nós presentes na rede blockchain (Abeyratne; Monfared, 2016).

A arquitetura de blocos encadeados de uma blockchain é apresentada na Figura 3. O primeiro bloco é conhecido como gênesis e cada bloco contém: as transações, um contador de transações, uma marca temporal do momento da sua criação e um campo *nonce* (número único) que é um valor numérico aleatório usado no processo de mineração de blocos para encontrar um *hash* ou chave criptográfica que atenda aos requisitos da blockchain (Olmo, 2024). O *nonce* é incrementado a cada criação de novo endereço *hash*.

Dessa forma, cada participante possui uma assinatura digital com um par de chaves, pública e privada, conhecida como assinatura assimétrica (Zheng *et al.*, 2017). Todas as transações são criptografadas com a chave privada do emissor. Ao receber a transação, o receptor que possui a chave pública do emissor, descriptografa a mensagem confirmando a autenticidade.

Figura 3 – Blocos de transação encadeados numa Blockchain



Fonte: Zheng *et al.*, (2017).

Já o *timestamp* (instante único), registra o momento exato em que o bloco foi criado, colaborando na inibição de possíveis fraudes na cadeia de blocos (Nakamoto, 2008).

Existem diversos tipos de blockchain, entre elas destacam-se as redes Bitcoin, Ethereum e Hyperledger. A rede blockchain Bitcoin é tanto um sistema de pagamentos digitais quanto o nome da criptomoeda da rede. As transações ocorrem por meio da validação do hash da transação anterior pelos nós participantes da rede utilizando o algoritmo de consenso PoW (*Proof-of-Work* ou Prova de trabalho) que também tem a funcionalidade de gerar blocos na rede e dar uma recompensa ao nó responsável tanto em resolver o problema matemático quanto por criar o bloco. Um bloco só é gerado após a validação da transação, e a adição do novo nó só é efetivada após a aprovação dos demais nós da rede (Hammi *et al.*, 2018).

O Ethereum consiste em uma blockchain pública utilizada no processamento de aplicativos e efetivações de transações financeiras por meio do fornecimento da criptomoeda Ether em aplicações descentralizadas. Os usuários podem replicar, validar e armazenar dados na rede, além de executar contratos inteligentes através do ambiente de execução *Ethereum Virtual Machine* (Hammi *et al.*, 2018).

Por fim, o Hyperledger Fabric (HLF) é uma plataforma corporativa para soluções de redes blockchains, sustentada por uma arquitetura modular que oferece elevado grau de confidencialidade. O Hyperledger foi elaborado para fins corporativos possibilitando uma rede privada na qual todos os integrantes são conhecidos. Contratos inteligentes podem ser desenvolvidos na HLF para fins empresariais. Quanto à verificação da confiabilidade do sistema, baseia-se pela inviolabilidade do mecanismo de consenso. A segurança do algoritmo de consenso é baseada no consenso bizantino (Lepoint; Ciocarlie; Eldefrawy, 2018).

Além disso, as blockchains podem ser categorizadas relativamente ao seu modelo de governança. De acordo com esse modelo, é possível determinar quem está autorizado a participar, manter uma cópia do livro-razão atualizado na sua posse, e a executar os mecanismos de consenso implementados por essa blockchain (Buterin, 2015). Sendo assim, as blockchain podem ser:

- **Pública:** Qualquer nó pode ingressar no sistema blockchain e participar do protocolo de consenso. Uma blockchain pública pode ser utilizada para resolver questões de confiança entre seus participantes, pois qualquer interessado pode ingressar na rede, obter uma cópia completa do livro-razão e validar de forma autônoma as transações nele contidas. Exemplo à rede do Bitcoin, do Ethereum e outras criptomoeda apresentam tais características.
- **Privada:** Grupo fechado que habilita membros com interesse comum em colaboração permissões são centralizadas em uma organização. A escrita e a leitura podem ser públicas ou restritas, dependendo da política de acesso. Exemplo a Hyperledger Fabric.
- **Híbrida ou Consorciada:** Caracterizada por definir um conjunto de nós que fazem parte da rede com direito de leitura público ou restrito, por conta desta característica é considerada parcialmente descentralizada. Exemplo a Hyperledger Fabric.

Como as blockchains públicas não restringem o acesso aos seus livros-razão, elas são blockchains sem permissão. Da mesma forma, blockchains privadas e consorciadas são blockchains permissionadas, pois permitem a configuração de mecanismos de controle de acesso. No entanto, blockchains privadas e de consórcio raramente são soluções tecnológicas intercambiáveis e devem ser utilizadas em casos diferentes (Lin; Liao, 2017).

A tecnologia blockchain pode exercer impactos na estrutura de governança das organizações. Segundo Gaur *et al.* (2018), a governança é um órgão centralizado ou descentralizado que tem por objetivo propor regras e leis em um sistema que possibilite tomar decisões vinculantes. Ou seja, é uma estrutura para guiar o processo decisório, para estabelecimento de funções e responsabilidades. Isso inclui o gerenciamento da infraestrutura de tecnologia, controle dos dados e dos contratos inteligentes.

Estruturas de governança podem variar da total descentralização, até as redes de blockchain completamente centralizadas. Essas estruturas de governança impactam tanto no *design* das redes blockchain, *design* das operações, até os modelos de crescimento (Hileman; Rauchs, 2017; Gaur *et al.*, 2018).

Portanto, a gestão de negócios que faz o uso da tecnologia blockchain deve levar em consideração as particularidades de cada caso, a existência de uma estrutura de governança multiorganizacional, a necessidade dos participantes de apresentarem um elevado conhecimento dessa tecnologia. Deve-se ressaltar também que a inclusão ou remoção de participantes, provoca alterações na dinâmica de toda a rede blockchain (Hileman; Rauchs, 2017; Gaur *et al.*, 2018).

A blockchain como toda tecnologia possui características específicas, Zheng (2018) considera que as propriedades a seguir tornam a blockchain particularmente interessante em campos industriais:

- **Redundância e persistência:** Cada ponto mantém uma cópia do livro-razão, o que reduz o risco de perda de dados.
- **Descentralização:** Sobre o livro-razão em si. Notavelmente, esta propriedade é uma consequência do modelo de governança descentralizado de um sistema blockchain e não da sua natureza distribuída.
- **Autenticidade:** As transações são assinadas digitalmente.
- **Autonomia:** Os pares podem enviar transações sem depender de terceiros confiáveis.
- **Imutabilidade:** Os dados só podem ser adicionados à rede, mas não podem ser modificados, pois o *hash* de um bloco alterado não corresponderia ao armazenado em seu sucessor. É importante salientar que, cada nó tem acesso direto à sua própria cópia do livro-razão. Além disso, é possível saber a situação do livro-razão em qualquer momento do passado, pois todo o histórico de modificações é registrado.
- **Resiliência:** Para falsificar o livro-razão, seria necessário modificar de forma coerente a maioria de suas cópias. Conforme observado para a propriedade

de imutabilidade, a resiliência de um sistema blockchain é proporcional à sua descentralização.

- **Padronização:** Como muitos pares devem manter cópias idênticas, todos devem concordar com a codificação dos dados.

2.2 ALGORITMOS DE CONSENSO

Como um sistema blockchain é gerenciado por muitos pares, esses precisam encontrar um acordo sobre a ordem das transações a serem processadas. A decisão é tomada através do uso de um algoritmo de consenso (Baliga, 2020; Xiago *et al.* 2020). Essa decisão pode ter:

- **Finalidade determinística:** Uma vez tomada, a decisão é irreversível.
- **Finalidade probabilística:** Uma vez tomada, a probabilidade de reverter à decisão diminui com o tempo.

Desta forma, o objetivo principal do algoritmo de consenso é obter a confiabilidade em uma rede com vários nós, garantindo que o próximo bloco da rede seja totalmente validado e protegido. Os diferentes algoritmos de consenso para uma rede blockchain são:

a) Pow (*Proof-of-Work* ou *Prova de trabalho*): O Pow funciona por meio de uma competição entre os nós da rede para resolver o problema matemático que é a transação. O nó responsável em resolver o problema matemático será o criador do bloco e receberá uma recompensa, assim, o consenso será transmitido a todos os nós da rede. Entretanto, esse mecanismo envolve taxas altas de transação, alto nível computacional e processos complexos de mineração (Nawari; Ravindran, 2019).

b) PoS (*Proof-of-Stake* ou *Prova de jogos*): O PoS é semelhante ao algoritmo PoW, porém tem como diferença principal o método de escolha do validador da rede e busca reduzir os custos energéticos no processo de mineração. O nó responsável em validar a rede será escolhido a partir de algum critério de seleção, como por exemplo, escolher um integrante da rede que possua em sua carteira o maior número de criptomoedas (Miers *et al.*, 2019).

c) PoB (*Proof-of-Burn* ou *prova de Fogo*): O algoritmo PoB funciona de forma mais simples. Todos os integrantes da rede PoB enviarão suas moedas a um endereço não suspenso retirando moedas de circulação ou “queimando-as”. O objetivo principal de retirar uma determinada quantia de circulação é demonstrar o compromisso entre os participantes da rede, adiando seus lucros. Dessa forma, o usuário terá mais

chances em validar o próximo bloco e aumentar suas recompensas (Coinbundle Team, 2018).

d) PBFT (*Practical Byzantine Fault Tolerance* ou Consenso tolerante a falhas bizantinas): Ele busca manter o funcionamento correto de uma rede de computadores por meio do consenso. Esse funcionamento é mantido mesmo existindo componentes maliciosos (nós) que podem provocar falhas na rede e propagar informações incorretas sobre as transações. O algoritmo tolera no máximo 1/3 de componentes maliciosos, validando a transação com 2/3 dos nós honestos. Dessa forma, o principal objetivo da rede é defender-se contra-ataques maliciosos, reduzir a influência de nós maliciosos sobre a rede e tornar o consenso determinístico (Miers *et al.*, 2019).

e) PoET (*Proof-of-Elapsed-Time* ou Prova de tempo decorrido): PoET usa um modelo de eleição de líder aleatório ou um modelo de eleição baseado em loteria baseado em *Software Guard Extensions* (SGX), onde o protocolo seleciona aleatoriamente o próximo líder para finalizar o bloco. O algoritmo de eleição aleatória de líderes usa este modelo para lidar com nós não confiáveis e participação aberta de nós no algoritmo de consenso. Para que o consenso funcione corretamente, ele deve distribuir aleatoriamente a eleição do líder entre todos os nós participantes disponíveis e precisa de uma forma segura para que outros nós verifiquem se um determinado líder foi selecionado corretamente, sem qualquer possibilidade de manipulação. Isto é conseguido através do *Trusted Execution Environment* (TEE) para garantir a segurança e a aleatoriedade na eleição de um líder (Baliga, 2020).

Cabe destacar, que o tipo de governança tem relação direta com os mecanismos de consenso, pelo motivo que influenciam diretamente no desempenho da rede. Redes como Bitcoin e Ethereum possuem características de blockchain pública, utilizam o algoritmo de consenso PoS. Já redes como Hyperledger e Ripple são privadas com algoritmo de consenso PBFT, pois todos os integrantes da rede são conhecidos. A grande vantagem dessas redes está no tempo de processamento do bloco e na redução do gasto energético computacional (Chicarino *et al.*, 2017). O Quadro 1 sintetiza essas informações.

Quadro 1 – Comparativo entre as redes blockchain

Blockchain	Bitcoin	Ethereum	Hyperledger	Ripple
Governança	Público	Público	Privado	Privado
Consenso	PoW	PoS	PBFT	PBFT
Linguagem	Scripts	Solidity, C++, Go, Java Script, Python	Go, Java Script, Node.JS	C++
Propósito	Criptomoeda	Contrato Inteligente	Chaincode	Criptomoeda
Tempo de processamento	600s	15s	Milissegundos	Milissegundos

Fonte: Adaptado de Chicarino *et al.* (2017) e Miers *et al.*, (2019).

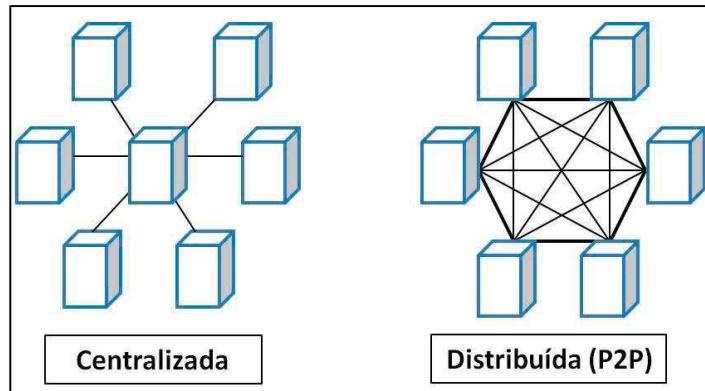
Vale ressaltar que o *chaincode* é o contrato inteligente que realiza as transações de acordo com o conceito Hyperledger.

2.3 REDE PEER - TO - PEER

A descentralização proporcionada pelo uso da tecnologia blockchain implica que nenhuma entidade presente na rede controle às regras de negócio. Para tal, além dos algoritmos de consenso, as redes blockchain devem ser organizadas em redes ponto-a-ponto, ou (P2P) (Furlonger; Uzureau, 2019; Antonopoulos, 2017). A rede *peer-to-peer* apresenta várias definições devido à sua aplicação múltipla. Assim, pode-se definir como uma rede em que todos os seus computadores estão interligados em uma cadeia descentralizada, sendo que cada um possui uma função específica (Scremin, 2007).

Essas redes são uma arquitetura de sistema onde os computadores presentes se interconectam sem a presença de um servidor central, conforme ilustrado na Figura 4 cada ponto na rede é um cliente e um servidor (Antonopoulos, 2017).

Figura 4 – Diferenças entre redes centralizadas e redes



Fonte: Adaptado de Gaur *et al.*, (2018).

A rede blockchain tem em sua essência a rede *peer-to-peer* com característica descentralizada e com vários nós, em que todos os participantes da rede são iguais e todos se conectam em uma rede sobreposta, onerados para garantir o seu funcionamento. Cada nó pode apresentar quatro funções: roteamento, mineração, base de dados blockchain e carteira. Um nó pode ser considerado completo quando acumulam as quatro funções, porém um nó, no mínimo, deve possuir a função de roteamento (Chicarino *et al.*, 2017).

Cada nó possui funções demandadas pelo seu usuário. Por exemplo, o usuário que utiliza a rede para realizar pagamentos e transferências necessita ter um nó com duas funções: roteamento, para estar conectado à rede; e a função carteira, que permite realizar transações sem a necessidade de armazenar informações das transações realizadas (Chicarino *et al.*, 2017).

2.4 HYPERLEDGER FABRIC

A Hyperledger Fabric (HLF) é uma estrutura projetada para o desenvolvimento de blockchains empresariais e permissionadas. Segundo Capocasale (2023), a HLF oferece uma arquitetura modular e escalável, permitindo a escrita de contratos inteligentes em diferentes linguagens de programação. Isso possibilita a expansão e aprimoramento do sistema com um alto grau de confiabilidade. Além disso, a Hyperledger permite a customização de diversos componentes, como o mecanismo de consenso, a ordenação de transações, a inclusão e o processo de propagação dos blocos para todos os nós (Greve *et al.*, 2018).

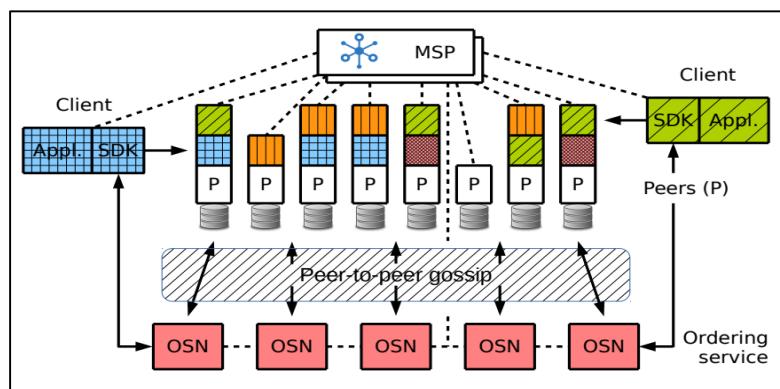
Conforme detalhado por Androulaki *et al.*, (2018), a HLF consiste em um conjunto de nós que formam uma rede permissionada conforme Figura 5. Nesta rede, todos os nós participantes possuem uma identidade fornecida por uma associação modular de provedor de serviços. Os principais tipos de nós no Fabric são: Clientes (*Clients*), Pares (*Peers*) e Solicitantes (*Orderers*).

- **Clientes (*Clients*):** Submetem as propostas de transação para execução, auxiliam a orquestrar a fase de execução e transmitem as transações para os ordenadores.

- **Pares (*Peers*):** Executam e validam as propostas de transação. Nem todos os pares podem executar as transações; apenas um subconjunto de pares, chamados de endossantes, pode executar as transações conforme estabelecido pela política de endosso.

Solicitantes (*Orderers*): Agregam as transações em blocos e garantem a ordem correta das transações na blockchain.

Figura 5 – Uma rede Fabric com MSPs federados e em execução com vários chaincoides instalados



Fonte: Adaptado de Androulaki *et al.*, (2018)

Como descrito por Capocasale (2023) as transações na HLF são processadas em três etapas distintas: Execução, Ordenação e Validação.

- **Execução:** A política de endosso define quais pares podem executar determinada transação. Dessa forma, o cliente envia uma proposta de atualização do livro-razão apenas aos seus pares endossantes. Os pares endossantes processam a proposta de atualização sem efetuar a atualização imediata em suas cópias do livro-razão para que, posteriormente, retornem uma resposta aos clientes que deve ser encaminhada ao solicitante.
- **Ordenação:** Os nós do serviço de ordem recebem as respostas das propostas das transações previamente endossadas. Esses nós organizam as transações de acordo com a ordem de recebimento e, em seguida, criam os blocos de transações que serão distribuídos para todos os pares do canal.
- **Validação:** Verifica-se a exatidão de cada transação dentro do bloco recebido. Em seguida, atualiza-se a cópia do livro-razão. Entre outras verificações, consideram-se inválidas as transações que apresentarem conflitos de leitura ou gravação com uma transação anterior do mesmo bloco.

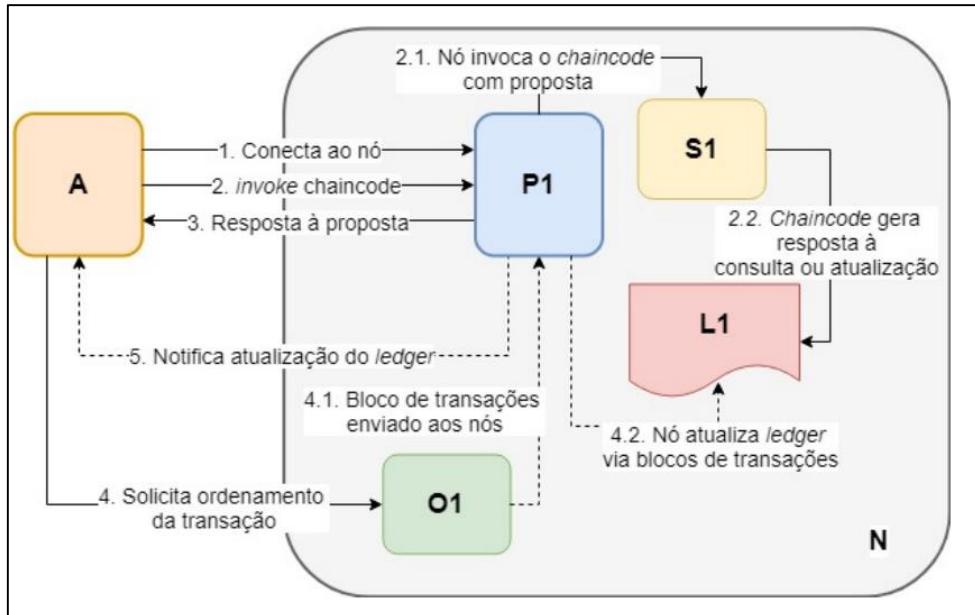
2.4.1 Arquitetura Hyperledger Fabric

A Hyperledger Fabric adota um novo modelo de arquitetura de transações composto por três passos conhecidos como *execute*, *order* e *validate*. No primeiro passo, a transação é executada, verificada quanto à exatidão e endossada. No segundo passo, as transações são ordenadas utilizando um mecanismo de consenso. No terceiro passo, as transações são validadas por meio de uma política de validação específica da aplicação, antes de serem adicionadas ao *ledger*. Essa política de validação especifica quais e quantos *peers* devem validar a execução do *chaincode* (Miers *et al.*, 2019).

Ainda segundo Miers *et al.* (2019), essa arquitetura incorpora características que abordam desafios relacionados à escalabilidade, desempenho e confidencialidade presentes no modelo tradicional *order-validate*, ordenar-validar. Por exemplo, conforme exemplificado pelos autores, um *chaincode* que resulte em um loop infinito teria consequências críticas em uma arquitetura *order-execute*. No entanto, o modelo *execute-order-validate*, executar-ordenar-validar, é capaz de identificar esse problema na primeira etapa de execução, onde os nós endossam as transações antes de submetê-las à validação.

No HLF, a execução e a interação com os chaincodes são realizadas por meio de transações, que podem ser de dois tipos, *invoke* (invocar) e *query* (consultar) com mostrado na Figura 6 (Dhillon *et al.*, 2017). A transação do tipo *invoke* executa um *chaincode* na blockchain, enquanto a transação *query* executa uma consulta. Através de uma transação *invoke* é possível a um cliente executar uma função específica contida em um *chaincode*.

Figura 6 – Fluxo de transações no Hyperledger Fabric



Fonte: Adaptado de Hyperledger Fabric (2020).

Neste exemplo, a aplicação A conecta ao nó P1 e realiza um *invoke* do *chaincode* S1 para atualizar o *ledger* L1. O nó P1 invoca S1, obtém o resultado da atualização e retorna a resposta para A. A aplicação A recebe a resposta, monta uma transação com todas as respostas e envia ao ordenador O1. Se a solicitação fosse apenas uma consulta, o processo estaria completo. O ordenador então coleta as transações, as agrupa em blocos e os distribui para todos os nós da rede. O nó P1 valida a transação antes de adicioná-la ao *ledger* e, finalmente, gera um evento e o envia para a aplicação A (Miers *et al.*, 2019).

2.4.2 Membership Service Provider

Na Hyperledger, para que um usuário obtenha acesso ao sistema, é necessário registrar sua participação utilizando o Serviço de Provedor de Filiação *Membership Service Provider* (MSP). Dessa forma, o MSP mantém as identidades de todos os nós do sistema (*clients*, *peers* e *orderers*) e é responsável por emitir credenciais do nó que são utilizadas para autenticação e autorização (Androulaki *et al.*, 2018). Esse processo possibilita o uso de consensos bizantinos, eliminando a necessidade de consensos baseados em prova de trabalho (PoW) para validação das transações e proteção da rede. Dessa forma, as transações são promovidas de maneira segura, privadas e confidenciais (Greve *et al.*, 2018).

Conforme detalhado por com Androulaki *et al.* (2018), a implementação padrão do MSP no HLF utiliza-se os métodos de Infraestrutura de *Public Key Infraestruture* (PKI) padrão para autenticação baseada em assinaturas digitais e suporta integração com Autoridades Certificadoras (CAs) comerciais. O MSP permite configurar uma rede blockchain de duas maneiras distintas:

- **Modo Offline:** Neste modo, as credenciais são geradas por uma CA e distribuídas fora de banda para todos os nós. Apenas pares e ordenadores podem ser registrados neste modo.
- **Modo Online:** Utilizando o Fabric-CA, este modo emite credenciais criptográficas diretamente para clientes, oferecendo um processo de inscrição online.

2.4.3 Canais

Na HLF os canais permitem que as organizações participem de múltiplas redes blockchain diferentes. Toda transação deve ser executada em um canal, no qual todos os participantes devem ser autenticados e autorizados a realizar transações. Os canais são definidos por nós membros (*peer*) pertencentes às organizações participantes, nós âncora (*anchor peer*), nós de ordenamento das transações (*order peer*), *ledger* e *chaincode* (Miers *et al.*, 2019). As funções atribuídas aos nós pertencentes à rede podem ser:

- **Endorser peer:** Responsável pela recepção de solicitações de invocação de transações, validação das transações e execução de *chaincode*.
- **Anchor peer:** Responsável pela comunicação com o *orderer peer* e pela disseminação dos resultados das transações para outros peers na rede.

- **Orderer peer:** Desempenha um papel central na rede, sendo responsável por manter sua consistência.
- **General peer:** Peers que não possuem funções específicas mencionadas acima, mas participam da rede executando e validando transações conforme necessário. A configuração de um canal no Hyperledger Fabric, conforme detalhado por Androulaki *et al.* (2018), envolve várias fases essenciais:
 - Definição dos MSP para os nós participantes.
 - Estabelecimento dos endereços de rede dos *Orderer Service Nodes* (OSN).
 - Configuração compartilhada para a implementação de consenso e o serviço de pedidos.

Para atualizar a configuração do canal, uma transação específica de atualização é utilizada. Esta transação inclui uma representação das alterações propostas e um conjunto de assinaturas necessárias para autorização. Os nós do serviço de pedidos verificam a validade da atualização utilizando a configuração atual para garantir que as mudanças estejam de acordo com as assinaturas fornecidas. Após a validação, os nós de solicitação geram um novo bloco de configuração que incorpora tanto as novas configurações quanto a transação de atualização. Os peers que recebem este bloco validam a autorização da atualização com base na configuração existente. Se aprovada, os peers atualizam sua configuração vigente conforme descrito por Androulaki *et al.* (2018).

2.4.4 Ledger

O *ledger* é uma estrutura de dados imutável, em que transações são registradas e o estado global do sistema é mantido. O *ledger* mantém-se completamente replicado em todos os nós da rede P2P (Greve *et al.*, 2018). Este livro-razão é composto de transações assinadas criptograficamente e agrupadas em blocos. Cada bloco está ligado criptograficamente com o bloco anterior através de uma validação utilizando um mecanismo de consenso. Conforme os novos blocos são adicionados à cadeia, torna-se mais difícil a alteração dos blocos antigos (Yaga *et al.*, 2018).

A componente razão mantém o histórico das transações e o estado atual do sistema no armazenamento persistente, permitindo as fases de simulação, validação e atualização das transações (Androulaki *et al.*, 2018). Já o *Peer Transaction Manager* (PTM) mantém o estado mais recente do sistema utilizando uma estrutura que associa chaves a valores, juntamente com uma versão de cada entrada. Essa versão é

composta pelo número do bloco e o número da transação dentro desse bloco, garantindo uma identificação única e crescente para cada estado, bem como, o PTM tem mecanismos de tolerância de falhas lida com três fases distintas (Androulaki *et al.*, 2018):

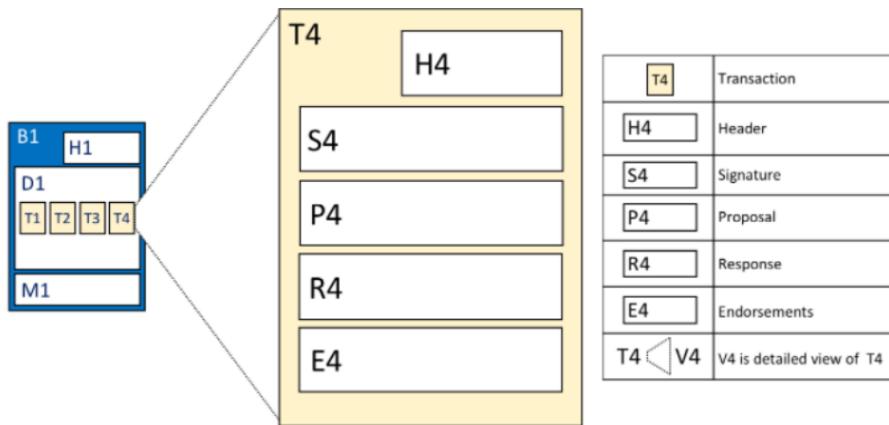
- **Simulação:** O PTM fornece um instantâneo estável, ou seja, uma cópia consistente e imutável do estado atual e registra todas as leituras e escritas feitas pela transação em conjuntos de leitura (*readset*) e escrita (*writeset*), respectivamente. Isso permite testar a transação antes de aplicá-la efetivamente ao *ledger*.
- **Validação:** O PTM valida às transações em um bloco sequencialmente, verificando se há conflitos com transações anteriores. Ele compara as versões das chaves no *readset* com as versões atuais no estado para garantir consistência e marcar as transações como válidas ou inválidas.
- **Atualização:** Após a validação, o PTM grava o bloco no armazenamento, atualiza os índices de armazenamento e aplica as mudanças de estado das transações válidas ao armazenamento local. Finalmente, persiste um *savepoint* que indica o maior número de bloco aplicado com sucesso, usado para recuperação em caso de falha.

2.4.5 Chaincode

Chaincode em uma rede HLF, é denominado como um contrato inteligente que pode ser escrito nas linguagens de programação Go, Java e Node.Js. Para que haja interações com o *chaincode*, é necessário que sejam feitas algumas transações, podendo ser: uma transação *Invoke* que altera o estado do livro razão ou uma transação *Query* que permite realizar consultas, por exemplo. (Group *et al.*, 2017)

Na HLF SDK, o *chaincode* é invocado recebendo uma notificação da conclusão de uma transação na rede blockchain, sendo ela válida ou não. Somente as transações que são assinadas pelas organizações que fazem parte do contrato inteligente permitem a atualização do estado global de um ativo (Group *et al.*, 2017). A Figura 7 mostra os campos que compõem uma transação.

Figura 7 – Componentes das Transações no Hyperledger Fabric



Fonte: Adaptado de Group *et al.*, (2017)

- **Cabeçalho (H4):** é o local onde são inseridas informações essenciais da transação, como o nome e a versão do *chaincode*.
- **Assinatura (S4):** criptografada e gerada pelo aplicativo cliente. Permite verificar a integridade da transação e garante que não sejam modificados os detalhes da transação.
- **Proposta (P4):** codifica os parâmetros de entrada fornecidos por um aplicativo para o *chaincode*. Ao ser executada pelo *chaincode*, utiliza os parâmetros de entrada em conjunto com o estado global atual para determinar o novo estado global do ativo.

2.4.6 Política de Endosso

Cada *chaincode* na Hyperledger Fabric possui uma política de endosso, definida como o conjunto de regras que especifica quais organizações (por meio de seus *peers*) devem executar e aprovar uma transação para que esta seja considerada válida na rede. Em outras palavras, trata-se de um mecanismo que garante que apenas transações devidamente avaliadas pelas partes interessadas sejam incluídas no *ledger* distribuído.

Na etapa de validação, cada par da rede verifica se a transação contém o número apropriado de endossos e se eles provêm das fontes esperadas, conforme a política estabelecida. Além disso, as assinaturas digitais associadas aos endossos são verificadas quanto à sua legitimidade, assegurando que foram emitidas por certificados válidos (Hyperledger Fabric, 2023).

Um exemplo ilustrativo está na criação de um ativo, como um carro, em um canal de negociação. Nesse caso, a “emissão” do carro, ou seja, o registro do par chave-valor que o representa no estado global deve necessariamente obedecer à política de endosso definida para o *chaincode* (Hyperledger Fabric, 2023).

Se a chave que representa o carro exigir uma política de endosso específica, ela poderá ser definida quando o carro for criado ou posteriormente. Há vários motivos pelos quais pode ser necessário ou preferível definir uma política de endosso específica para o estado. O carro pode ter importância ou valor histórico que exija o endosso de um avaliador licenciado. Além disso, o proprietário do carro (se for membro do canal) também pode querer garantir que seu colega aprove a transação. Em ambos os casos, uma política de endosso é necessária para um ativo específico, diferente das políticas de endosso padrão para os outros ativos associados a esse *chaincode* (Hyperledger Fabric, 2023).

2.4.7 Plataforma GoFabric

A plataforma GoFabric foi projetada para facilitar a orquestração de redes de blockchain permissionadas utilizando a tecnologia Hyperledger Fabric. Ela visa abordar as complexidades envolvidas no gerenciamento de uma rede de blockchain corporativa em crescimento, incluindo a integração de novos nós, organizações e contratos inteligentes sem a necessidade de programação de um código. Crucialmente, ela enfatiza a governança de rede eficiente e consistente.

Desenvolvido pela GoLedger, o GoFabric oferece uma solução abrangente para criar uma tecnologia DLT completa, fornecendo todos os artefatos necessários para a orquestração de contratos inteligentes (GoLedger, 2024).

Segundo Huynh e Doan (2022), a orquestração de contratos inteligentes refere-se à coordenação automatizada de múltiplas ações contratuais, permitindo que processos complexos sejam executados de forma sequencial e integrada. Essa abordagem é fundamental para garantir que regras contratuais, como validações de entrega, conferência de qualidade e liberação de pagamento sejam acionadas em resposta a eventos ou condições específicas, com confiabilidade e rastreabilidade.

A orquestração baseada em blockchain permite a execução de contratos inteligentes por meio de fluxos encadeados que integram dados externos, sensores, agentes humanos e sistemas corporativos, promovendo automação e auditabilidade em tempo real. Essa arquitetura, especialmente quando implementada em redes como a Hyperledger Fabric, possibilita uma estrutura do tipo executar-ordenar-validar, essencial para aplicações na construção civil, onde a sequência lógica e a confiabilidade das etapas executadas são determinantes para o sucesso contratual (Huynh; Doan, 2022).

Além disso, a GoFabric realiza o instanciamento de uma rede blockchain permissionada utilizando a tecnologia Hyperledger Fabric, possibilitando que várias organizações e seus nós possam ser incluídos, assim como os contratos inteligentes. Com ele é possível criar, expandir e trabalhar na governança de redes blockchains escaláveis. A solução GoFabric funciona em sistema operacional Linux e suporta a orquestração de um número ilimitado de nós na rede blockchain. Os nós da rede podem ser instanciados em qualquer nuvem privada, híbrida ou pública, sendo uma plataforma que consegue atuar de forma distribuída independentemente do local de processamento das máquinas virtuais (GoLedger, 2024).

2.5 MODELAGEM DE DADOS

Atualmente, existem volumes muito grandes de dados, não sendo viável a manutenção em papéis como antigamente. A tecnologia de banco de dados foi desenvolvida para auxiliar na dificuldade de guardar tais volumes de forma estruturada e otimizar a recuperação destas (Pequeno *et al.*, 2020).

A modelagem de dados é o principal componente de informações conceituais do banco de dados, dentre as técnicas para essa modelagem, a entidade-relacionamento apresentada em 1976 por Peter Chen (Chen, 1976; Navathe; Elmasri, 2005), e ainda largamente pela sua simplicidade e legibilidade, produzindo um modelo que seja inteligível para o desenvolvedor do banco, assim como pelo usuário final (Bagui; Earp, 1964; Teorey *et al.*, 2006; Silberschatz *et al.*, 2006).

Modelar conceitualmente uma realidade é uma das etapas da construção de um Sistema de Informação (Almeida; Oliveira; Coelho, 2010). A modelagem conceitual objetiva a compreensão e representação do mundo real, de tal forma que ele possa ser traduzido em um modelo que capte os aspectos que se deseja estudar de uma realidade. Na ciência da computação um projeto de banco de dados, muitas vezes pode ser uma tarefa difícil por ser necessário que o projetista compreenda as necessidades dos usuários e tenha a capacidade de representá-las. Para isso é necessário que ele consiga entender de forma clara a realidade que está sendo modelada. Muitas vezes o projetista não possui conhecimento sobre o domínio modelado, reforçando a necessidade da interação com o usuário, convededor deste domínio (Almeida; Oliveira; Coelho, 2010).

Na fase do projeto em que se modela conceitualmente um banco de dados, o enfoque está na construção de uma representação de alta qualidade dos fenômenos selecionados de domínio (Sommerville, 2003). Neste caso, na modelagem conceitual busca-se a identificação, descrição e entendimento de um domínio, processo que permitirá estruturar os conceitos e as relações, nele inseridas (Maia; Alvarenga, 2014).

Um projeto de banco de dados é separado em três etapas, cada uma com seu significado e importância. No desenvolvimento inicial de um projeto desta modalidade é utilizado o Modelo Entidade-Relacionamento (MER). A representação do MER através de figuras é chamada de Diagrama de Entidade-Relacionamento (DER), a partir dessas representações são geradas as estruturas físicas no banco de dados, utilizando conjuntos de comandos na linguagem SQL, *Structured Query Language*, ou Linguagem de Consulta Estruturada, em português, chamados de scripts (Pequeno *et al.*, 2020).

Há os bancos de dados de código aberto, como o MySQL, que não é propenso a falhar mesmo sob carga, é leve, o que significa que não requer muitos recursos para instalar ou executar, é rápido e fácil de usar. Finalmente, o MySQL é robusto, com todos os recursos necessários para aplicações web (Suehring; Converse; Park, 2009).

A modelagem de dados desempenha um papel fundamental na etapa inicial de desenvolvimento de um contrato inteligente. Ela garante a integridade dos dados no fluxo de transações, identificando entidades essenciais, seus relacionamentos, e definindo os atributos necessários para desenvolvimento da rede blockchain. Sendo assim, percebe-se a necessidade de estruturar o projeto de sistemas de banco de dados através da geração de ferramentas como o MER e o DER que auxiliem este processo primário.

2.5.1 Modelo Entidade-Relacionamento

É um modelo popular para modelagem conceitual de dados. Esse modelo e suas variações, como o Modelo Entidade- Relacionamento Estendido são frequentemente usados para o projeto conceitual de aplicações de banco de dados. As extensões do ER são geralmente usadas na modelagem conceitual de bancos de dados mais complexos, como os bancos de dados científicos (Santos, 2017). O ER se baseia em três conceitos básicos: entidades, atributos e relacionamentos (Ribeiro, 1992; Ali *et al.*, 2010).

Uma entidade representa um elemento do mundo real, como um funcionário ou uma disciplina. Para Silva (2008) um atributo pode ser:

- **Simples ou atômico:** quando não pode ser dividido, como nome; composto, que é dividido em várias partes, como endereço, que é dividido em rua, número e CEP.
- **Valor único:** que tem um só valor para uma determinada entidade, como idade.
- **Multivalorado,** que pode assumir vários valores para uma determinada entidade, como telefone.

- **Derivado:** que é um atributo que pode ser determinado a partir de outros atributos, como idade, que pode ser calculada a partir da data de nascimento e da data de hoje.

Um banco de dados pode conter grupos de entidades que são similares, ou seja, compartilham dos mesmos atributos. Contudo, cada entidade tem um valor para cada atributo, esse grupo de entidades similares é chamado de tipo de entidade, sendo que cada tipo de entidade é descrito por seu nome e seus atributos (Moraes, 2015; Muslah; Ghoul, 2019). Por exemplo, Empregado é um tipo de entidade que contém os atributos Cadastro de Pessoa Física (CPF), nome, idade e salário.

Todo tipo de entidade tem um ou mais atributos chave, cujos valores são distintos para cada entidade do conjunto de entidades. Portanto, os valores desses atributos podem identificar uma única entidade (Santos, 2017). Para o tipo de entidade Empregado, podemos usar o CPF como atributo-chave. Os tipos de entidade que não tem atributos-chave são chamados de tipos de entidade fraca. Sua chave será determinada por um tipo de relacionamento com uma entidade forte (Panigassi, 2007; Ali *et al.*, 2010).

Um relacionamento se dá entre duas ou mais entidades e representa uma associação entre estas, como o relacionamento trabalha entre um funcionário e um projeto. Um conjunto de associações ou relacionamentos entre entidades é definido como um tipo de relacionamento entre tipos de entidade. Todo tipo de relacionamento contém um grau, que indica o número de tipos de entidade que participam desse relacionamento (Moraes, 2015; Muslah; Ghoul, 2019).

Os tipos de relacionamento podem conter atributos, por exemplo, o tipo de relacionamento em atribuir horas para indicar quantas horas cada empregado trabalha em um departamento. Os tipos de relacionamento de grau dois, ou binários apresentam dois tipos de restrições: a de cardinalidade e a de participação. A cardinalidade de um relacionamento especifica o número máximo de instâncias do relacionamento em que uma entidade pode participar (Kazi *et al.*, 2014; Matos, 2016). Por exemplo, o tipo de relacionamento entre empregado e departamento tem cardinalidade N:1, o que significa que cada empregado pode trabalhar em somente um departamento, enquanto que em cada departamento podem trabalhar inúmeros empregados. As cardinalidades possíveis são: 1:1, 1: N, N:1 e M: N (Maia; Alvarenga, 2014).

Existem dois tipos de participação, a total e a parcial. Considerando que todo empregado deve trabalhar em um departamento, então, a participação de empregado no tipo de relacionamento é total. No entanto, no tipo de relacionamento gerenciado, pode-se dizer que a participação de empregado é parcial, pois nem todo empregado gerencia um departamento. Os diagramas ER são utilizados como uma notação diagramática associada ao modelo de ER (Silva, 2008).

2.5.2 Diagrama Entidade-Relacionamento

Um diagrama entidade relacionamento é um tipo de fluxograma que ilustra como entidades, pessoas, objetos ou conceitos, se relacionam entre si dentro de um sistema. Também conhecidos como DERs, ou modelos ER, usam um conjunto definido de símbolos geométricos e linhas de conexão para representar a interconectividade de entidades, relacionamentos e seus atributos. As entidades representam um objeto ou conceito da realidade e os relacionamentos exibem qual a ligação entre elas, utilizando das cardinalidades para definir a sua interação (Sordi *et al.*, 2009; Genong *et al.*, 2010).

Entidades são representadas graficamente por retângulos no modelo, e possuem atributos, que são responsáveis por caracterizá-las, fazendo referência a dados como nome, sexo, telefone, endereço, etc. O atributo definido para representar a entidade é chamado de “Chave-Promissória” (Santos, 2017). Uma entidade pode ser definida como fraca quando seu campo identificador depende diretamente de outra entidade, não tendo sua própria chave.

Navathe e Elmasri (2005) podem existir diversos tipos de atributos em determinado diagrama: simples versus composto, monovalorado versus multivalorados, armazenado versus derivado. Os atributos compostos podem ser divididos em subclasses, como no caso de um atributo “Endereço”, que pode ser composto pelos atributos “Rua”, “Número”, “Bairro” e “Cidade”, por exemplo. Quanto a atributos multivalorados Navathe e Elmasri (2005) citam o exemplo de um atributo para representar a titulação de uma pessoa, afinal, pessoas distintas podem possuir diferentes números de titulações, que pode ser nenhuma, uma ou várias. No entanto, atributos derivados são aqueles que farão referência a um atributo armazenado, como no caso de data de nascimento (armazenado) e idade (derivado). O atributo idade irá variar de acordo com o atributo data de nascimento.

Contudo, nota-se que o projeto conceitual de banco de dados usando o modelo ER costuma ser uma tarefa difícil e complexa, principalmente para usuários iniciantes. Para

superar os obstáculos, ferramentas de criação de diagramas foram surgindo ao longo do tempo, dentre elas está o MySQL Workbench, que é uma ferramenta gráfica para trabalhar junto com os servidores MySQL sendo um programa gratuito com muitos recursos para facilitar o design do banco de dados. Um desses recursos é criar um diagrama ER aprimorado (Murray; Guimarães, 2009).

No Workbench os usuários podem arrastar e soltar ícones que representam tabelas e conectá-los usando relacionamentos 1:1 (identificadores ou não identificadores), ou 1:M (identificadores ou não identificadores) ou M: N (identificadores). Este recurso cria automaticamente uma tabela de interseção e adiciona a chave estrangeira a ela para relacionamentos M: N. Para relacionamentos 1:1 e 1:M, adiciona a chave estrangeira à tabela em que o usuário clica primeiro. O resultado final é essencialmente um esquema relacional, embora denominado Diagrama de Entidade Estendido de Relacionamento (Murray; Guimarães, 2009).

2.6 MODELAGEM DA INFORMAÇÃO DA CONSTRUÇÃO

A origem do BIM está associada ao desenvolvimento de duas áreas de conhecimento: o Projeto Auxiliado por Computador (CAD) e a Representação de Informação do Produto de Construção (Isikdag, 2015). A introdução do BIM tem sido percebida como um dos desenvolvimentos críticos na construção industrializada. BIM é um termo empregado para se referir a uma série de tecnologias e trabalhos associados utilizados para descrever e gerenciar informações utilizadas e produzidas para o processo de projeto, construção e operação de obras (Xue *et al.*, 2021).

O BIM tornou-se um mecanismo que permite a todas as partes interessadas gerar, compartilhar, trocar, e gerenciar informações ao longo do ciclo de vida do projeto, remodelando o cenário da construção desde o projeto até a manutenção. Ao otimizar a infraestrutura técnica existente, o BIM capacita as equipes de construção e projeto. Esta metodologia agiliza a geração e o gerenciamento de dados ao longo de todo o ciclo de vida do projeto, consolidando documentos interdisciplinares em um único repositório (Motawa; Almarshad, 2013).

Oyuga *et al.* (2023) definem a aplicação BIM como a análise e comparação das atividades diárias de trabalho no local com planos gerados, validando o desempenho previsto antes ou durante os projetos. Já Durdyev *et al.*, (2022) enfatizam a importância do BIM nos projetos de construção. O seu uso adequado permite uma tomada de decisão com maior velocidade e mais precisa para os gerentes de construção com base

em informações relevantes, impactando assim no sucesso do projeto (Olanrewaju, 2022; Quresh *et al.*, 2022).

Os termos usados com maior frequência para o BIM são Modelo da Informação da Construção e Modelagem da Informação da Construção, estes utilizados de forma permutável na Arquitetura, Engenharia, Construção e Operações (AECO) (Eastman *et al.*, 2011). Para Isikdag (2015), isto ocorre porque a denominação BIM é utilizada para denotar ambos os conceitos. O primeiro conceito abrange um modelo de informações compartilhadas, enquanto o segundo conceito descreve uma metodologia de gerenciamento de informações.

O BIM desempenha um papel fundamental na reformulação da abordagem convencional da indústria da construção, fazendo a transição de sistemas de informação de desenho bidimensionais (2D) para sistemas de informação de objetos tridimensionais (3D). Essa mudança de paradigma transforma a metodologia de documentação em projeto e construção de edifícios, substituindo práticas manuais e legíveis por humanos por descrições digitais de elementos de construção perfeitamente integradas com tempo e custo (Vacanas *et al.*, 2016).

Essa evolução é incorporada no conceito de modelagem tridimensional ampliada (n -D), no qual múltiplas "dimensões" de informações são integradas em um modelo digital abrangente de construção (Kagioglou, 2003). O modelo BIM 4D (quadridimensional) desempenha um papel essencial tanto na fase de projeto quanto na de execução. Na fase de projeto, ele permite que o projetista visualize as sequências construtivas do empreendimento, facilitando a elaboração de um cronograma de obras mais preciso e eficiente. (Abanda *et al.*, 2015).

Na fase de construção, o modelo BIM 4D oferece a visualização das atividades planejadas em comparação com a execução real. Essa ferramenta permite que o contratante organize o canteiro de obras de forma mais eficiente, alinhando-o ao modelo virtual 4D, incluindo a disposição do fluxo de materiais e o deslocamento das equipes (Abanda *et al.*, 2015).

A dimensão 5D (quintodimensional) integra os custos ao modelo BIM, possibilitando uma avaliação precisa das alterações no orçamento da construção. Essa dimensão é fundamental para a gestão financeira do projeto, abrangendo tanto os custos associados ao processo construtivo quanto aqueles relacionados à manutenção da edificação (Bonfante; Palmisano, 2024).

Além disso, na dimensão 5D, as possibilidades de simulação de preços e custos oferecem suporte à elaboração de propostas mais econômicas. Além do mais, a visualização do impacto de alterações no orçamento também contribui de forma significativa para a otimização e redução dos custos da construção. A estrutura de integração de custos e cronograma, evoluindo rapidamente, molda os sistemas de gerenciamento e os processos repetitivos de construção (Hegazy, 2022; Bonfante; Palmisano, 2024).

Cada uma dessas dimensões corresponde a uma representação no projeto, conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – Dimensões Consolidadas do BIM



Fonte: Adaptado de Bonfante e Palmisano (2024).

2.6.1 Nível De Desenvolvimento do Modelo BIM

Com vistas à criação de uma estrutura conceitual para nortear de maneira coordenada o processo de desenvolvimento do projeto e a evolução do detalhamento das suas informações, foi elaborado o conceito de nível de desenvolvimento (Manzione, 2013). O nível de desenvolvimento descreve o grau de completude para o qual um elemento do modelo é desenvolvido e incorpora um princípio importante IPD.

Os produtos de cada fase ou etapa do projeto precisam ser definidos sucintamente para que os membros da equipe entendam o nível de detalhe no qual eles devem trabalhar e quais decisões devem ou não estar finalizadas (*American Institute of Architects AIA*, 2007).

Além do mais, o LOD é uma ferramenta de referência destinada a melhorar a qualidade da comunicação entre os usuários de BIM sobre as características dos elementos dos modelos. Por tanto, o LOD indica a quantidade de detalhes geométricos e informações anexadas em um elemento do modelo BIM (BIM Fórum, 2019).

Os níveis de desenvolvimento são representados em uma escala que varia em cinco graus, correspondendo a um detalhamento que vai ocorrendo progressivamente ao longo do projeto: 100 (fase conceitual), 200 (geometria aproximada), 300 (geometria precisa), 400 (execução ou fabricação) e 500 (obra concluída). Essa escala foi feita em graduações de 100 unidades, prevendo a possibilidade futura da criação de níveis intermediários.

O AIA produziu diretrizes para os diversos LOD em virtude de alguns usos do BIM. Dessa forma, ao uso do BIM para projeto estão associados outros usos, como planejamento, custos, cumprimento de programa, etc. A precisão geométrica do modelo e as informações não geométricas podem ser associadas aos LOD. Por outro lado, o BIMForum desenvolveu uma especificação LOD baseada nas definições do AIA, com o acréscimo do LOD 350 (documentação de construção). Logo em seguida são descritas essas diretrizes:

- **LOD 100** - projeto conceitual: Estudos de massa, volumes, zonas, modelados em 3 dimensões ou representados por outros dados.
- **LOD 200** - geometria aproximada: Os elementos são modelados de forma genérica e aproximados de suas dimensões, peso, quantidades, orientação e localização. Informações não geométricas podem ser anexadas ao modelo.
- **LOD 300** - geometria precisa: Os elementos são modelados de forma precisa e exata de suas dimensões, peso, quantidades, orientação e localização. Informações não geométricas podem ser anexadas ao modelo.
- **LOD 350** - documentação de construção: O modelo inclui montagens detalhadas e informações de fabricação ou construção. É usado para gerar documentos de construção e desenhos de fábrica.
- **LOD 400** - fabricação e montagem: Os elementos são modelados com o objetivo de montagem, de forma precisa e exata de suas dimensões, peso, quantidades, orientação e localização contendo o detalhamento completo de fabricação e montagem. Informações não geométricas podem ser anexadas ao modelo.
- **LOD 500 - as *built* (conforme construído)**: Os elementos são modelados conforme construídos com informações precisas e exatas das dimensões, peso, quantidades, orientação e localização. Informações não geométricas podem ser anexadas ao modelo.

Em relação aos modelos BIM incluídos nos contratos inteligentes para realização de pagamentos de progressos de obra se tem alguns estudos como referência. Sonmez, Ahmadisheykhsarmast e Gungor (2022) desenvolveram um modelo BIM para o contrato, pois não havia um modelo disponível. Este modelo foi usado com o LOD 350, usando o Revit 2021. O modelo BIM incluiu um total de 2.487 objetos BIM para fundações, lajes elevadas, paredes, portas, aço estrutural, itens de escadas e guarda-corpos, acessórios para tubos, tubulações e equipamentos mecânicos.

Como os dados dos itens elétricos e de instrumentação não foram suficientes para construir um modelo LOD 350, os trabalhos elétricos e de instrumentação não foram incluídos no BIM. Cada porta, coluna de aço estrutural, viga, contraventamento, item de escada e guarda-corpo, conexão de tubulação, peça de tubulação e equipamento mecânico foram modelados como um único objeto no BIM para que os BIMs construídos pudessem incluir todas as alternativas possíveis de conclusão parcial, para refletir com precisão o progresso real (Sonmez, Ahmadisheykhsarmast e Gungor 2022).

Groesen e Pauwels (2022), em seu contrato utilizou um modelo LOD 400 que simula uma parede pré-fabricada de concreto, sendo que este modelo contém parâmetros fornecidos pelo contratante. Esses parâmetros também são necessários para permitir a transferência de *tokens* (dinheiro) de uma parte interessada para outra. Para garantir uma ligação com as práticas atuais da indústria, os parâmetros consistem em: uma data alvo (planejada) para cada ativo, o valor do pagamento obrigatório após a conclusão de estados de ativos específicos e os endereços de conta de propriedade externa e carteiras das partes interessadas envolvidas no blockchain que permite transferências de *tokens*.

2.6.2 Nível de Informação Necessária

O conceito de Nível de Informação necessária, ou *Level of Information Need* (LOIN), foi usado pela primeira vez na *International Organization for Standardization* (ISO) 19650-1: 2018. De acordo com a ISO 19650-1: 2018, escolher o LOIN de acordo com o objetivo e a explicação de quais informações são necessárias para cada entrega de dados é um componente essencial para adotar o BIM com êxito na construção civil. Além disso, um dos objetivos do uso do LOIN é evitar a inclusão de informação desnecessária numa fase específica do projeto (Pan et al., 2024).

Alinhando-se a essa perspectiva, a norma ISO 19650-1:2018 estabelece as bases para a organização e digitalização das informações do modelo BIM, sistematizando a gestão da informação em ambientes colaborativos. Contudo, para atender à demanda por especificações mais precisas quanto à profundidade e qualidade das informações requeridas em cada etapa da construção, foi introduzida a ISO 7817-1:2024, que define o conceito do LOIN. Esta norma mais recente complementa e aprofunda as diretrizes da ISO 19650-1:2018 ao fornecer critérios objetivos para determinar quanto, quando e com qual detalhe a informação deve ser fornecida, promovendo maior consistência, interoperabilidade e alinhamento entre os agentes envolvidos nos empreendimentos (Dervishaj *et al.*, 2023)

O LOIN também é definido na EN 17412-1, como um padrão desenvolvido pelo *Committee European Normative/ Technical Committee* (CEN/TC 442), que se concentra em padrões relacionados ao BIM (CEN, 2020). O LOIN é uma estrutura que define a extensão e a granularidade das informações. O padrão descreve os conceitos e princípios para o desenvolvimento de informações entregáveis, por exemplo, modelos digitais a serem compartilhados para as equipes de projeto e organizações que utilizam o BIM. O LOIN visa estabelecer uma metodologia que se aplica a todo o ciclo de vida do empreendimento, desde o planejamento, projeto, construção, operação e fim da vida útil das edificações (Dervishaj *et al.*, 2023).

Para definir um LOIN, é necessário saber: o propósito e o prazo de entrega das informações; os atores que solicitam e entregam as informações; e os objetos que constituem a entrega das informações. De forma objetiva, o LOIN considera como nível de informação necessário aquele resultante da combinação de três tipos de informações: geométricas (forma, tamanho, dimensão e posição); alfanuméricas (caracteres, dígitos, símbolos); e documentais (plantas, orçamentos, dados geográficos, licenças) (Dervishaj *et al.*, 2023; Bonfante; Palmisano, 2024).

O LOIN também é diferente de concepções anteriores, como LOD-Dev ainda em uso na América do Norte e o *Level of Detail* (LOD-Det) no Reino Unido, conforme descrito no PAS 1192-2, agora substituído pelo BS EN ISO 19650-1: 2018, que também introduz o conceito LOIN. No PAS 1192-2, as métricas LOD foram definidas em uma nomenclatura padronizada de informações gráficas e não gráficas numeradas de 1 a 7 (Dervishaj *et al.*, 2023).

Essas métricas eram muito genéricas, associando geometria e informação, e às vezes dissociadas a realidade do objeto. A estrutura LOIN permite métricas geométricas e não geométricas complementares, mas independentes. Por exemplo, um nível mais alto de informação não requer necessariamente detalhes geométricos mais altos. Isso contribui para a maior eficiência do processo de modelagem, garantindo que o modelo possua o nível de detalhe necessário, sem dedicar esforços na inclusão de elementos que, no final das contas, são irrelevantes para a tomada de decisão. Essa abordagem é especialmente importante devido às implicações de custo e tempo associadas à definição da especificação mais precisa (Matan, Isaac, 2023).

2.6.3 Interoperabilidade

Um processo pertencente a um projeto pode envolver muitas fases e diversos colaboradores, dessa maneira, faz-se imprescindível a troca de informações de maneira rápida e eficiente ao longo do ciclo de vida do projeto. Conforme Eastman *et al.* (2011), esta troca de dados e informações entre aplicativos computacionais no processo de projeto e a capacidade de identificação é denominado como interoperabilidade.

Diante disso, é necessário que os modelos sejam interoperáveis para que se possa simular, analisar e avaliar cenários, bem como verificar interfaces referentes à operação e manutenção (Addor *et al.*, 2010). Problemas de baixa interoperabilidade tornam-se obstáculos para a utilização do BIM, porque dificultam a troca de informações (Andrade; Ruschel, 2009).

Para realizar a passagem de dados é necessário recorrer ao uso de arquivos baseados em formatos de trocas de dados. As trocas de dados entre dois aplicativos BIM são efetuadas basicamente de quatro maneiras diferentes: ligação direta; formato de arquivo de troca proprietário; formatos de trocas de dados de domínio público; formatos de troca de dados baseados em *EXtensible Markup Language* (XML).

O *CIMsteel Integration Version 2* (CIS/2) e o *Industry Foundation Classes* (IFC) são os dois principais modelos de dados do produto da construção civil (Eastman *et al.*, 2011).

Uma das vantagens trazidas pela interoperabilidade é evitar que seja necessário fazer cópias manuais de dados provenientes de aplicativos distintos, o que contribui para a redução de erros e inconsistências (Eastman *et al.*, 2011). Além disso, o aumento da capacidade de interação permite que sejam encontradas soluções

melhores e mais específicas para problemas complexos (Eastman *et al.*, 2011). No que se refere aos fluxos de dados entre aplicativos, estes podem variar em função do estágio de capacidade do BIM, dos tipos de dados envolvidos e do método de transferência. É possível classificar tais fluxos como troca de dados ou intercâmbio de dados (Succar, 2009; Andrade; Ruschel, 2009).

O primeiro tipo de troca de dados ocorre quando são exportados ou importados dados não estruturados e não computáveis. O exemplo deste fluxo é o que ocorre quando são exportados desenhos em CAD a partir de modelos BIM, o que resulta em perdas consideráveis de dados geométricos e semânticos (Succar, 2009). O segundo tipo de troca de dados, por sua vez, pressupõe a existência de interoperabilidade adequada entre o BIM e o outro aplicativo relacionado, ou seja, entre o emissor e o receptor, e ocorre quando são exportados ou importados dados estruturados e computáveis em um processo que resulta em poucas perdas (Succar, 2009).

2.6.4 Extensibilidade

As plataformas BIM possuem APIs amplas e bem documentadas, além de oferecerem suporte às linguagens de programação interativas que podem ser utilizadas por desenvolvedores para personalizá-lo, adicionando funcionalidades ou automatizando tarefas, o que caracteriza a sua extensibilidade (Eastman *et al.*, 2011). Este recurso funciona de forma semelhante à AutoLISP do AutoCAD e é importante para gerar funções especializadas, além de permitir a programação de interfaces para outros aplicativos, possibilitando a interoperabilidade (Eastman *et al.*, 2011).

Devido à interoperabilidade e extensibilidade, a partir de um modelo original do BIM é possível aplicar abordagens de mapeamento e derivação para obter os chamados modelos derivados, que representam novas formas de visualização geradas a partir do próprio arquivo BIM ou então do banco de dados, API ou *interface web* do servidor BIM (Isikdag, 2015). Essas visualizações geradas podem ser do tipo transitórias (temporárias) ou do tipo persistentes (permanentes), a depender das necessidades do projeto (Isikdag, 2015).

No ambiente virtual, o modelo BIM é inicialmente desenvolvido em um software comercial, como o Revit, e posteriormente é traduzido para uma plataforma web. Esse processo gera um modelo derivado que deve manter os parâmetros originais do projeto (Xue *et al.*, 2018). Nesse contexto, a Autodesk Platform Service, anteriormente conhecida como Autodesk Forge, oferece um ecossistema digital ideal para diversas

indústrias, incluindo a construção civil (Sawhney; Odeh, 2020). Essa plataforma permite que desenvolvedores integrem seus fluxos de trabalho a diferentes produtos da Autodesk, como AutoCAD, Revit, Fusion e BIM 360, possibilitando a incorporação de componentes desses softwares em aplicativos móveis ou web. (Sawhney; Odeh, 2020).

3 CONTRATOS INTELIGENTES NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Neste capítulo são abordados conceitos e definições para uma melhor compreensão adequada dos assuntos envolvidos no estudo. Inicialmente são destacados aspectos referentes a tecnologia dos contratos inteligentes aplicados a pagamentos na construção civil, assim como a integração entre BIM e blockchain para aplicação de contratos inteligentes.

3.1 FUNDAMENTOS DE CONTRATOS INTELIGENTES

A introdução de contratos inteligentes marcou o início da era blockchain 2.0, na qual a execução de cláusulas contratuais pode ser realizada na blockchain com protocolos informatizados automatizados. A ideia de incorporar as cláusulas contratuais em software como protocolos de transação computadorizados foi inicialmente proposta por Nick Szabo na década de 90 (Ahmadisheykhsarmast; Sonmez, 2020).

Um contrato inteligente é um protocolo informatizado cuja implementação é automatizada através de um código executável que roda no blockchain. Os contratos inteligentes têm controle sobre os objetos físicos ou digitais de acordo com os termos acordados (Raskin, 2017). O potencial dos contratos inteligentes para a gestão de contratos, incluindo a sua capacidade para a segurança dos pagamentos, tem sido mencionado em pesquisas recentes (Cardeira, 2015; Wang *et al*, 2017; Mason, 2017; Ahmadisheykhsarmast; Sonmez, 2018; Liu *et al.*, 2019).

Peters e Panayi (2016) definem contrato inteligente como sendo uma plataforma que processa e monitora os dados inseridos e armazenados na rede blockchain, tendo como base os termos contratuais preestabelecidos que podem ser codificados em uma linguagem de programação. É exibido como uma regra de negócio que imprime a lógica a ser executada em uma rede blockchain, podendo variar desde uma atualização de dados até a execução de um contrato complexo (Peters; Panayi, 2016).

Além dos recursos do blockchain, os contratos inteligentes fornecem uma plataforma segura e confiável para a execução automatizada de cláusulas contratuais, sem a necessidade de um intermediário confiável, como advogados ou bancos,

resultando em economia em taxas de transação, custos administrativos e agilizando o processo de transação (Crosby *et al.*, 2016; Fanning, 2016).

Com isso, estudos vêm surgindo com o foco em pagamentos progressivos de serviços ou insumos por meio de contratos inteligentes na indústria da construção. Luo *et al.*, (2019) propuseram uma estrutura para mostrar o potencial do blockchain para automação de pagamentos de construção. Das, Luo e Cheng (2020) desenvolveram uma estrutura baseada em blockchain para fazer cumprir as condições de pagamento e compartilhar registros de pagamento de forma transparente.

Li, Kassem e Watson (2020) propuseram uma estrutura de blockchain e contrato inteligente para aumentar a rastreabilidade durante a operação de um ativo construído. Um contrato inteligente foi usado para executar as condições de pagamento do contrato de aquisição de uma torre de destilação para ilustrar os benefícios e desafios das tecnologias públicas de blockchain no domínio da construção (Yang *et al.*, 2020).

Um sistema de contrato inteligente desenvolvido por AhmadiSheykhSarmas e Sonmez (2020) permitiu a segurança do pagamento de contratos de construção, bloqueando o pagamento progressivo projetado a cada mês e transferindo automaticamente os pagamentos para o contratado, subcontratados e fornecedores imediatamente após a aprovação dos pagamentos progressivos pelo contratante.

Além disso, há pesquisas que ampliaram o horizonte em relação a pagamentos em obras utilizando contratos inteligentes. Estes estudos são bastante recentes e tem como principal objetivo a integração do BIM e do blockchain para gerir contratos inteligentes com intuito de realizar pagamentos progressivos e efetuar o acompanhamento da obra, em vista que essas tecnologias oferecem vantagens complementares. Extensas revisões do status atual da pesquisa de blockchain para construção e casos de uso na indústria da construção podem ser encontradas nas pesquisas de Li, Greenwood, Kassem (2019) e Hunhevicz e Hall (2020).

3.1.1 Integração entre BIM e blockchain para uso de contratos inteligentes

Embora o BIM promova a colaboração digital, o compartilhamento de informações e o gerenciamento de dados são insuficientes no suporte às atualizações ou alteração de registros digitais, incluindo alteração de data, hora ou outras operações de dados não gráficos (metadados) no modelo BIM. Isso porque, os softwares BIM são construídos principalmente com o foco de gerenciar e visualizar informações relacionadas ao projeto, construção e gestão da edificação, o que inclui modelos 3D,

desenhos 2D e metadados dos elementos construtivos, como propriedades de materiais, consumo de energia, etc (Celik; Petri; Rezgui, 2023).

Contudo, o foco principal não é garantir a integridade das informações ou ser capaz de rastrear alterações nas informações ao longo do tempo. Portanto, embora as ferramentas BIM permitam aos usuários fazer alterações nas informações do projeto, elas podem não incluir recursos avançados de segurança ou mecanismos à prova de falsificação necessária para proteger a integridade dos registros digitais e garantir a autenticidade dos dados. Além disso, o software BIM geralmente não possui um mecanismo de controle de versão para rastrear as alterações realizadas nas informações do projeto ao longo do tempo (Celik; Petri; Rezgui, 2023).

De acordo com o exposto, a blockchain tem o potencial de complementar o BIM, mitigando os riscos relacionados com a falta de rastreabilidade da informação, proporcionando assim uma maior autoridade aos registros em papel, ao mesmo tempo em que garante a integridade, a segurança das transações e a confiança (Chynoweth *et al.*, 2007).

Em suma, a tecnologia blockchain pode beneficiar uma colaboração baseada em BIM de várias maneiras, incluindo aumentar a clareza das informações do projeto, a rastreabilidade dos dados BIM e responsabilidades dos membros da equipe, o que pode evitar a alteração de dados por um fornecedor terceirizado (Mathews *et al.*, 2017). A colaboração da integração entre blockchain e BIM pode melhorar a confiança entre as partes interessadas e ajudá-las a chegar a um consenso. A mudança da cultura de cooperação pode resolver a questão das responsabilidades pouco claras de cada participante, priorizando a colaboração e partilhando riscos (Mathews *et al.*, 2017). Desta maneira, a tecnologia Blockchain fornece um consenso distribuído digitalmente e protege a autoridade de toda a rede, garantindo que os dados sejam descentralizados entre vários nós (Nawari; Ravindran, 2019).

Turk e Klinc (2017) afirmam que plataformas blockchain (por exemplo, Ethereum e Hyperledger) podem ser integradas ao BIM para adicionar novos recursos. Esses recursos podem registrar todas as alterações em modelos BIM tridimensionais (3D) ao longo dos estágios de projeto e construção, permitindo subsequentemente que as partes interessadas rastreiem facilmente essas alterações.

Um grupo de pesquisadores se concentraram na integração do BIM na rede blockchain para alcançar avanços no processo de pagamento progressivo, pois essas tecnologias oferecem vantagens complementares. Ye e Konig (2021) apontaram em

seu estudo que a tecnologia BIM integrada com informações de custos, ou seja, (5D BIM) está em um estágio muito inicial para automatizar o procedimento de pagamento de construção. Estes autores apresentaram uma estrutura para faturamento automatizado combinando o BIM com contratos inteligentes.

Elghaish, Abrishami e Hosseini (2020) desenvolveram um protótipo de contrato como que permitiu o gerenciamento de informações de transações financeiras para a entrega integrada de projetos. Chong (2020) propôs a integração de sensores inteligentes, BIM e blockchain e contratos inteligentes e forneceu *insights* sobre a aplicação dessas tecnologias avançadas para pagamentos automatizados de subcontratados. No Capítulo 2 na seção 2.7.3 é apresentado com mais profundidade os trabalhos que abordam a integração entre BIM e blockchain com aplicação em contratos inteligentes, onde são desenvolvidos protótipos com aplicações em alguns cenários pilotos.

Ao analisar os registros incluídos na Revisão Sistemática da Literatura que foi desenvolvida pelo autor deste trabalho, tendo em vista, os estudos que desenvolveram contratos inteligentes com integração entre as tecnologias BIM e blockchain, foram possíveis levantar oito limitações enfrentadas pelos autores, conforme o Quadro 2.

Quadro 2 – Evidências das limitações encontradas para a integração BIM e Blockchain

Nº da Evidência	Códigos dos artigos	Limitações	Evidências	Referências
E1	A1 , A6, A7	Complexidade do setor da construção civil	O uso das tecnologias BIM e BC é desafiadora devido à resistência à mudança e à lenta adoção de na indústria da construção civil.	(Hijazi <i>et al.</i> , 2023), (Elghaish <i>et al.</i> , 2020) (Hamledari; Fischer, 2021)
E2	A2, A3, A4, A5, A6,A7	Falta de modelagem de dados	A modelagem de dados é uma ferramenta que auxilia na concepção inicial de uma rede blockchain, para identificação dos integrantes da rede.	(Sonmez; Ahmadisheykhsarmast; Gungor, 2022) (Sigalov <i>et al.</i> , 2021) (Groesen; Pauwels, 2022) (Elghaish <i>et al.</i> , 2020) (Elghaish <i>et al.</i> , 2022) (Hamledari; Fischer, 2021)
E3	A2, A6, A7	Intervenção humana	As pessoas podem cometer erros quanto a adição de dados e verificação, como também cometer fraudes.	(Hijazi <i>et al.</i> , 2023); (Elghaish <i>et al.</i> , 2020); (Hamledari; Fischer, 2021)
E4	A1	Cenário político	Faltam regulamentos, leis, políticas e padrões relacionados que regulamentem a blockchain na construção civil	(Hijazi <i>et al.</i> , 2023)
E5	A5, A6, A7	Falta de informações sobre a integração entre BIM e Blcockchain	Para que a integração entre a plataforma BIM e a Blockchain seja reproduzida e refutada por outros estudos, é necessário um alto nível de detalhamento do processo, para melhor compreensão.	(Elghaish <i>et al.</i> , 2020) (Elghaish <i>et al.</i> , 2022) (Hamledari; FiscHer, 2021)
E6	A2, A4	Restrições financeiras	O desenvolvimento de contratos na construção envolve custos elevados, incluindo criação, implantação, manutenção e a necessidade de criptomoeda para transações	(Sonmez; Ahmadisheykhsarmas; Gungor, 2022) (Groesen; Pauwels, 2022)
E7	A1,A3,A5,A6	Falta de aplicação prática	Faltam evidências de aplicações dos contrato inteligentes no cenário real para que possam ser corroborados e validados.	(Hijazi <i>et al.</i> , 2023); (Sigalov <i>et al.</i> , 2021); (Elghaish <i>et al.</i> , 2020) (Elghaish <i>et al.</i> , 2022)
E8	A1	Escalabilidade	A rede blockchain precisa ter uma efetiva escalabilidade, ou seja, a capacidade de lidar com grande número de transações sendo realizadas ao mesmo tempo	(Hijazi <i>et al.</i> , 2023)

Fonte: O autor (2025).

Quadro 3 – Natureza do estudo

Natureza do Estudo	Descrição
Simulação de prova de conceito	Uma aplicação proposta de DLT que é demonstrada por simulação computacional ou protótipo.
Estudo de caso	Considera a aplicação da DLT analisando um estudo de caso (hipotético ou baseado em cenário do mundo real) que pode ou não incluir simulação computacional
Aplicação do mundo real	Artigos que demonstram uma aplicação proposta em um cenário do mundo real

Fonte: O autor (2025)

A análise das evidências apresentadas indica que a maior limitação enfrentada é a E2. Uma das prováveis causas é que os estudos anteriores não detalham as etapas que precedem o desenvolvimento do contrato inteligente.

A segunda evidência com maior número de ocorrência é a E7. Este fato acontece devido à ausência de aplicações no mundo real que comprovem os resultados previstos nos estudos não empíricos (Hijazi *et al.*, 2023), (Sigalov *et al.*, 2021), (Elghaish *et al.*, 2020), (Elghaish *et al.*, 2022). Além disso, a causa desta limitação está muito relacionada a outras duas, E1 e E4.

Por causa da elevada resistência dentro da indústria da construção civil em integrar tecnologias inovadoras (Hijazi *et al.*, 2023); (Elghaish *et al.*, 2020); (Hamledari; Fischer, 2021) e a ausência de um cenário político bem estabelecido que regulamente o uso dessas tecnologias digitais (Hijazi *et al.*, 2023), há pouco incentivo para o desenvolvimento de contratos inteligentes para pagamentos progressivos que possam ser testadas no mundo real.

Outra evidência que cabe destacar, é a E5, (Elghaish *et al.*, 2020), (Elghaish *et al.*, 2022), (Hamledari; Fischer, 2021), que priorizam mais as etapas de desenvolvimento da rede e respectivamente do contrato inteligente e deixam de detalhar a integração entre BIM e Blockchain na maioria das vezes ocorre por meio de uma API. Estes dados são fundamentais para que os demais pesquisadores possam ter referências em seus trabalhos.

Com a amostra final dos sete artigos supracitados, foi desenvolvida uma base de dados com os principais requisitos tecnológicos mais aplicados no uso da rede Blockchain. Os artigos foram catalogados com base no ano de publicação, na rede blockchain utilizada, sendo apresentada modelagem de dados, no tipo de aquisição, e na natureza do estudo, mostrada no Quadro 3. Esta última é separada em três categorias de pesquisa conforme Li e Kassem (2021), a saber: prova de conceito, estudo de caso e aplicação real conforme a Quadro 4.

Quadro 4 – Registro de dados sobre os requisitos tecnológicos aplicados no uso da rede Blockchain.

Código dos Artigos	Ano de publicação	Rede blockchain	Modelagem de dados	Objetivo	Natureza do estudo	Referência
A1	2022	Hyper Ledger Fabric	Sim	Entregar dados	Prova de conceito	(Hijazi et al., 2023)
A2	2022	Ethereum	Não	Pagar insumos de uma edificação	Prova de conceito	(Sonmez; Gungor, 2022)
A3	2021	Ethereum	Não	Pagar insumos de uma edificação	Prova de conceito	(Sigalov et al., 2021)
A4	2022	Ethereum	Não	Rastrear e pagar pré-fabricados de concreto	Prova de conceito	(Groesen; Pauwels, 2022)
A5	2022	Hyper Ledger Fabric	Não	Pagar construção de hospital	Prova de conceito	(Elghaish et al., 2020)
A6	2020	Hyper Ledger Fabric	Não	Pagar construção conjunto residencial.	Prova de conceito	Elghaish et al., 2022)
A7	2021	Ethereum	Não	Pagar serviços de obras comerciais	Aplicação real	(Hamledari; Fischer, 2021)

Fonte: O autor (2025).

Adicionalmente, durante a análise dos artigos observou-se que apesar de todos os artigos abordarem a integração entre BIM e Blockchain, é uma abordagem superficial, pois muitos artigos não detalharam o desenvolvimento dessas APIs, deixando de mencionar qual API específica foi utilizada e como foi realizada sua implementação.

A integração de modelos BIM de peças técnicas ou espaciais em um modelo de coordenação compartilhada usando o formato de dados IFC é suportada pela maioria das ferramentas de autoria e plataformas de colaboração. Além disso, o modelo de construção e os elementos inerentes do modelo podem ser vinculados a outros dados, como documentos, planos, cronogramas ou listas de quantidades (Opitz; Windisch; Scherer, 2014).

O IFC é o formato de troca de dados neutro e aberto introduzido para facilitar o uso interoperável e colaborativo de BIMs ao longo do ciclo de vida de uma edificação (Laakso; Kiviniemi, 2012). O uso do IFC na indústria da construção civil e em vários estágios do ciclo de vida de um projeto fornece uma solução comum para a troca de grandes quantidades de informações entre os membros do projeto (Dankers *et al.*, 2014; Oh *et al.*, 2015).

3.1.2 Proposta para automatização de pagamento de concreto

No que se refere, ao processo de pagamento de concreto em obras, é fundamental que a gestão dos contratos seja bem executada e os pagamentos estejam em dia. A presente pesquisa usa como referência o estudo de Piccoli *et al.* (2023) que propôs melhorias para o pagamento do sistema de parede e laje de concreto moldados *in loco*, com o apoio de BIM e blockchain. O processo de pagamento analisado por Piccoli *et al.* (2023), é padrão para as obras da empresa construtora em âmbito nacional.

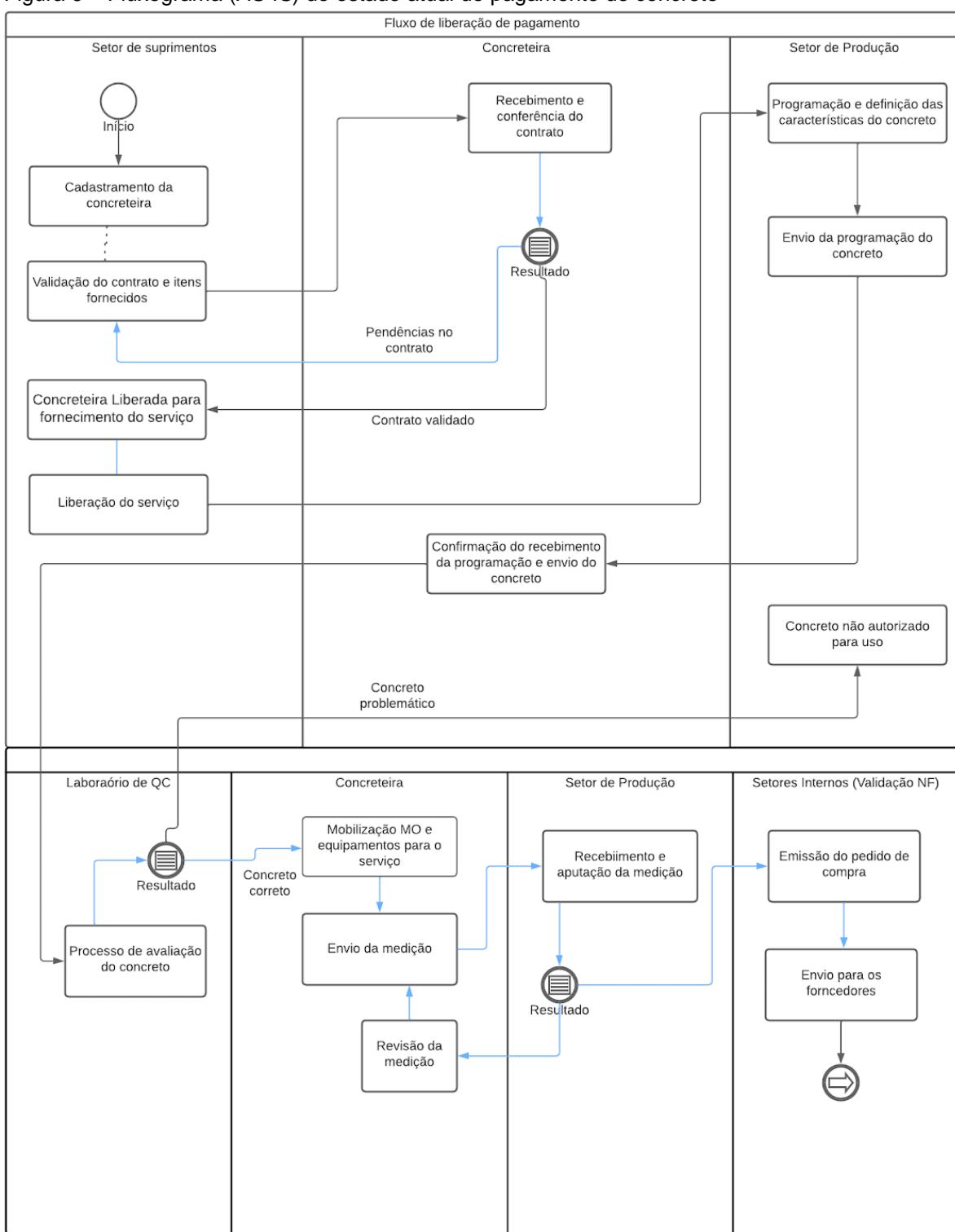
Para representar o mapeamento do fluxo do concreto foi utilizada a metodologia *Business Process Management* (BPM), que é uma abordagem de gerenciamento de processos de negócio e *Business Process Model and Notation* (BPMN). O BPMN é uma notação gráfica utilizada para modelar fluxos de processos e trabalho em organizações, através de símbolos padronizados que permitem a criação de fluxogramas claros (Association of Business Process Professionals ABPMP, 2014).

Na abordagem BPM duas etapas são de extrema importância, a representação do estado atual e do estado futuro dos processos de negócio. A modelagem do estado atual, conhecida como “AS-IS”, visa analisar e compreender os processos existentes em uma organização. Essa análise inclui a identificação de problemas que impactam a eficiência e a exploração de oportunidades de melhoria. Já a modelagem do estado futuro, ou “TO-BE”, descreve um cenário ideal a ser alcançado, apresentando propostas de soluções e melhorias para os problemas identificados (ABPMP, 2014).

Esse processo visa eliminar atividades desnecessárias, aumentar a produtividade e fomentar a inovação. Os fluxogramas “AS-IS” e “TO-BE” são ferramentas amplamente utilizadas na otimização de processos, permitindo comparar os modelos, identificar lacunas e estabelecer uma base sólida para a implementação de mudanças (ABPMP, 2014).

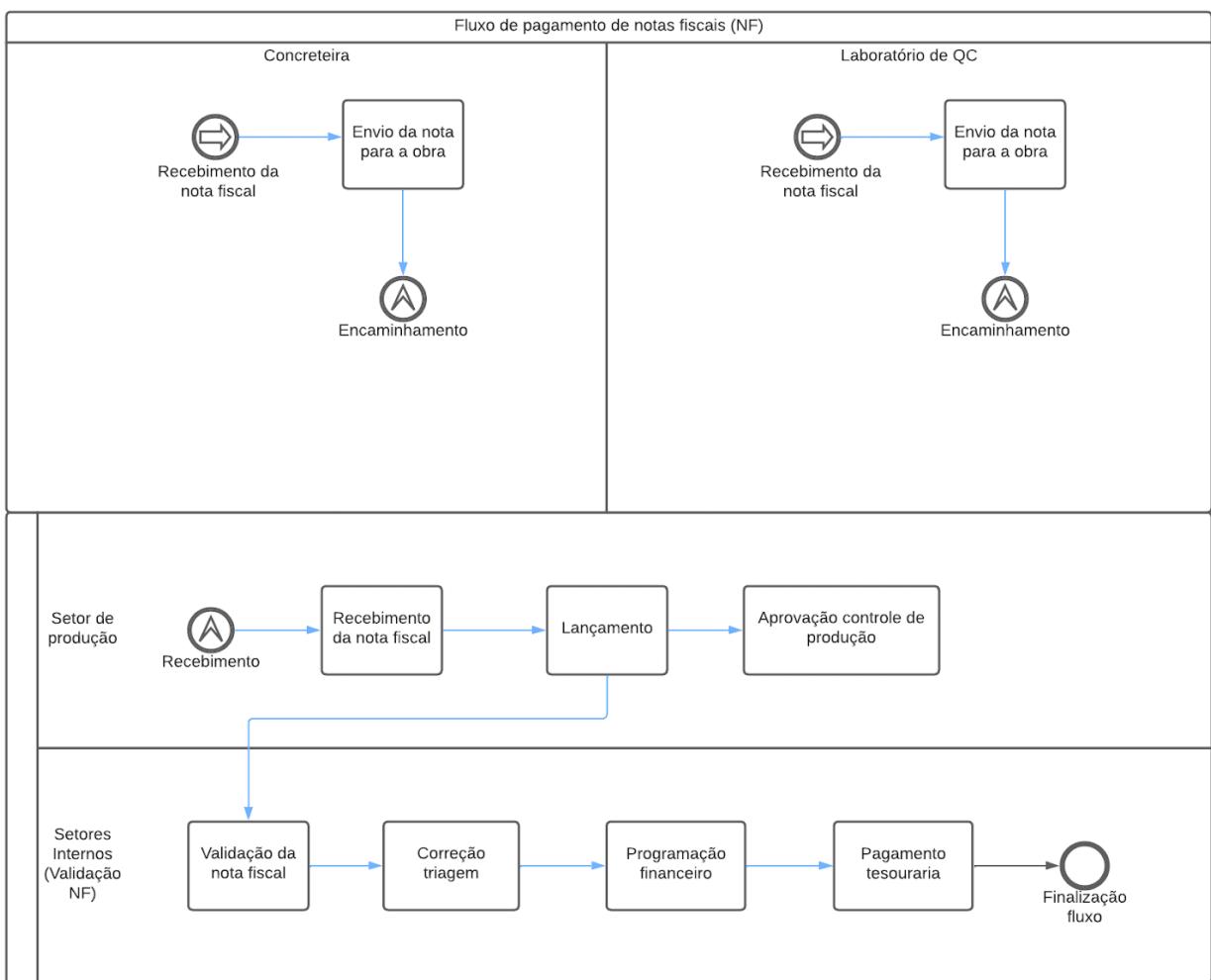
No fluxo de pagamento existem 6 participantes, a concreteira, o laboratório de controle de qualidade, e quatro setores internos da construtora, quais sejam, suprimentos, produção, setor de validação de notas fiscais e o Departamento de Assistência ao Empregado (DAE). O processo de entrega e pagamento do concreto se inicia no setor de suprimentos, onde existe a negociação e o cadastramento dos itens a serem utilizados pela obra. Consequentemente, foi mapeado todo o fluxo que envolve o pagamento do concreto, desde a solicitação do concreto pela construtora até o pagamento da nota fiscal. De acordo com o mapeamento, foram construídos dois fluxogramas AS-IS, os fluxogramas foram segmentados em duas partes como mostram as Figuras 9 e 10.

Figura 9 – Fluxograma (AS-IS) do estado atual do pagamento de concreto



Fonte: Piccoli et al., (2023).

Figura 10 – Fluxograma (AS-IS) do estado atual do pagamento de notas fiscais



Fonte: Piccoli *et al.*, (2023).

Após a validação de contrato, materiais e serviços a serem prestados pela concreteira, ela é liberada para atuar junto à construtora. Após a liberação, a obra solicita o concreto e recebe de forma física as notas, que contém informações de preço, traço, local, horário de saída da usina e horário de entrega. Nesta nota, tanto a concreteira quanto a construtora devem guardar a conferência e cobrança no final da janela de medição (Piccoli *et al.*, 2023).

No momento da entrega do concreto, o laboratório de qualidade verifica as informações do concreto entregue para liberação do uso. Em caso positivo, é liberado para uso na obra, caso contrário, o concreto é recusado e deve voltar para usina de concreto (Piccoli *et al.*, 2023).

O processo de pagamento do concreto passa por uma janela de medição que se inicia dia 21 e finaliza dia 20 do mês seguinte. A verificação da medição se dá pela análise de todas as notas fiscais entregues nesta janela de tempo. Finalizado a janela de medição, o fornecedor deve enviar para a obra, de forma física e via e-mail, a medição do concreto, com informações detalhadas sobre quais foram às notas, quais metragens e quais traços foram utilizados nesta janela de medição (Piccoli *et al.*, 2023).

Após a obra conferir se está condizente com o serviço prestado, é gerada uma ordem de compra, o que deve ser realizado até o último dia útil deste mesmo mês. Após a criação do pedido, que será associado a medição enviada pelo fornecedor, a obra envia para o setor de notas fiscais protocolado para liberação de pagamento, devendo ser enviado até o quinto dia útil do mês subsequente. Com o processo no setor de notas fiscais e a validação para pagamento da nota, gera-se a confirmação no sistema para pagamento, indicando a data limite (Piccoli *et al.*, 2023). A Figura 11 mostra o fluxo de lançamento/pagamento de notas fiscais da empresa.

Figura 11 – Fluxo de pagamento de notas fiscais



Fonte: Emanuele (2017).

Após analisar este estado atual do fluxo de pagamento padrão da construtora, Piccoli *et al.*, 2023 realizaram um estudo que propõe um estado futuro. Daí então foram propostas alterações que se basearam principalmente na integração de duas tecnologias, a blockchain e o modelo BIM. Além de propor uma substituição integral do método de consenso anterior e incluir sistemas proprietários como canal de comunicação entre as organizações. As modificações no fluxograma foram propostas de acordo com os desafios levantados por Piccoli *et al.*, (2023) são:

- **Desafio 1:** Uso do e-mail como único mecanismo de consenso. O e-mail como único meio de comunicação para o aceite da medição ou para indicar correções pode gerar falhas na comunicação e atrasos na conclusão dos processos de pagamento.

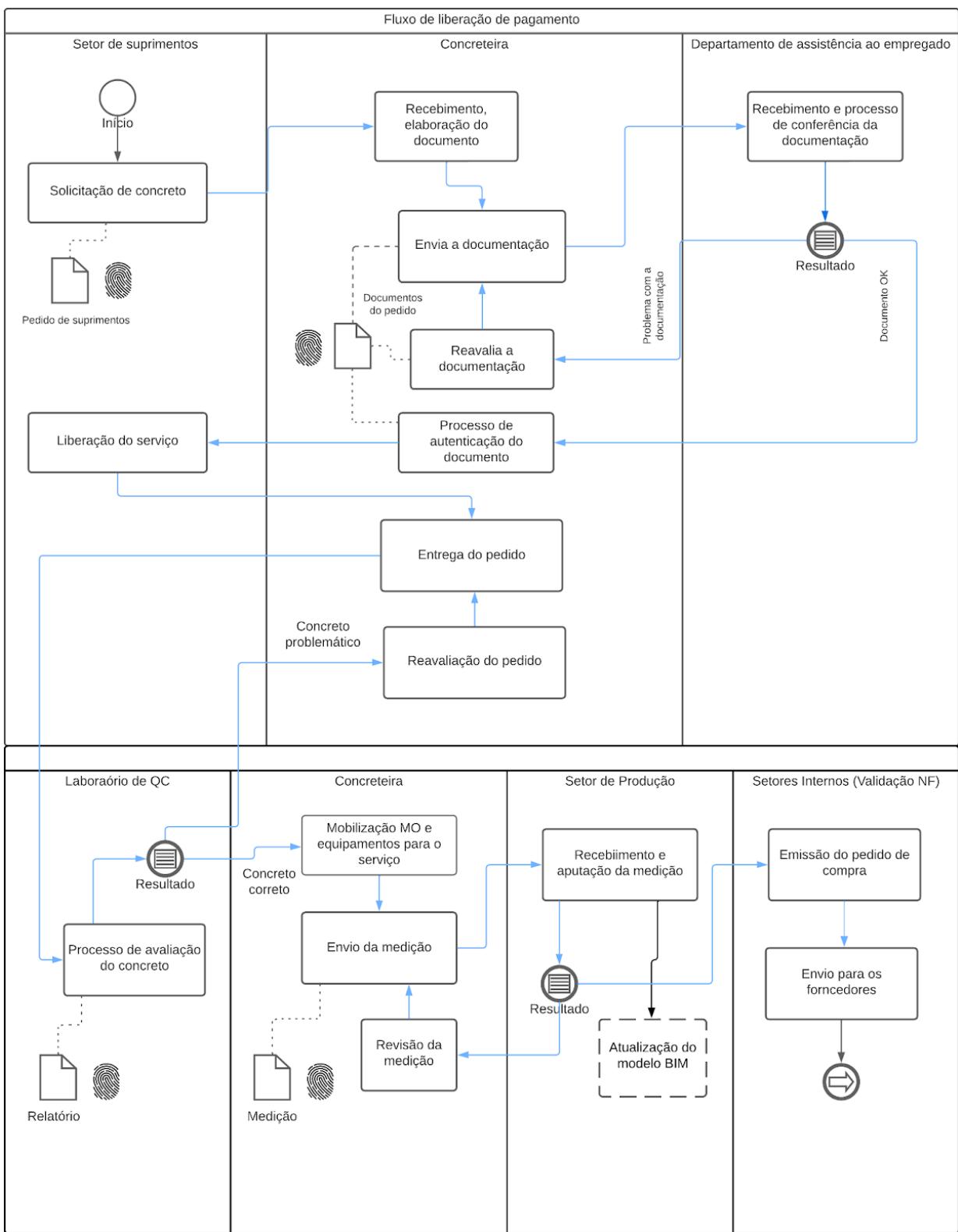
- **Desafio 2:** Grande quantidade de documentos gerados durante o processo. O controle do concreto lançado, a partir das notas recebidas fisicamente, gera uma grande quantidade de documentos físicos na obra. A gestão das notas fiscais é parte crítica do processo de pagamento, gerando atrasos e erros. É importante investir em tecnologias de digitalização de documentos, automatizando o recebimento e a gestão de notas.

- **Desafio 3:** Demora na aprovação do concreto que chega à obra. A aprovação do concreto é importante para garantir que ele atenda às especificações técnicas do projeto. Sua demora é um problema que afeta a eficiência e o cronograma da obra.

- **Desafio 4:** Retrabalho na comprovação do lançamento de pagamento. O processo de confirmação do pagamento pode exigir que a obra protocolize duas vezes o lançamento, o que gera retrabalho e atrasos no processo.

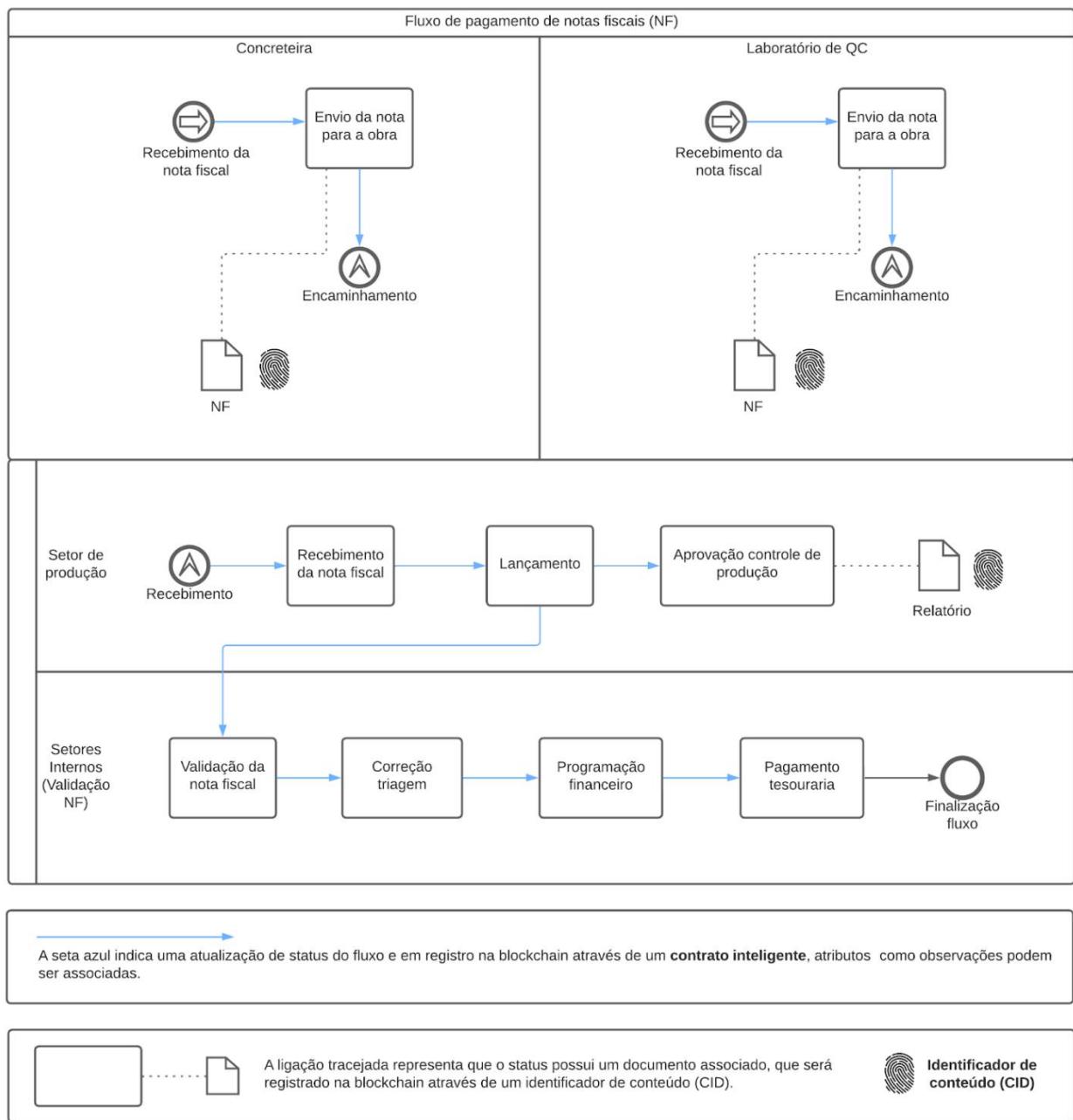
O fluxograma *TO-BE* foi dividido em duas imagens, a Figura 12 ilustra o fluxo de liberação de pagamento e a Figura 13, o fluxo de pagamento das notas fiscais.

Figura 12 – Fluxograma (*TO-BE*) do futuro fluxo de liberação de pagamento do concreto



Fonte: Piccoli et al., (2023).

Figura 13 – Fluxograma (*TO-BE*) do futuro fluxo de pagamentos de notas fiscais



Fonte: Piccoli *et al.*, (2023).

Nestes fluxogramas foram indicados o canal e o método de consenso no qual os processos são efetuados, quase sempre ocorrendo através de um contrato inteligente da blockchain e por um sistema proprietário, um sistema fechado mantido e atualizado exclusivamente pela construtora, preferencialmente um sistema *web* (Piccoli *et al.*, 2023).

Além disso, foram adicionadas representações dos processos que geram um ou mais documentos, cada um com uma identificação única, por fim, foi adicionado a representação de atualizações efetuadas no modelo BIM. Os processos do fluxograma da Figura 11 possuem uma generalização, ou seja, um mesmo processo que ocorre para as três organizações, iniciando pelo recebimento da nota fiscal seguido do envio para obra, gerando uma nota fiscal, que será armazenada, conforme descrito no fluxo AS-IS (Piccoli et al., 2023).

Os setores internos da construtora irão desempenhar um papel de liderança na governança de rede, e terão a atribuição dos papéis de endossamento, ordenação e validação, além de serem responsáveis pela configuração da rede, gestão de participantes e atualização do *chaincode*. Já as organizações externas participarão do papel de endossamento e validação na arquitetura da rede HLF (Piccoli et al., 2023).

O processo de decisão representa uma mudança ou atualização na blockchain que é enviada para todos os participantes de cada etapa do processo. Somente com o consenso de todos, de acordo com o *chaincode* proposto, ou seja, um endossamento parcial de todas as organizações participantes da rede, o fluxo será prosseguido e as ações tomadas. Esse processo pode adotar regras específicas, como no caso da presença de dados sensíveis, em respeito à Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais (LGPD) (Ciotta et al., 2021).

Pode-se observar nas Figuras 12 e 13, que cada processo, representado pelas setas em azul, envolve duas organizações, com no mínimo, um setor interno, como explicado anteriormente, cada um desses processos representam uma execução de *chaincode*, e no caso, terão ambas as organizações envolvidas atuando com o papel de endossamento e validação (Piccoli et al., 2023).

Como proposta tem-se que os documentos poderão ser armazenados num servidor de arquivos, sendo gerenciado pela Blockchain com a criação de um identificador único, representado no fluxograma como identificador de conteúdo (CID), que na prática é um *hashcode*, um código único gerado por criptografia para identificação (Piccoli et al., 2023).

Outra opção é autenticação dos documentos, isso pode ser realizado por meio da associação aos servidores de autenticação, permitindo que os usuários das organizações façam este processo diretamente do sistema. No fluxograma à associação de documentos é feita a partir de linhas tracejadas, ligadas a um ícone de documento, já a autenticação pode ser feita, para cada documento, caso necessário (Piccoli *et al.*, 2023).

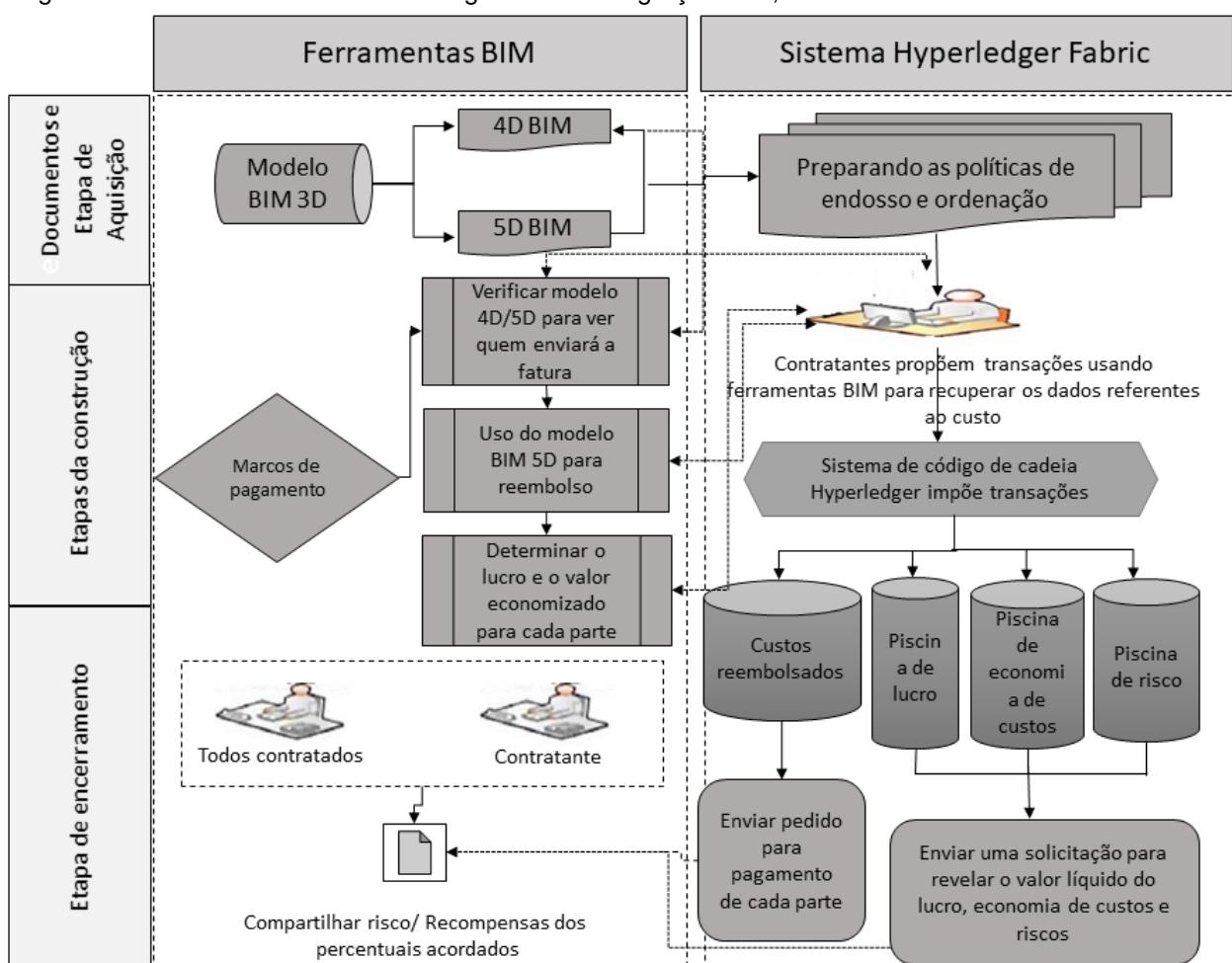
Outra proposta de mudança no fluxograma AS-IS é a integração do modelo BIM com a blockchain. A partir de alterações mensais, feitas de acordo com o recebimento e apuração das medidas feitas em obra relacionada ao desempenho da ação executada, ou seja, o progresso da concretagem das paredes, ou variação do volume de concreto utilizado (Piccoli *et al.*, 2023). Sendo estas executadas de forma manual a partir de visitas de campo pelo responsável do setor, seguindo as atualizações necessárias para o desenvolvimento do modelo BIM. (Piccoli *et al.*, 2023).

Para corroborar a proposta de contrato inteligente presente nesta pesquisa, a seguir são apresentados alguns trabalhos que contemplam o uso de contratos inteligentes na construção civil com foco em pagamentos e gestão da cadeia de suprimentos de insumos ou serviços. Os trabalhos são detalhados, explicados quais são os seus objetivos, o contexto que está inserido e os requisitos técnicos para concepção do contrato inteligente, incluindo a arquitetura de sistema da rede blockchain.

3.1.3 Protótipo de contrato Inteligente com integração entre o método IPD, BIM e blockchain.

Elghaish *et al.* (2020) desenvolveram um contrato inteligente que aplica a integração entre blockchain, BIM e IPD ou Desenvolvimento Integrado de Empreendimentos. A Figura 14 mostra a interoperabilidade existente no contrato, entre o método IPD e as tecnologias BIM e blockchain Hyperledger Fabric. A estrutura do contrato está dividida em três fases: Documentos e Etapas de Aquisição; Etapas de Construção e Etapa de Encerramento dentro dos estágios de implementação do IPD.

Figura 14 – Estrutura do contrato inteligente com integração BIM, Blockchain e IPD.



Fonte: Adaptado de Elghaish, Abrishami e Hosseini (2020).

O IPD é um método que busca melhorar os resultados do projeto por meio de uma abordagem colaborativa, de alinhamento, de incentivos e metas da equipe de projeto por meio de risco e recompensa compartilhados. Dessa maneira, há o envolvimento antecipado de todas as partes e um acordo de múltiplas partes. O IPD também envolve sistemas, estruturas de negócios e práticas em um processo que aproveita por meio de cooperação as experiências e insights de todos os participantes da obra para otimizar os resultados do empreendimento. Além disso, o IPD visa aumentar o valor para o proprietário, reduzir o desperdício e maximizar a eficiência em todas as fases do empreendimento (AIA, 2007; Ken; Becerik-Gerber, 2010).

Diferentemente de projetos tradicionais, em que cada parte normalmente toma medidas cuidadosas para minimizar seu próprio risco, os contratos de IPD combinam os riscos e recompensas de todos os membros da equipe e incentivam a colaboração para atingir objetivos comuns do projeto. Esses objetivos podem variar, mas geralmente estão associados a métricas de custo, cronograma e qualidade comumente usadas para medir o sucesso do projeto. Um exemplo de risco associado inclui cobrir excedentes de orçamento com as despesas gerais e o lucro de cada entidade, mas se o projeto estiver abaixo do orçamento, a equipe pode receber um bônus de compensação (Ken; Becerik-Gerber, 2010).

No IPD, três componentes ou membros podem ser definidos: o membro 1 representa o reembolso dos custos do projeto e captura todos os custos de implementação do projeto (garantidos); o membro 2 se refere aos custos gerais para todos os participantes, além do lucro (em risco); e o membro 3 são as taxas de perda ou ganho (o acordo contratual) (Zhang; Li, 2014).

Em relação ao objetivo do estudo, Elghaish *et al.* (2020) desenvolveram um contrato para realizar pagamentos das etapas de construção de um conjunto residencial. A natureza do estudo é classificada como prova de conceito. Para Li e Kassem (2021), a prova de conceito é uma aplicação proposta de DLT que é demonstrada por meio de simulação computacional ou protótipo. Neste estudo foram utilizados dados hipotéticos para elaborar o estudo de caso.

Dessa forma, foi criado um cenário em que uma empresa de incorporação imobiliária decide construir um complexo de 100 casas idênticas. A especificação de cada moradia é a seguinte: a área bruta de construção é de aproximadamente 192 m², a residência é de um único pavimento (térreo). A casa tem quatro quartos, sendo um quarto mais amplo com suíte e *closet*, sala de estar, cozinha, sala de jantar, banheiro social, sala de família e área de serviço. Os serviços da obra são categorizados em cinco pacotes comerciais: (1) obras gerais (2) cobertura (2) luminárias (3) acabamento (5) portas e janelas.

Para este contrato foi utilizada a blockchain Hyperledger Fabric. O contrato contém sete integrantes: (contratante que é o cliente, cinco contratados e um consultor). Em relação ao desenvolvimento do contrato, foi usada a ferramenta IBM Blockchain *Cloud Beta 2*. Além disso, foi utilizada a extensão IBM VS *Code* para blockchain. Com o intuito de facilitar a escrita do contrato inteligente (Elghaish *et al.*, 2020).

No protótipo apresentado, são adicionadas quatro funções para cumprir a finalidade proposta do sistema, ou seja, registrar todas as transações do projeto e prevenir possíveis alterações. As funções utilizadas são: (1) adição de participantes; (2) economia de custos; (3) custos reembolsados; e (4) lucro (Elghaish *et al.*, 2020).

Durante a fase de documentação e aquisição, três seções principais formam a conceitualização para este estágio. Primeiro, na construção dos componentes da rede, cada parte na equipe principal do IPD representa um nó par na rede blockchain. Este nó par carrega seus próprios livros-razão no estágio de implantação, enquanto há um nó par para ordenar transações chamado de par ordenador. Segundo, a política de endosso inclui o caminho de uma transação de uma parte para outras para endosso, ou seja, definir quem deve endossar transações propostas por uma das partes (Elghaish *et al.*, 2020).

Isso requer o desenvolvimento de equações matemáticas para permitir a determinação do valor de cada transação e a proposta de novos termos consistentes com a tecnologia blockchain. A terceira seção abrange as políticas de ordenação e se preocupa com o caminho da transação a ser registrada, incluindo por qual *peer* (parte do projeto) e por qual canal (Elghaish *et al.*, 2020).

Além disso, dentro desta etapa as dimensões do BIM 3D (Projeto), 4D (Cronograma) e 5D (Custo), fornecem as informações necessárias para desenvolver o sistema *chaincode* da Hyperledger. As informações necessárias do modelo BIM devem ser as datas de início e término de cada pacote comercial, para que possam ser codificadas em políticas de endosso e solicitação, o custo total de cada pacote e os lucros máximos estimados para cada parte não proprietária (contratados e consultores), a serem usados na validação das transações de lucro por marco de pagamento e cumulativamente em marcos posteriores (Elghaish *et al.*, 2020).

Simultaneamente, a estrutura do *chaincode* deve ser projetada usando os dados BIM, como a definição do número de peers e as funções que precisam ser escritas no formato de contrato inteligente para o modelo IPD (Elghaish *et al.*, 2020).

Na fase de construção há o processamento de uma transação no Hyperledger Fabric que compreende quatro estágios principais, com esses estágios adaptados para se adequarem aos contextos BIM e IPD. Portanto, todas as informações necessárias dos modelos BIM são identificadas levando em consideração as características do IPD (Elghaish *et al.*, 2020). Além do mais, tarefas relacionadas ao HLF são apresentadas. Esses quatro estágios são descritos abaixo:

- **Enviando uma proposta de transação para nós pares específicos:** de acordo com o cronograma do projeto (4D BIM), as partes não proprietárias que implementaram obras devem iniciar transações de solicitação usando a interface de programação de aplicativos (API) para invocar a função *chaincode*. A estrutura depende do blockchain da IBM, enquanto a nuvem da IBM oferece a tela da API que pode gerenciar os nós na blockchain, canais e pares. Cada membro da rede pode usar esta tela da API para efetuar *login* e invocar qualquer função para registrar novos dados no Hyperledger. Conforme declarado na política de endosso, a transação deve ser enviada para endosso a pares pré-identificados.

- **Endossando transações propostas:** todas as transações devem atender aos requisitos de política de endosso mencionados, como o valor máximo de cada transação e o tempo planejado para invocar a transação. Uma vez que uma transação tenha sido endossada, ela retorna ao remetente da transação para iniciar o processo de pedido.

- **Ordenando a transação endossada:** todas as transações endossadas devem ser transferidas para o peer de ordenação para que sua assinatura possa ser verificada duas vezes. Posteriormente, as transações serão ordenadas cronologicamente; ou seja, existe uma inter-relação entre as transações e a precedência para cada transação de acordo como o modelo BIM *as planned* 4D, com base na política de pedidos acordada no estágio de pré-implantação. Portanto, a arquitetura do *chaincode* representa o número de transações, o remetente da transação, o valor da transação e o nome do pacote comercial.

- **Confirmando a transação:** todas as transações ordenadas e empacotadas devem ser transmitidas para os nós pares pré-identificados na política de ordenação. Para ilustrar, todas as transações ordenadas propostas por partes não proprietárias devem ser transmitidas para todos os nós pares por meio de um canal usando API. Além disso, uma transação vinda da parte proprietária, para corrigir qualquer problema revelado em uma declaração financeira anterior (uma transação adversa), deve ser transferida para todos os pares (partes do projeto), para torná-los cientes de qualquer alteração nas declarações finais das três principais transações IPD.

Por consequência disso, as partes não proprietárias que implementaram as obras deverão solicitar as transações no contrato inteligente pelos valores apresentados do modelo BIM 5D. Estes valores são os recursos financeiros despendidos na implementação das obras acordadas, contabilizando a percentagem restante de lucro pelo risco com base nos valores acordados na fase de transferência de risco e responsabilidade acordada entre as partes envolvidas (Elghaish *et al.*, 2020).

Por fim, na fase de encerramento, como todos os riscos e recompensas devem ser compartilhadas durante esta fase, todas as partes podem solicitar o montante líquido do lucro total, economia de custos e custos reembolsados. Posteriormente, com base nas proporções de risco e acordados, cada parte pode receber a proporção devida em cada prazo: lucro, economia de custos e riscos (Elghaish *et al.*, 2020).

3.1.4. Protótipo de contrato Inteligente para construção modular com integração entre BIM, blockchain e IoT.

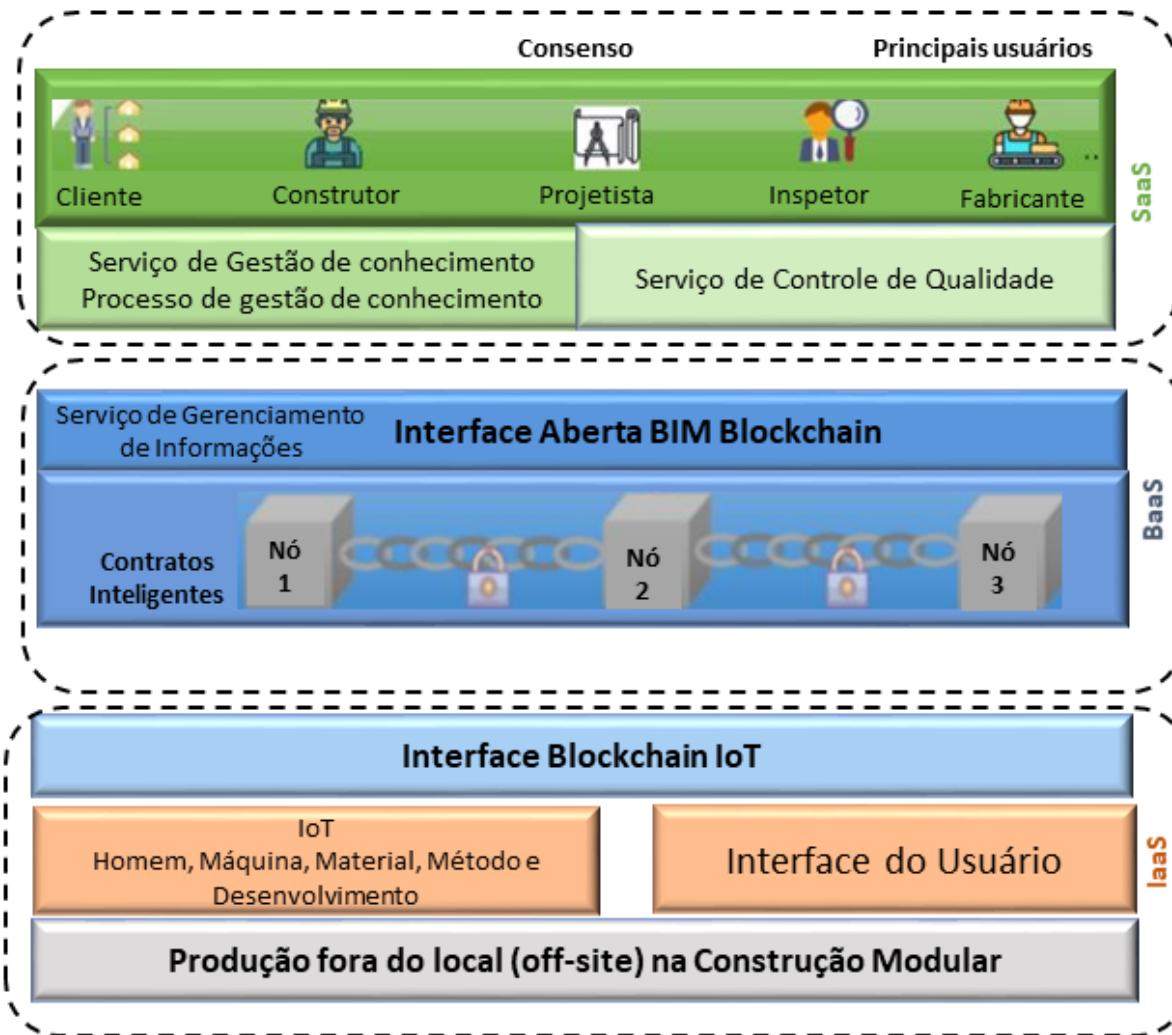
Wu *et al.*, (2022) desenvolveram um contrato inteligente que integra as tecnologias blockchain, IoT, e BIM para o gerenciamento da cadeia de produção de construção modular *off-site*. Dessa forma são produzidos módulos pré-fabricados que são rastreados por meio de etiquetagem e sensores de *Radio Frequency Identification* (RFID).

A natureza deste estudo é do tipo prova de conceito conforme classificado por Li e Kassem (2021). O protótipo do contrato inteligente foi testado em um cenário piloto baseado no funcionamento de uma fábrica de módulos pré-fabricados, com uma produção de 10 módulos em Foshan localizada na China.

O sistema BIM blockchain foi implementado na rede Hyperledger Fabric (versão 1.4), e o contrato inteligente foi escrito por meio de *JavaScript*. O ambiente de desenvolvimento foi no Linux 5.4.0-58-generic-lpae (5.4.0-58.64-18.04.1) (Ubuntu 18.04.1 LTS). O *back-end* foi implementado usando *SpringBoot* (versão 2.4.0) permitindo que a equipe de pesquisa desenvolvesse rapidamente um sistema de gerenciamento de banco de dados *MySQL*. O bloco gênesis do sistema BIM blockchain foi configurado para inicializar o mecanismo de consenso *Crash Fault Tolerant* (CFT). No contrato existem quatro integrantes principais, cliente, contratante principal, fabricante e inspetor (Wu *et al.*, 2022).

Os principais componentes do contrato como mostrado na Figura 15 são categorizados em três dimensões, ou seja, Infraestrutura como Serviço (IaaS), Blockchain BIM como Serviço (BaaS) e Software como Serviço (SaaS), em dados, informações e aspectos de conhecimento, respectivamente (Wu *et al.*, 2022).

Figura 15 – Visão geral da plataforma IoT-BIM habilitada para Blockchain



Fonte: Adaptado de Wu et al., (2022).

A primeira camada IaaS inclui o módulo IoT e as faces do usuário. A segunda camada BaaS inclui a estrutura de funcionalidade para interoperar as informações, semântica e inferências significativas com os sistemas existentes. A terceira camada SaaS atende às demandas de múltiplas partes interessadas com aplicativos de gerenciamento de processos e garantia de qualidade baseados em conhecimento conforme necessário e aplicativos de garantia de qualidade (Wu et al., 2022).

O IaaS do sistema inclui dois módulos, a saber, IoT e interface do usuário. A infraestrutura de ponta suporta o módulo IoT, que contém recursos de produção habilitados para IoT, protocolos, nós de gateway, nós de broker e nós de unidade de computação. Neste estudo, os recursos e processos da cadeia da produção modular a seus modelos BIM por meio de RFID, e os protocolos são usados para regular a

sincronização de dados-informações-conhecimento no processo de construção modular (Wu *et al.*, 2022).

Os nós de *gateway* atuam como uma interface para processar os dados coletados do RFID e alimentar os dados para os nós subsequentes. Os nós de *broker* são responsáveis por alocar nós de unidade de computação para lidar com tarefas sensíveis ao tempo ou transferir tarefas desafiadoras para a nuvem. Ao confiar em contratos inteligentes, as interfaces de IoT do blockchain podem fornecer aos usuários um controle operacional eficaz (Wu *et al.*, 2022).

O módulo de interface do usuário suporta interação do usuário na plataforma. Por exemplo, o cliente pode visualizar os resultados da inspeção do material, os dados do projeto dos módulos por meio da interface do usuário. Além disso, as interfaces do usuário desenvolvidas são conectadas a uma plataforma operacional baseada na web, permitindo que os usuários visualizem o progresso em tempo real da preparação para a produção, produção e inspeção por meio do modelo BIM importado (Wu *et al.*, 2022).

Em segundo lugar, a camada BaaS inclui dois módulos principais para interoperar informações, semântica e inferências. O primeiro módulo é o aberto (Interface BIM blockchain), estendendo o padrão BIM aberto existente IFC (ISO 16739-1:2018). O segundo módulo é o (sistema BIM blockchain), que inclui a rede, *ledger* e um conjunto de contratos inteligentes (Wu *et al.*, 2022).

Em terceiro lugar, O SaaS suporta um mecanismo de consenso plugável que permite que a plataforma seja mais efetivamente personalizada para se ajustar a casos de uso e modelos de confiança específicos. O bloco gênesis da rede foi configurado para inicializar o mecanismo de consenso CFT para a camada SaaS (Wu *et al.*, 2022).

3.1.5. Protótipo de contrato Inteligente para gestão da cadeia de suprimentos com integração entre BIM blockchain e IoT.

Brandín e Abrishami (2024) também elaboraram um contrato inteligente que integra IoT, BIM e blockchain para auxiliar no gerenciamento de toda a cadeia de suprimentos de pré-fabricados de aço e madeira e também realizar o pagamento automático dos pré-fabricados.

Um estudo de caso hipotético (prova de conceito) foi criado para simular o modelo de produção dos elementos pré-fabricados e ao sistema integrado blockchain-IoT e BIM. O contexto elaborado ocorreu na região de Portsmouth no Reino Unido, onde um centro institucional fictício recém-construído reproduziu todos os processos e fluxos de

trabalho de uma cadeia de suprimentos. Dessa forma, houve o envolvimento das partes interessadas como clientes, designers, fabricantes, logística e contratantes principais (Brandín; Abrishami, 2024).

O projeto utilizou a Hyperledger Fabric v2.0 e *chaincodes* escritos em Go (1.15.2) para gerenciar a rede blockchain e o mecanismo de consenso escolhido foi o CFT. Os membros do contrato são, o cliente e o contratado principal. Os termos do contrato foram acionados de acordo com as fases do modelo BIM, este modelo foi desenvolvido no Autodesk Revit (Brandín; Abrishami, 2024).

A estrutura do sistema do contrato foi dividida nas camadas IaaS, BaaS e SaaS em ambientes de nuvem de computação, *Fog* e *Edge*. O componente IaaS fornece recursos de computação virtual, incluindo hardware, protocolos e tecnologias principais para troca de dados da cadeia de suprimentos. A arquitetura do sistema se baseia nesses três pilares: IaaS para *Edge*, *Fog* e computação em nuvem, BaaS que contém uma plataforma de razão distribuída usando HLF e um conjunto de aplicativos e ferramentas para gerenciar SaaS.

Na camada IaaS as infraestruturas de *Edge*, *Fog* e a nuvem de computação foram usadas para capturar e espelhar dados das fábricas de produção, durante o transporte e no local, integrando dados da percepção à camada digital. A plataforma IoT incorporou integração RFID para capturar eventos e monitorar a produção do painel até os estágios de montagem. Etiquetas RFID ativas, passivas e semiativas foram selecionadas para propósitos específicos da cadeia de suprimentos com base em custo, tarefa e alcance de leitura (Brandín; Abrishami, 2024).

Os nós de *gateway* processam esses dados, vinculando-os aos nós de computação BIM para lidar com tarefas complexas e grandes modelos em um ambiente de nuvem. Essa integração garante atividades de gerenciamento da cadeia de suprimentos alinhado com as transações de rede no Hyperledger Fabric dentro da arquitetura do sistema. Isso garante a qualidade do processo e atualizações contínuas da camada BIM, facilitando a rastreabilidade precisa (Brandín; Abrishami, 2024).

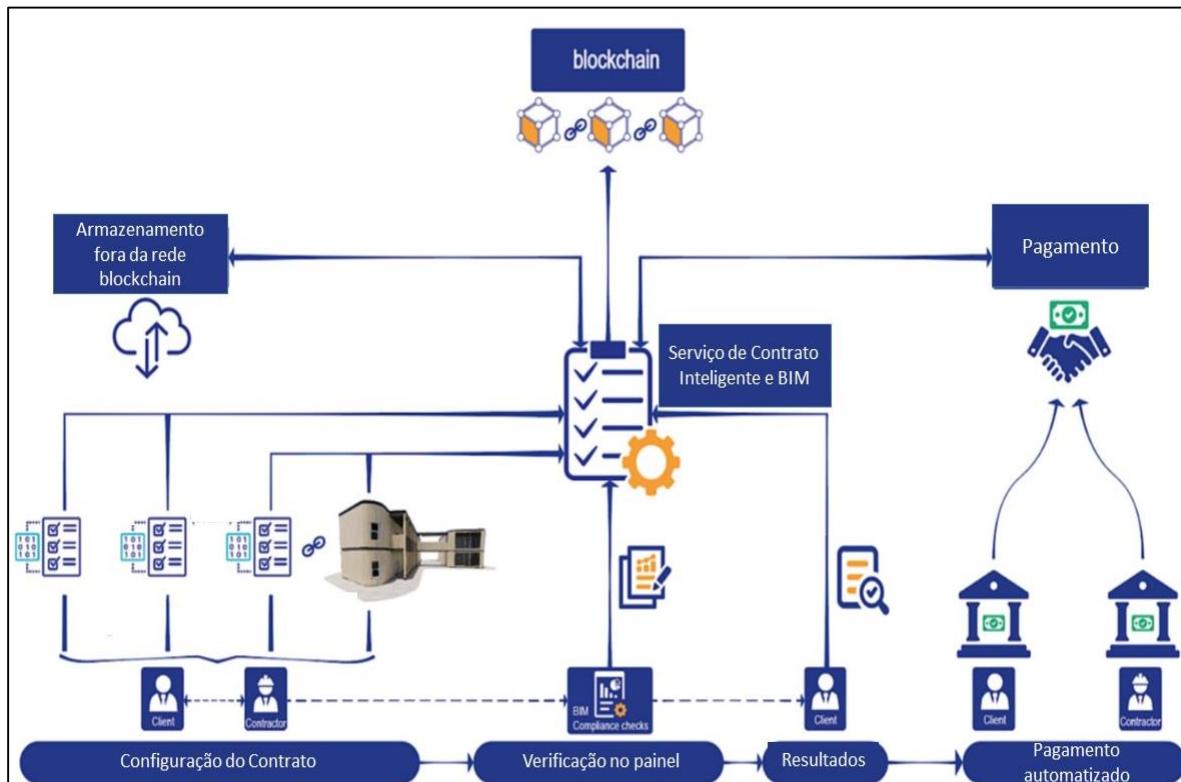
Na camada BaaS ocorre o funcionamento do *chaincode*, que integra organizações, canais, aplicativos descentralizados e contratos inteligentes responsáveis por compor a arquitetura do sistema e sustentar a execução do contrato inteligente. Nesse ambiente, as organizações são interligadas por canais que viabilizam a comunicação e a troca de informações de forma segura, sendo geridos por regras de governança estabelecidas em configurações de canal (Brandín; Abrishami, 2024).

Os aplicativos descentralizados emitem certificados digitais que asseguram a identidade dos participantes, enquanto aplicativos clientes executam transações relacionadas à cadeia de suprimentos, ao controle de qualidade, aos serviços digitais e à integração com o BIM. Os contratos inteligentes, por sua vez, apoiam a gestão do ciclo de vida de ativos, custos, recursos e elementos construtivos, promovendo a otimização dos processos entre camadas físicas, digitais e operacionais (Brandín; Abrishami, 2024).

Na camada SaaS os aplicativos se conectam com os *peers* para executar *chaincodes*, consultando ou atualizando os livros-razão. Respostas imediatas ocorrem para consultas, enquanto atualizações envolvem interações entre aplicativos, pares e serviços de pedidos (Brandín; Abrishami, 2024). Em conformidade com os padrões do Hyperledger Fabric, esses aplicativos se conectam a pares, acessando *ledgers* e *chaincode*, interagindo com redes de blockchain por meio do *Software Development Kit* (SDK).

Por outro lado, após toda configuração da arquitetura de rede, a Figura 16 ilustra o esquema da relação entre o contrato inteligente e as tecnologias integradas.

Figura 16 – Interações entre os membros do contrato inteligente



Fonte: Adaptado de Brandín e Abrishami (2024).

O modelo BIM é armazenado em nuvem, fora da rede blockchain, o modelo fornece dados geométricos, custos, quantidades e cronograma. Os participantes do contrato participam dos termos do contrato para que tudo ocorra como combinado, este modelo BIM está ligado diretamente a estas condições já preestabelecidas.

Por meio de um painel visual é possível que tanto o cliente como o contratado visualizem se os termos estão sendo cumpridos, após validação do cliente o pagamento é realizado para o contratante.

3.2. CONSIDERAÇÕES FINAIS DOS CAPÍTULOS 2 E 3

Este capítulo apresenta uma base conceitual para compreensão das tecnologias digitais que são utilizadas para desenvolvimento e fazem integração com o contrato inteligente proposto neste trabalho, sendo assim foi estabelecido o conceito sobre blockchain, modelagem de dados, BIM, a integração entre eles e o uso de contratos inteligentes na construção civil voltados para pagamentos de insumos ou serviços.

Dentre os tipos de rede blockchain apresentadas para o desenvolvimento de um contrato inteligente, a Hyperledger Fabric merece destaque por ser uma rede privada permissionada que oferece elevados graus de flexibilidade, aspecto essencial para atender às demandas de usuários empresariais.

Para a implantação e administração de uma rede baseada nessa tecnologia, faz-se necessário o uso de ferramentas que auxiliem tais processos, como a GoFabric, que permite a programação de contratos inteligentes mediante a utilização das propriedades fundamentais da arquitetura Hyperledger Fabric. Entre essas propriedades estão os *chaincodes*, as organizações, os *orderers*, os mecanismos de validação e endosso das transações, além dos canais de comunicação, todos cruciais para assegurar a execução correta do contrato, mantendo-o seguro, imutável e coerente com as características inerentes a redes blockchain permissionadas.

No que diz respeito à modelagem de dados, enfatiza-se sua importância na criação de um modelo conceitual de dados que visa identificar as entidades, atributos e relacionamentos de uma rede blockchain de acordo com o objetivo proposto por cada uma delas. Com isso, através da geração do MER que descreve tais elementos mencionados e auxilia o desenvolvedor da rede blockchain a entender melhor os processos existentes na rede criada antes de serem implantadas.

Por meio do DER, o desenvolvedor pode visualizar os processos de forma mais didática e comprehensível, sendo um passo inicial antes de programar uma rede blockchain. Além disso, faz-se necessária a utilização de modelagem de negócios em BPMN, que permite mapear e definir de forma clara o fluxo de negócios associado ao contrato, garantindo que sua lógica esteja alinhada às necessidades da cadeia de suprimento.

Em relação ao BIM e à utilização de um modelo BIM para ser integrado com a rede Hyperledger, é considerável para o modelo BIM o estabelecimento do LOIN, de modo que o nível de desenvolvimento do modelo atenda às especificações necessárias para transmissão dos dados ao contrato inteligente. Além disso, faz-se necessário o uso de um modelo BIM derivado, inserido na nuvem, de forma a viabilizar a conexão com a interface do contrato e garantir a interoperabilidade entre as plataformas envolvidas.

4 MÉTODO DE PESQUISA

Este capítulo apresenta o método de pesquisa utilizado para o desenvolvimento deste trabalho, incluindo a descrição da estratégia de pesquisa adotada, o delineamento do estudo e o detalhamento de cada etapa de pesquisa definida, visando alcançar o objetivo proposto.

4.1 ESTRATÉGIA DE PESQUISA

A estratégia de pesquisa adotada para o desenvolvimento deste trabalho é a *Design Science Research* (DSR), ou também conhecida como *Constructive Research* (CR), que envolve a ação do pesquisador sobre um determinado panorama, compreendendo um problema, concebendo e validando uma possível solução (Hevner; Chatterjee, 2010). Esta estratégia foi adotada por ser um método investigativo que procura desenvolver e planejar soluções para melhorar sistemas existentes, resolver problemas ou, ainda, criar novos artefatos que contribuam para melhorar a atuação humana, seja na sociedade ou nas organizações (Dresch; Lacerda; Antunes, 2015).

No contexto da DSR, o pesquisador utiliza-se do conhecimento científico para compreender problemas práticos e prescrever uma solução adequada para eles. O pesquisador atua não somente como observador, contudo também como construtor e avaliador do artefato. Além do mais, a DSR pode aplicar todos os métodos conhecidos para coletar e analisar dados, entretanto, as estratégias de pesquisa tendem a ser baseadas em casos e estratégias colaborativas e intervencionistas. Estratégias colaborativas aprofundam a compreensão do problema e das alternativas de intervenção, enquanto as intervencionistas facilitam o entendimento da dinâmica e nos testes dos vários conceitos de solução (Van Aken; Romme, 2009).

Para garantir maior assertividade na pesquisa, é fundamental identificar o que já foi desenvolvido sobre o artefato dentro de uma determinada classe de problemas antes de dar início ao seu desenvolvimento efetivamente (Dresch; Lacerda; Antunes, 2015).

A seguir são descritos os conceitos sobre cada fase da DSR:

- **Conscientização do problema:** consiste no levantamento do estado atual do tema abordado, identificando e compreendendo a problemática abordada através da revisão da literatura.
- **Sugestão do artefato:** consiste no estudo exploratório prático em canteiro de obras para teste das ferramentas utilizadas e entendimento dos processos relacionados ao método apresentado, resultando na elaboração da proposta preliminar.
- **Desenvolvimento do artefato:** consiste na estruturação e refinamento do escopo do método proposto, a partir da implantação em estudos de caso.
- **Avaliação do artefato:** consiste em avaliar o método a partir da definição de constructos e variáveis.
- **Conclusão:** consiste na formalização do método proposto, incluindo a apresentação de sua estrutura concluída e de recomendações para sua implementação.

Diante disto, esse trabalho se enquadra na lógica da DSR por se tratar de um problema de fato existente e relevante na indústria da construção civil, que ocorre devido à dificuldade para realizar o pagamento da concretagem de paredes moldadas *in loco*. Neste sentido, para a construção de uma solução que possa ser aplicada a esta realidade, propõe-se a utilização de tecnologias como a blockchain e o BIM compondo um artefato a ser implementado e avaliado em um estudo empírico.

Esta pesquisa propõe como artefato um método para pagamento do sistema de paredes de concreto moldadas *in loco* com apoio da integração da metodologia BIM e blockchain. Com isso, gera-se um protótipo de contrato inteligente semiautomático (chamado BIMLedger) para auxiliar os gestores nas tomadas de decisões, com privacidade, funcionalidade e segurança. A opção por um artefato do tipo método está relacionada ao aspecto do método representar um conjunto de passos propostos para que determinado resultado seja obtido (Lacerda *et al.*, 2013).

O nome BIMLedger reflete a integração entre duas tecnologias principais adotadas neste estudo: o BIM, responsável pela modelagem da informação da edificação, e o *Hyperledger Fabric*, uma rede de *blockchain* permissionada que garante a segurança e a automação dos contratos inteligentes. A união de "BIM" com "Ledger" simboliza o fluxo integrado de informações técnicas e financeiras da construção civil, proporcionando rastreabilidade, transparência e eficiência nos pagamentos.

4.2 DELINEAMENTO DA PESQUISA

O delineamento da pesquisa seguiu os princípios da DSR, conforme previamente apresentado. Para a construção do artefato proposto, a investigação foi estruturada com base nas etapas descritas na Figura 17. Cada uma dessas etapas compreende um conjunto de atividades executadas que resulta nos produtos de cada etapa.

Na etapa de Conscientização foram realizadas duas atividades principais. A RSL foi desenvolvida pelo autor em colaboração com duas alunas de iniciação científica, sendo uma do curso de Engenharia de Controle e Automação e a outra de Engenharia Civil.

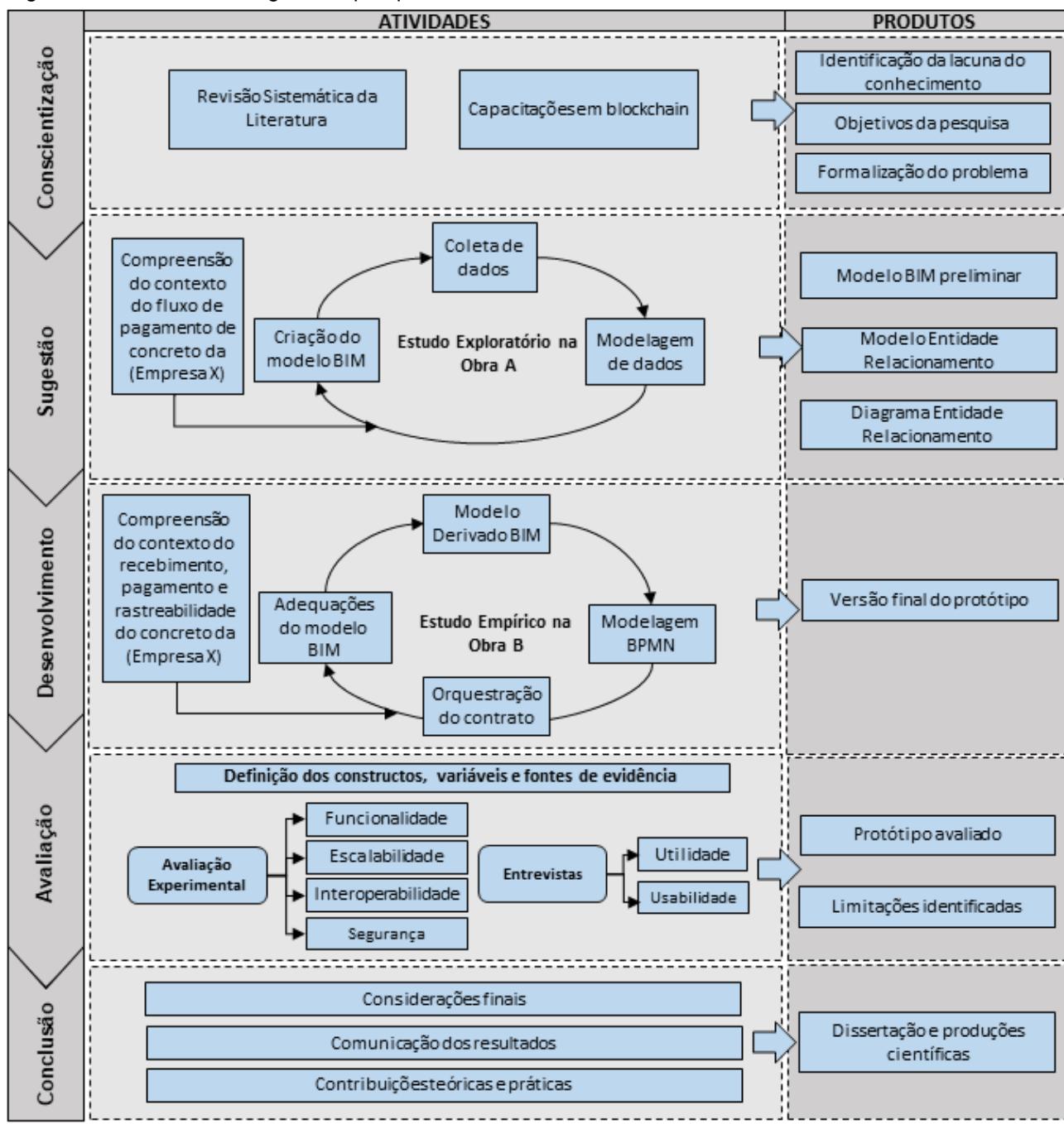
Na etapa de Sugestão, visando compreender o contexto do fluxo de pagamento do concreto, foi realizado um estudo exploratório na Obra A da Empresa X. Nessa etapa, desenvolveram-se três atividades principais. Essas atividades foram realizadas pelo autor com a participação das alunas de iniciação científica já mencionadas. Como resultado da modelagem de dados, elaboraram-se o MER e DER, os quais representam a estrutura lógica das informações envolvidas no processo de pagamento.

Na etapa de Desenvolvimento, visando compreender o processo de recebimento, pagamento e rastreabilidade do concreto, foi conduzido um estudo exploratório na Obra B da Empresa X. As adequações no modelo BIM, originalmente desenvolvido para a Obra A, foram realizadas por uma aluna de iniciação científica do curso de Engenharia Civil. A modelagem de negócios e os diagramas BPMN referentes ao fluxo de pagamento da concretagem foi realizada pelo autor. A orquestração do contrato inteligente foi dividida em duas frentes: contrato inteligente (*back-end*) e desenvolvimento do modelo BIM. A implementação do contrato contou com o apoio de um aluno de iniciação científica do curso de Engenharia da Computação, utilizando a plataforma GoFabric da empresa GoLedger, que, além de ser parceira técnico-científica da pesquisa, também forneceu assessoria técnica especializada. O desenvolvimento do *front-end* foi executado em colaboração com uma empresa parceira especializada em soluções de software. Como resultado, obteve-se uma versão final do BIMLedger.

Na etapa de Avaliação, foi realizada a avaliação do protótipo desenvolvido, estruturada em dois blocos distintos. O primeiro consistiu na avaliação experimental, realizada pela empresa especializada parceira em conjunto com o autor. Em seguida, foi realizada uma avaliação qualitativa com a participação dos entrevistados.

Na etapa de Conclusão, foram elaboradas as considerações finais, bem como a comunicação dos resultados e das contribuições teóricas e práticas da pesquisa. Como principais produtos, destacam-se elaboração da dissertação, a produção de trabalhos científicos e a formulação de diretrizes para o refinamento do BIMLedger.

Figura 17 – Delineamento geral da pesquisa



Fonte: O autor (2025).

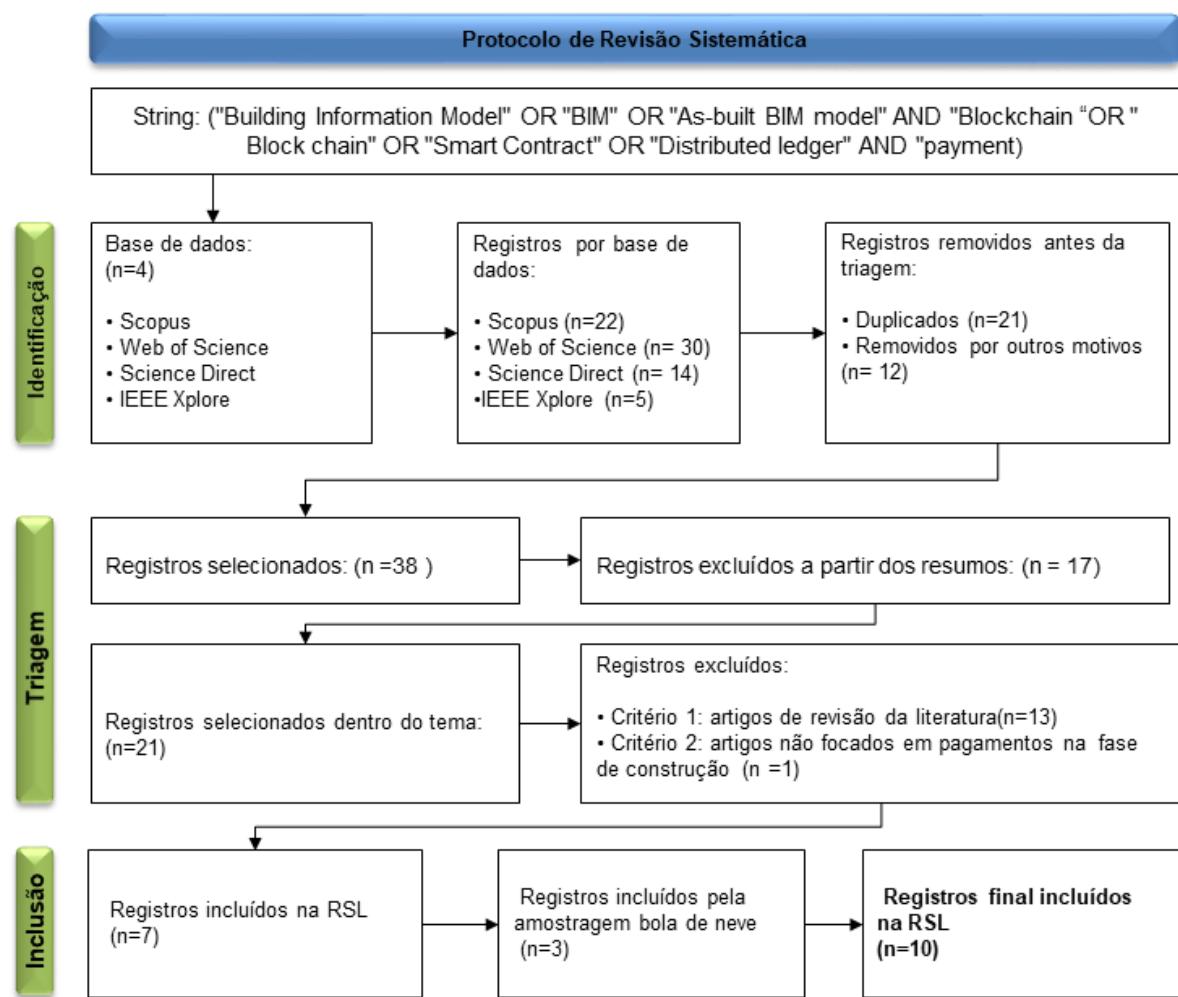
4.3 ETAPA DE CONSCIENTIZAÇÃO

Nesta etapa, comprehende-se as atividades da RSL e as duas capacitações em blockchain que o autor participou. A RSL teve como produto a identificação de lacunas do conhecimento sobre o tema em estudo, a formalização do problema prático da pesquisa e a definição dos objetivos da pesquisa.

4.3.1 Revisão Sistemática da Literatura

Uma RSL foi conduzida conforme o procedimento detalhado na Figura 18. O objetivo dessa RSL foi analisar o panorama atual da produção científica internacional referente à integração entre BIM e blockchain, com foco específico nos pagamentos de serviços ou insumos durante a fase de construção.

Figura 18 – Diagrama do protocolo de revisão sistemática.



Fonte: O autor (2025).

Esta RSL baseou-se no estudo de Dantas, Melo e Alberte (2022), que havia analisado a produção científica sobre a integração BIM e blockchain na fase de construção entre 2017 e janeiro de 2022. O presente trabalho deu continuidade e atualizou essa revisão, ampliando o escopo temporal para incluir o período de 2022 até maio de 2025. Isso permitiu oferecer uma visão mais abrangente e atualizada sobre o tema.

Para alcançar esse objetivo, inicialmente, executou-se uma *string* (estratégia de buscas) de pesquisa. Essa *string* foi selecionada considerando a escassez de estudos sobre o tema e a necessidade de uma abordagem mais abrangente para aplicação nas bases de dados especificadas.

Os resultados foram filtrados de acordo com os seguintes tópicos, títulos, palavras-chaves e resumos, englobando apenas artigos em inglês de periódicos da área de engenharia. Após a seleção dos artigos pela revisão sistemática da literatura, aplicou-se também o método de amostragem bola de neve, a fim de identificar estudos adicionais relevantes a partir das referências dos trabalhos já incluídos. Essa técnica, de caráter não probabilístico, consiste em solicitar aos autores dos artigos selecionados que indiquem outros estudos relevantes, permitindo que o conjunto de referências cresça como uma “bola de neve” (*rolling snowball*) à medida que novas citações são identificadas e analisadas (Ting *et al.*, 2025).

Antes da realização da etapa de triagem, foram agrupados e organizados todos os resultados da busca no software *Mendeley* para eliminação dos registros duplicados. Os resultados foram filtrados de acordo com os seguintes tópicos, títulos, palavras-chaves e resumos, englobando apenas artigos em inglês de periódicos da área de engenharia. Os resultados da RSL foram apresentados no Capítulo 3, na seção 3.1.1, bem como foram publicados por meio de um artigo em um congresso nacional de engenharia.

4.3.2 Capacitações em blockchain

Um treinamento introdutório sobre a rede Hyperledger Fabric foi realizado, oferecido pela empresa GoLedger. A GoLedger, parceira do Grupo de Pesquisa e Extensão em Gestão e Tecnologia das Construções (GETEC-UFBA) por meio de um termo de cooperação técnico-científica e educacional, desenvolve soluções blockchain utilizando a tecnologia HLF, por intermédio da plataforma GoFabric e do conjunto de ferramentas cc-tools. A empresa contribuiu significativamente para o desenvolvimento

deste estudo, promovendo a troca de experiências, fornecendo conhecimentos técnicos, ministrando cursos e prestando assessoria especializada.

Além disso, houve uma capacitação em blockchain com o especialista Mário Augusto Santos, do Instituto Federal da Bahia (IFBA). O objetivo dessa capacitação foi o desenvolvimento de um contrato inteligente na rede Hyperledger Fabric, utilizando a ferramenta Mini Fabric para a orquestração e testes do ambiente de rede.

4.4 ETAPA DE SUGESTÃO

Esta etapa teve como objetivo a realização do estudo exploratório. Este estudo visou compreender como ocorre o fluxo de pagamento do sistema de paredes de concreto moldadas *in loco* em campo. Como produto desta etapa foram desenvolvidos o modelo BIM preliminar, o MER e o DER.

4.4.1 Descrição da Empresa

A empresa construtora, Empresa X selecionada para realização deste estudo é uma organização de grande porte que atua no mercado brasileiro na área da construção desde 1979. Presente em mais de 160 cidades brasileiras e 22 estados, além do Distrito Federal, a empresa atua no segmento de imóveis residenciais para a classe média e média baixa, realizando atividades nas áreas de concepção do projeto, incorporação e construção.

A escolha da empresa fundamentou-se na existência de contato prévio com um engenheiro integrante de sua equipe, o qual desenvolveu seu trabalho de conclusão de curso sobre o mesmo tema desta pesquisa, o que favoreceu o alinhamento temático e a viabilidade da colaboração.

4.4.2 Descrição do insumo

O insumo selecionado como objeto de pagamento é o concreto usinado, empregado na execução de paredes, lajes e escadas moldadas *in loco*. O sistema construtivo utilizado é o de paredes de concreto, que se baseia em formas metálicas moduladas e armaduras de aço. O concreto é produzido em centrais dosadoras e transportado ao canteiro por caminhões-betoneira.

A escolha desse insumo decorre de sua elevada representatividade no orçamento das obras da Empresa X, o que o torna estratégico para a adoção de contratos de pagamento automatizados. Além disso, esse método construtivo é amplamente aplicado em empreendimentos habitacionais da Empresa X, como ilustrado na Figura 19.

Figura 19 – Edificação em fase de construção



Fonte: O autor (2025).

4.4.3 Descrição da Obra A

O estudo foi realizado em uma obra da Empresa X estudada, denominada Obra A, conforme ilustrado na Figura 20.

Figura 20 – Ilustração do empreendimento da obra A



Fonte: O autor (2025).

Essa obra está localizada em Salvador, o canteiro de obras estudado possui uma área total de 19.153,20 m² e 41944,88m² de área construída. O empreendimento é composto por 5 torres, cada uma com 18 pavimentos. Cada pavimento é formado por 8 apartamentos, totalizando 720 unidades. O processo selecionado para estudo foi o pagamento do sistema de parede de concreto, tendo em vista que o concreto representa um dos insumos de maior relevância nas obras da empresa analisada. Essa representatividade se traduz em um impacto financeiro significativo no orçamento da obra.

4.4.4 Coleta de dados

Com o objetivo de compreender o processo de pagamento do concreto na Obra A, foi realizada uma visita técnica de quatro horas ao canteiro, que visou identificar como esse fluxo ocorre na prática e quais são os participantes no processo de pagamento do concreto executado pela Empresa X. Complementarmente, foi analisado o documento digital intitulado Cartilha do Fornecedor, disponibilizado pela própria Obra A, o qual descreve os prazos e procedimentos que a empresa deve cumprir para efetuar os pagamentos aos seus fornecedores. Além disso, a Obra A forneceu os projetos arquitetônicos dos pavimentos-tipo, os quais para auxílio do desenvolvimento do modelo BIM.

4.4.5 Modelagem de dados na Obra A

Como produto da etapa de sugestão, foram desenvolvidos um Modelo Entidade-Relacionamento (MER) e um Diagrama Entidade-Relacionamento (DER) simplificado, contemplando três entidades principais: construtora, concreteira e laboratório de qualidade. O objetivo desses modelos foi oferecer suporte à estruturação da rede blockchain, representando as relações e os fluxos de dados entre os agentes envolvidos no processo de pagamento do sistema de parede de concreto.

O MER descreve de forma conceitual como essas entidades se relacionam e os processos existentes entre elas. A partir desse modelo, foi elaborado o DER utilizando a linguagem SQL, por meio da ferramenta *MySQL Workbench*, com o intuito de fornecer uma visão estruturada e detalhada do fluxo de pagamentos.

Durante a construção do MER e do DER, foram realizados ajustes para aprimorar a organização e a representação do modelo de dados. Entre esses ajustes, destaca-se a criação de tabelas intermediárias para representar adequadamente o relacionamento da entidade processo com seus diferentes tipos. Essas tabelas presentes no DER, incorporam chaves estrangeiras da entidade processo e dos tipos de processo, facilitando a identificação e o mapeamento preciso das variações de processo associadas a cada instância. As tabelas supracitadas estão ilustradas com maior detalhe no Capítulo 5 na seção 5.1.1.

4.4.6 Desenvolvimento do modelo BIM preliminar

Com base nas plantas baixas fornecidas em formato PDF, foram elaboradas novas plantas no AutoCAD, contemplando três representações distintas: uma planta baixa do pavimento tipo referente aos andares do primeiro ao nono, outra para os pavimentos do décimo ao décimo sexto, e uma planta específica para o térreo.

A partir dessas plantas, e utilizando os recursos de interoperabilidade entre o AutoCAD e o Revit, os arquivos foram importados para o ambiente do Revit, o que otimizou o processo de modelagem 3D. Os modelos desenvolvidos tiveram como principal objetivo representar o progresso da concretagem, focando exclusivamente nos elementos estruturais do sistema de paredes de concreto moldadas *in loco*, como paredes e lajes, essenciais para a análise do avanço físico da obra.

Para realizar a modelagem foram aplicados alguns requisitos do Revit, como a definição prévia da unidade de medida do projeto e o posicionamento dos níveis e eixos que servem como referência para o modelo 3D. Como as especificações originais do

projeto utilizaram a unidade de medida em centímetros, esse padrão foi mantido em todas as etapas, tanto na planta baixa desenvolvida no AutoCAD quanto na modelagem 3D no Revit.

Após esses ajustes iniciais, a integração com o AutoCAD foi realizada para garantir uma transição eficiente entre os formatos 2D e 3D, assegurando a precisão da modelagem. Com a planta baixa como base, as paredes foram posicionadas, seguidas pela inserção do piso e da laje, conforme as especificações do projeto real. Foram elaboradas dois modelos BIM, pois no projeto original do térreo até o nono pavimento tipo, os layouts apresentam quartos normais. Já do pavimento tipo décimo ao décimo sexto, e no pavimento 17, foi elaborado outro modelo BIM. Neste modelo, foi incluído um quarto adaptado para pessoas cadeirantes, atendendo às exigências de acessibilidade.

4.5 ETAPA DE DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO

O objetivo desta etapa foi desenvolver um método de pagamento para o sistema de paredes de concreto moldadas *in loco*, integrando as tecnologias BIM e blockchain. Como parte do desenvolvimento, foi realizado um estudo empírico, conduzido em outra obra, denominada Obra B, da Empresa X. O produto desta etapa foi o desenvolvimento de uma versão preliminar do protótipo de contrato inteligente.

4.5.1 Descrição da Obra B

Essa obra também está localizada em Salvador, o canteiro de obras estudado possui uma área total de 24.204,23 m². O empreendimento é composto por 24 blocos, com 5 pavimentos cada, sendo que cada bloco tem 20 apartamentos com o total de 480 apartamentos. A Figura 21 mostra uma visão ampla do Empreendimento B.

Figura 21 – Ilustração do Empreendimento B



Fonte: O autor (2025).

4.5.2 Compreensão do fluxo de recebimento ao pagamento de concreto

Para entender melhor o fluxo de pagamento do concreto na Empresa X, realizou-se um estudo empírico único na obra. O objetivo foi acompanhar e mapear o processo de recebimento, pagamento e rastreamento do concreto.

Inicialmente, coletaram-se dados através de entrevistas, análise documental e observação direta para compreender a fundo o fluxo de pagamento. Em seguida, revisou-se a "Cartilha do Fornecedor" da Empresa X, um documento já estudado na fase exploratória. Essa revisão foi essencial para entender melhor as datas e formas de pagamento das notas fiscais de serviço, o que ajudou a conduzir as entrevistas de forma mais eficiente. Além disso, analisaram-se as plantas baixas de um bloco específico para compreender a disposição das paredes e lajes do sistema de concreto no pavimento.

Conduziram-se três entrevistas informais estruturadas: uma com um analista de engenharia civil, outra com uma analista de administração e a última com um laboratorista. As entrevistas com os analistas foram realizadas no escritório, enquanto a do laboratorista ocorreu no laboratório de controle de qualidade. O objetivo foi entender os detalhes do fluxo de pagamento sob as perspectivas da engenharia, do setor financeiro e do laboratório de qualidade.

Por fim, realizou-se uma observação direta no canteiro de obras, com duração média de duas horas, para acompanhar de perto as etapas do processo de pagamento. As entrevistas com os analistas de engenharia e de administração foram guiadas por um roteiro com 18 questões abertas, cujo conteúdo completo está no Apêndice A. O Quadro 5 detalha a caracterização dos entrevistados e das entrevistas.

Quadro 5 – Dados das entrevistas.

Participante	Cód.	Tempo de experiência no cargo atual	Data	Duração da entrevista
Analista de Engenharia Civil	AE	2 anos	12/09/2024	35 min
Analista de Administração	AA	14 anos	12/09/2024	30 min
Laboratorista	L	8 anos	22/10/2024	32 min

Fonte: O autor (2025).

4.5.3 Desenvolvimento de modelo BIM final

Após a fase preliminar de desenvolvimento dos modelos BIM no estudo exploratório, foram realizados ajustes e aprimoramentos significativos para garantir a fidelidade do modelo. As principais correções incluíram a inserção de vãos de janelas e portas, bem como a modelagem detalhada das varandas em cada pavimento. Outro avanço importante foi a integração dos pavimentos-tipo, que antes eram modelados separadamente. Essa unificação resultou em uma representação mais realista e precisa do sistema construtivo da edificação.

Para o detalhamento das informações do modelo BIM, foi adotada a metodologia LOIN, conforme diretrizes da ISO 7817-1:2024. O detalhamento das informações é organizado a partir de três categorias principais:

- **Geometria:** Representação gráfica dos elementos (forma, dimensão, posição no espaço).
- **Informação Alfanumérica:** Propriedades e atributos não gráficos (como resistência, fabricante, código do item).
- **Documentos:** Arquivos complementares (memoriais, manuais, especificações técnicas, certificados).

Além disso, a estrutura do LOIN é guiada por quatro perguntas essenciais, que definem o contexto do requisito de informação:

- **Why (Por quê?):** Define o propósito da informação. Exemplo: Para análise estrutural, orçamento, aprovação legal, manutenção.
- **When (Quando?):** Define o marco de entrega ou momento no ciclo de vida em que a informação deve estar disponível. Exemplo: Estudo preliminar, projeto executivo, construção, operação.
- **Who (Quem?):** Define o responsável pelo fornecimento e o destinatário da informação. Exemplo: Projetista para o Coordenador BIM.
- **What (O quê?):** Define o objeto e a estrutura de detalhamento ao qual a informação se refere. Exemplo: Parede - Elemento de vedação do pavimento térreo.

4.5.4 Desenvolvimento do Modelo BIM Derivado

A plataforma Autodesk Platform Services foi selecionada para hospedar, gerenciar e disponibilizar o modelo BIM derivado, por oferecer recursos que estendem as funcionalidades dos softwares da Autodesk, como o Revit. Essa plataforma permite o desenvolvimento de aplicações personalizadas e fluxos de trabalho conectados, a partir dos dados originais de um projeto. Por meio de suas APIs especializadas, é possível armazenar, visualizar, extrair e analisar informações do modelo BIM desenvolvido no Revit.

Com base nas configurações do Revit, foram inseridos ao modelo os parâmetros de identidade necessários para o acompanhamento do progresso da concretagem e seu respectivo rastreamento. Esses parâmetros estão detalhados no Capítulo 5, seção 5.2.4. Após a parametrização, o arquivo do modelo, no formato .RVT, foi carregado (*upload*) na plataforma Autodesk Platform Services, tornando-o acessível localmente por meio da API de visualização da Autodesk.

Para o desenvolvimento da API de integração, foi utilizado o Visual Studio Code, editor de código-fonte que oferecem suporte a linguagens como JavaScript, TypeScript e Node.js, amplamente utilizadas na construção de aplicações web interativas. Após a codificação e os testes locais, a API foi implantada por meio da plataforma *Render*, responsável por sua hospedagem *online*.

A plataforma *Render* é uma solução de infraestrutura em nuvem que permite a publicação de APIs, aplicações web, sites estáticos, bancos de dados e serviços de *back-end* de forma simples, automatizada e escalável. Sua adoção garantiu maior agilidade no processo de implantação do serviço de visualização e manipulação do modelo BIM derivado, sem necessidade de configuração manual de servidores.

4.5.5 Modelagem de negócios

Após a elaboração do modelo BIM derivado, procedeu-se à etapa de modelagem de negócios, com o objetivo de compreender e estruturar o fluxo de pagamento do concreto. Para essa finalidade, utilizou-se a notação BPMN, por meio da qual foram desenvolvidos dois fluxogramas (*AS-IS*) representando, respectivamente, o processo de pagamento da concretagem das paredes e o processo de pagamento de notas fiscais.

Esses fluxogramas foram adaptados do estudo de Piccoli *et al.* (2023), servindo como base de referência para a compreensão dos procedimentos atualmente empregados. Além disso, foi elaborado um fluxograma (*TO-BE*) simplificado, que descreve a proposta de fluxo de pagamento a ser incorporado no sistema BIMLedger. Esta simplificação se deve ao elevado número de processos e setores envolvidos, além da quantidade de documentos gerados, o que se tornou inviável a reprodução da rede blockchain exatamente como mostrado no estado atual.

4.5.6 Orquestração do contrato inteligente

Após a etapa de modelagem BPMN, foram definidos os requisitos técnicos necessários para o desenvolvimento do contrato. A tecnologia escolhida para dar suporte à solução foi a blockchain permissionada Hyperledger Fabric, adotada por sua flexibilidade, segurança e adequação a ambientes corporativos.

A arquitetura foi estruturada em duas camadas principais: contrato inteligente (*back-end*) e BIM, com o objetivo de assegurar uma comunicação eficiente entre os dados da modelagem da obra e a interface interativa com o usuário.

O contrato envolve três atores principais: a construtora (contratante), a concreteira (contratada) e o laboratório de controle tecnológico, este último pertencente à própria Empresa X e localizado no canteiro de obras da Obra B. Essa configuração simplificada foi adotada intencionalmente, a fim de viabilizar a execução controlada da simulação do fluxo de pagamento, reduzindo a complexidade operacional e os custos associados a uma implementação em escala real.

A adoção de um cenário reduzido se justifica pela complexidade do processo de pagamento do concreto na Empresa X, o qual envolve múltiplos setores e sistemas distintos. A simulação implementada neste protótipo e seu funcionamento detalhado estão descritos no Capítulo 5, seção 5.2.2, onde são apresentadas as interações entre os participantes, os critérios de validação e os gatilhos automáticos para a liberação do pagamento.

Front-end

Para o desenvolvimento do *front-end*, foi utilizada a ferramenta *Vite*, voltada à inicialização otimizada de aplicações em *ReactJS*. O *front-end* funciona como a camada de interação entre o usuário, o modelo BIM e o contrato inteligente, sendo responsável pelas seguintes funcionalidades:

- **Cadastro de entidades:** possibilita o registro de participantes como construtora, concreteira e laboratório, associando-os a funções contratuais específicas.
- **Geração de solicitações:** permite a criação de requisições para envio e pagamento de concreto, emissão de comprovantes e aprovação de etapas.
- **Registro de eventos:** inclui funcionalidades para registrar notas fiscais, resultados de ensaios (exemplo: o ensaio de abatimento do tronco de cone do concreto *slump teste*), traço e resistência característica do concreto à compressão (*fck*).
- **Feedback em tempo real:** informa o status da validação das transações processadas pelo contrato inteligente.
- **Visualização do modelo BIM:** oferece a exploração interativa do modelo 3D, refletindo o progresso da concretagem da obra.

Para o desenvolvimento do *front-end*, foram realizadas reuniões com a empresa parceira contratada, com o objetivo de alinhar as demandas do projeto e finalizar o protótipo conforme a proposta estabelecida. O Quadro 6 apresenta uma síntese do escopo discutido durante as reuniões.

Quadro 6 – Dados das reuniões

Reunião	Objetivo	Data
1	Apresentação das demandas para desenvolvimento do protótipo	17/02/2025
2	Apresentação das propriedades da plataforma GoFabric para integração com o front-end	11/03/2025
3	Apresentação da versão parcial do front-end	17/03/2025
4	Integração do modelo BIM derivado com o front-end	28/03/2025
5	Apresentação da versão final do front-end	11/03/2025
6	Hospedagem do front-end na nuvem	20/03/2025

Fonte: O autor (2025).

A estilização do *front-end* foi realizada com SASS (*Syntactically Awesome Style Sheets*), em português Folhas de Estilo Sintaticamente Incríveis, permitindo uma escrita mais modular e eficiente de CSS.

Implantação

O *front-end* desenvolvido foi empacotado e implantado na plataforma Vercel, que permite a implantação automatizada sem necessidade de configuração manual de servidores. Essa abordagem está alinhada aos princípios de desenvolvimento ágil, garantindo eficiência no processo de entrega contínua do protótipo. Todos os aspectos técnicos das ferramentas, bibliotecas e integrações utilizadas no desenvolvimento do protótipo estão sintetizados no Quadro 7, ao final desta seção.

Quadro 7 – Descrição das ferramentas utilizadas para desenvolver o protótipo

CONTRATO INTELIGENTE			
Ferramenta	Versão	Descrição da empresa desenvolvedora	Função
Hyperledger Fabric	v2.x	Linux Foundation, organização sem fins lucrativa voltada para o desenvolvimento de tecnologias de código aberto	Plataforma blockchain utilizada para dar suporte ao <i>back-end</i> do protótipo
GoFabric	Assinatura Plus	GoLedger empresa especialista em Blockchain e contratos inteligentes sem código para empresas	Desenvolvimento do <i>back-end</i> do protótipo
BIM			
Ferramenta	Versão	Descrição da empresa desenvolvedora	Função
Autodesk Revit	2025.4	Autodesk, empresa que produz ferramentas para desenvolvimento de projetos nas áreas de engenharia	Desenvolver modelo BIM
Autodesk Platform Services	-		Integrar, visualizar e manipular o modelo BIM na web
Virtual Studio Code	1.98.2	Microsoft empresa de tecnologia que desenvolve, fabrica, licencia softwares	Editar códigos-fonte da API do Autodesk Platform Services
FRONT-END			
Ferramenta	Versão	Descrição da empresa desenvolvedora	Função
React.JS	-	Meta Platforms, conjunto de empresas de tecnologia e redes sociais	Desenvolvimento do <i>front-end</i> e validação dos dados do protótipo
HOSPEDAGEM EM NUVEM			
Ferramenta	Versão	Descrição da empresa desenvolvedora	Função
Vercel	-	Desenvolvida pelos próprios fundadores da plataforma	Hospedar na nuvem o <i>front-end</i> (interface web) do protótipo.
Render	-	Render Inc., empresa que oferece uma plataforma de computação em nuvem para desenvolvedores	Hospedar na nuvem a API do modelo BIM derivado.
Amazon AWS	Assinatura t2.micro	Amazon, empresa que oferece serviços de computação em nuvem e comércio eletrônico	Hospedar na nuvem o <i>back-end</i> desenvolvido pela GoFabric

Fonte: O autor (2025).

4.5.7 Nível de Maturidade Tecnológica do BIMLedger

O *Technology Readiness Levels* (TRL), em português denominado de Nível de Maturidade Tecnológica é um sistema de medições que oferece suporte a avaliações da maturidade de uma tecnologia específica e à comparação consistente da maturidade entre diferentes tipos de tecnologia (Mankins, 2004). Essa representação como ilustrada na Figura 22, considera os principais macros etapas do ciclo de vida de um projeto, permitindo uma visão clara da evolução tecnológica ao longo do desenvolvimento.

Figura 22 – Detalhamento das etapas dos TRLs



Fonte: Advanced Business Global Innovation (ABGI) Brasil (2025).

Após o desenvolvimento do BIMLedger, optou-se por classificá-lo de acordo com a escala TRL visando comunicar de forma clara e objetiva o estágio de evolução tecnológica em que o protótipo se encontra. Essa abordagem permite situar o projeto ao longo de todo o seu ciclo de desenvolvimento, desde a concepção inicial até a sua eventual implementação em escala comercial.

Além disso, a utilização da escala TRL facilita o diagnóstico do progresso tecnológico, fornecendo subsídios importantes para o planejamento estratégico dos próximos passos. Outro motivo relevante para classificar o nível de maturidade do BIMLedger é subsidiar a tomada de decisões sobre novos investimentos, com foco na evolução do projeto para os próximos estágios da escala TRL.

4.6 ETAPA DE AVALIAÇÃO DO MÉTODO

As próximas duas subseções descrevem mais detalhadamente as duas atividades de avaliação realizadas nesta etapa.

4.6.1 Avaliação experimental

A avaliação experimental seguiu os princípios metodológicos sugeridos por Hevner *et al.* (2004), que recomendam o uso de experimentos controlados, realizados em ambientes simulados ou laboratoriais. Neste trabalho, optou-se por uma simulação computacional, utilizando dados artificiais inseridos no sistema para observar o comportamento do protótipo em relação a critérios previamente definidos. Essa abordagem permitiu avaliar o artefato com foco nos constructos de funcionalidade, escalabilidade, interoperabilidade e segurança.

Cada constructo foi operacionalizado por meio de variáveis específicas, definidas com base nos achados da RSL e nos resultados parciais obtidos nas fases anteriores da pesquisa. A seguir, apresenta-se a estrutura analítica adotada:

- **Funcionalidade:** diz respeito ao desempenho do contrato inteligente e às ações disponíveis ao usuário. As variáveis analisadas foram: velocidade de execução do código e capacidade de visualização dos dados (Capocasale *et al.*, 2023).
- **Escalabilidade:** refere-se à capacidade do sistema de sustentar o aumento da carga de transações sem perda significativa de desempenho. A variável considerada foi o nível de desempenho sob carga crescente (ISO/IEC 25010:2023).
- **Interoperabilidade:** relaciona-se à integração do contrato inteligente com APIs e sistemas externos. A variável analisada foi o nível de compatibilidade com interfaces externas (ISO/IEC 25010:2023).
- **Segurança:** abrange os mecanismos de proteção que asseguram a integridade e a autenticidade das informações registradas na rede. A variável analisada foi o nível de validação das entradas de dados (Capocasale *et al.*, 2023).

O Quadro 8 apresenta uma síntese dos constructos, variáveis e fontes de evidência utilizadas na realização da avaliação experimental.

Quadro 8 – Constructos, variáveis e fontes de evidência para avaliação de desempenho

DESEMPENHO DO PROTÓTIPO		
Constructos	Variáveis	Fontes de evidência
Funcionalidade	• Nível de capacidade visualização dos dados	• Testes em laboratório
Escalabilidade	• Nível de desempenho com carga crescente	
Interoperabilidade	• Nível de facilidade de integração	
Segurança	• Nível de validação de entradas	

Fonte: O autor (2025).

Para cada constructo avaliado no BIMLedger, foi elaborada uma tabela específica de avaliação, conforme ilustrado nas Tabelas 1 a 4. A estrutura dessas tabelas baseou-se nos critérios definidos pela norma ISO/IEC 25010:2023, que estabelece um modelo de qualidade para sistemas e produtos de software, contemplando características como compatibilidade, interoperabilidade, confiabilidade, usabilidade, entre outras.

No contexto desta aplicação, as tabelas foram adaptadas para refletir níveis graduais de aderência aos atributos de qualidade da referida norma, possibilitando uma avaliação sistemática do protótipo. A avaliação experimental foi conduzida pela empresa parceira contratada para auxiliar no desenvolvimento do BIMLedger.

Cabe destacar que a ISO/IEC 25010:2023 não define escalas quantitativas ou percentuais para mensuração direta dos atributos de qualidade. Por esse motivo, foi desenvolvida uma metodologia própria de avaliação, elaborada com base interpretativa nos princípios da norma. Essa metodologia permite mensurar quantitativamente o desempenho do sistema, utilizando faixas percentuais de 0% a 100%, associadas a classificações comprehensíveis, como “Não Funcional”, “Altamente Frágil”, “Robusto” e “Totalmente Confiável”.

Embora essas classificações não estejam formalmente previstas na ISO/IEC 25010:2023, foram estruturadas de forma a representar, com clareza, os graus de conformidade do protótipo em relação aos requisitos esperados para cada característica avaliada.

Avaliação quanto à funcionalidade

Tabela 1 – Escala de avaliação de nível de capacidade visualização de dados

Percentual	Classificação	Descrição Técnica
0%	Não Funcional	Não atende aos critérios de adequação funcional. Nenhum dado é renderizado. Ausência de comunicação entre interface e back-end.
1–20%	Altamente Frágil	Baixa tolerância a erros. Visualiza apenas estruturas rígidas. Falhas com dados fora do padrão. Usabilidade comprometida.
21–40%	Pouco Robusto	Visualização parcial com falhas recorrentes. Interface pouco madura, sem mecanismos de recuperação.
41–60%	Aceitável	Interface funcional com limitações. Boa adequação à tarefa, mas com falhas de recuperabilidade.
61–80%	Robusto	Visualização confiável. Boa maturidade e tolerância a erros. Falhas apenas em situações anômalas (como formatos inesperados ou campos nulos).
81–95%	Muito Robusto	Alta usabilidade e confiabilidade. Trate respostas incompletas com mensagens amigáveis.
96–99%	Quase à Prova de Falhas	Interface altamente adaptativa. Resiliência à entrada de dados incompleta ou irregular.
100%	Totalmente Confiável	Visualização perfeita e resiliente. Todos os dados válidos são exibidos corretamente.

Fonte: O autor (2025).

Avaliação quanto à escalabilidade

Tabela 2 – Escala de avaliação da nível de desempenho com carga crescente

Percentual	Classificação	Descrição
0%	Não Funcional	O algoritmo falha completamente. Não retorna resultados válidos.
1–20%	Ineficiente	Executa de forma muito lenta ou com muitos erros. Pouco ou nada utilizável.
21–40%	Insatisfatório	Funciona minimamente, mas com grande consumo de tempo ou recursos.
41–60%	Aceitável	Entrega resultados corretos, mas ainda com gargalos notáveis.
61–80%	Eficiente	Funciona bem na maioria dos casos. Boa performance e uso moderado de recursos.
81–95%	Muito Eficiente	Altamente otimizado. Responde rapidamente e consome poucos recursos.
96–99%	Quase Ótimo	Quase no limite da eficiência ideal. Melhorias possíveis são marginais.
100% Ótimo (Eficiência Máxima)		Eficiência máxima teórica ou prática. Nenhuma melhoria significativa possível.

Fonte: O autor (2025).

Avaliação quanto à interoperabilidade

Tabela 3 – Escala de avaliação de nível de facilidade de integração

Percentual	Classificação	Descrição Técnica
0%	Incompatível	Falha total na comunicação com interfaces externas. Sem interoperabilidade.
1–20%	Altamente Limitado	Interoperabilidade extremamente restrita. Exige intervenção manual constante.
21–40%	Compatibilidade Parcial	Compatível com algumas interfaces, mas com erros frequentes e dependência de configuração.
41–60%	Compatível com Restrições	Funciona com interfaces padrão, mas sensível a atualizações ou mudanças.
61–80%	Compatível na Maioria dos Casos	Integra-se com a maioria das interfaces esperadas. Possui tolerância a falhas.
81–95%	Altamente Compatível	Alta interoperabilidade com diversos sistemas. Inclui fallback e adaptação.
96–99%	Quase Totalmente Integrável	Adaptação quase total a mudanças. Mínima necessidade de reconfiguração.
100%	Compatibilidade Máxima	Integração universal e resiliente. Coexistência plena em qualquer ambiente.

Fonte: O autor (2025).

Avaliação quanto à segurança

Tabela 4 – Escala de nível de validação de entrada de dados

Percentual	Classificação	Descrição Técnica
0%	Sem Confiabilidade	O sistema falha completamente. Não há tratamento funcional nem de erros.
1–20%	Baixa Robustez	O algoritmo apresenta funcionalidade limitada, atendendo apenas a um subconjunto mínimo de entradas válidas.
21–40%	Confiabilidade Fraca	Ainda que execute parte das funcionalidades esperadas, há falhas recorrentes em entradas válidas e ausência de medidas de prevenção de erro.
41–60%	Confiabilidade Parcial	O sistema tem funcionalidade razoável, aceitando a maioria das entradas válidas.
61–80%	Robustez Moderada	O comportamento do algoritmo é consistente na maioria dos casos.
81–95%	Alta Confiabilidade	Elevada cobertura funcional e resiliência a entradas inválidas.
96–99%	Conformidade Quase Total	O sistema exibe comportamento consistente, previsível e seguro.
100%	Confiabilidade Máxima	O algoritmo cumpre plenamente os requisitos funcionais e não funcionais.

Fonte: O autor (2025).

4.6.2 Entrevistas semiestruturadas para avaliação

A entrevista semiestruturada, conforme descrita por Yin (2015), é uma das principais estratégias de coleta de dados em estudos de caso por sua capacidade de equilibrar estrutura e flexibilidade. Esse tipo de entrevista parte de um roteiro previamente elaborado com perguntas-chave alinhadas aos objetivos da pesquisa, mas permite que o entrevistador se afaste do *script* sempre que surgirem temas relevantes durante a conversa, diferindo assim tanto da entrevista estruturada, que segue uma ordem fixa, quanto da entrevista aberta, que não parte de um planejamento prévio.

Essa abordagem oferece um equilíbrio entre direção e espontaneidade, garantindo que tópicos centrais sejam explorados sem inibir o aprofundamento em aspectos inesperados, mas pertinentes. Além disso, é especialmente adequada para investigações de fenômenos complexos inseridos em contextos reais, já que combina rigor metodológico com adaptabilidade e permite aplicar o mesmo roteiro a diferentes participantes sem transformar as respostas em padrões engessados (Yin, 2015).

As entrevistas semiestruturadas do estudo contaram com a participação de dois profissionais: um analista em engenharia civil da Empresa X e um advogado com experiência em contratos aplicados à construção civil. As discussões foram conduzidas com base em um roteiro estruturado, visando coletar percepções qualitativas sobre a aplicabilidade e a utilidade da solução proposta.

Durante a discussão colaborativa, os avaliadores analisaram o método com foco na relevância e aplicabilidade prática da solução proposta, conforme orientações metodológicas de Dresch, Lacerda e Júnior (2015). Essa abordagem favoreceu a geração de novas ideias, promoveu o refinamento das soluções apresentadas e possibilitou uma análise crítica mais aprofundada dos resultados obtidos até o momento.

A avaliação realizada pelos participantes concentrou-se em dois constructos principais: utilidade e usabilidade, definidos a partir da literatura especializada e das necessidades identificadas no contexto organizacional.

- **Utilidade:** refere-se à percepção do usuário quanto ao valor prático da solução, englobando a facilidade de aprendizado, a experiência de uso da interface web e o atendimento às demandas do processo de pagamento.

As variáveis analisadas incluíram:

- Relação custo-benefício percebida.
 - Nível de necessidade de integração com sistemas existentes.
 - Grau de adequação do protótipo às necessidades da empresa no processo de pagamento.
 - Contribuição para o rastreamento do concreto.
 - Contribuição para o rastreamento e pagamento de notas fiscais.
- (Leite, 2014).
- **Usabilidade:** diz respeito à facilidade de uso da interface do protótipo, especialmente quanto à organização visual e à naveabilidade. A variável analisada foi o nível de facilidade de uso em relação ao layout da aplicação (Leite, 2014).

Os constructos, variáveis e respectivas fontes de evidência analisados estão apresentados no Quadro 9.

Quadro 9 – Constructos, variáveis e fontes de evidência para avaliação dos requisitos do usuário

REQUISITOS DO USUÁRIO FINAL		
Constructo	Variáveis	Fontes de evidência
Utilidade	<ul style="list-style-type: none"> • Relação custo-benefício • Nível de necessidade de integração com sistemas existentes • Nível de adequação as necessidades da empresa referente ao processo de pagamento • Nível de auxílio ao rastreamento do concreto • Nível de auxílio no rastreamento e pagamento de notas fiscais • Nível de redução do tempo de pagamento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Entrevista semiestruturada
Usabilidade	<ul style="list-style-type: none"> • Nível de facilidade de uso em relação ao layout do protótipo 	<ul style="list-style-type: none"> • Entrevista semiestruturada

Fonte: O autor (2025).

O Quadro 10, por sua vez, reúne os constructos, as variáveis e as afirmações relacionadas a cada uma variável, que foram utilizadas no processo de avaliação realizada pelos entrevistados.

Quadro 10 – Constructos, variáveis para avaliação do artefato pelos entrevistados

Constructo	Variáveis	Afirmações
Utilidade	Relação custo-benefício	A relação custo benefício do protótipo é satisfatória.
	Nível de necessidade de integração com sistemas existentes	É necessária a integração do protótipo com outros sistemas da empresa.
	Nível de adequação as necessidades da empresa referente ao processo de pagamento	O protótipo é adequado às necessidades da empresa referente ao pagamento do sistema de parede de concreto.
	Nível de auxílio ao rastreamento do concreto	O protótipo auxilia concretamente no rastreamento do concreto
	Nível de auxílio no rastreamento e pagamento de notas fiscais	O protótipo auxilia efetivamente no rastreamento e pagamento de notas fiscais dentro da empresa.
	Nível de redução do tempo de pagamento	O protótipo tem o potencial de reduzir o tempo do processo de pagamento do sistema de parede de concreto.
Usabilidade	Nível de facilidade de uso em relação ao layout do protótipo	A interface do protótipo é amigável.

Fonte: O autor (2025).

As afirmações foram aplicadas por meio de um formulário do *Google Forms*, que se encontra no Apêndice B. No instrumento de avaliação, os participantes foram convidados a indicar seu grau de concordância em relação a cada afirmação, utilizando uma escala Likert de cinco pontos: "Discordo totalmente", "Discordo", "Neutro", "Concordo" e "Concordo totalmente". Além disso, os participantes puderam oferecer comentários verbais durante as discussões abertas, enriquecendo o processo com percepções qualitativas.

4.6.3 Descrição das entrevistas

As entrevistas ocorreram em dois momentos distintos, a primeira entrevista foi realizada em 12/05/2025 e a segunda entrevista foi realizada em 16/05/2025. Cada sessão foi realizada por videoconferência, utilizando a plataforma *Google Meet*, e gravada mediante o consentimento prévio dos participantes, com o objetivo de possibilitar sua posterior transcrição e análise. O formulário foi disponibilizado somente durante a reunião aos participantes, pois era necessário realizar uma explicação prévia dos constructos e variáveis a serem avaliados.

A reuniões foram estruturadas em três etapas principais e seguiram o mesmo escopo: (1) Apresentação do Protótipo, (2) Aplicação do Formulário e (3) Discussão Central, conforme detalhado no Quadro 11. A primeira etapa, de caráter introdutório, contemplou a apresentação de conceitos que embasaram o desenvolvimento do protótipo, bem como a demonstração de seu funcionamento.

Na segunda etapa, os participantes foram convidados a preencher um questionário confidencial com dados sobre seus perfis profissionais e, em seguida, realizar a avaliação do protótipo com base nos constructos e variáveis previamente definidos.

A terceira etapa, correspondente à fase de discussão central, constituiu o núcleo da avaliação. Nessa fase, foram coletadas as percepções dos participantes por meio das respostas ao formulário e de discussões abertas, conduzidas de maneira estruturada, com o intuito de estimular uma análise crítica e colaborativa do artefato proposto.

Quadro 11 – Descrição das etapas das entrevistas semiestruturadas

Item	Etapa	Descrição	Duração
1	Introdução	Apresentação do funcionamento do protótipo	10 min
2	Aplicação do formulário	Explicação do formulário de avaliação	5 min
3	Informações Centrais	Discussão das respostas do formulário	20 min

Fonte: O autor (2025).

Os participantes das entrevistas foram selecionados da indústria da construção civil com base em sua expertise nas áreas de interesse definidas neste estudo e em seu conhecimento técnico do sistema construtivo de paredes de concreto. O participante E1 trabalha diretamente com o acompanhamento do processo executivo e pagamento do sistema de paredes de concreto moldadas *in loco*.

O participante E2 é especialista no setor de contratos na construção civil e expertise em Blockchain para contratos. O Quadro 12 apresenta os perfis profissionais dos participantes.

Quadro 12 – Perfis dos profissionais dos participantes das entrevistas

Participante	Formação	Cargo	Anos de experiência
E1	Engenharia Civil	Analista de produção	Menos de 5 anos
E2	Direito	Coordenador jurídico	Menos de 5 anos

Fonte: O autor (2025).

4.7 ETAPA DE CONCLUSÃO

A etapa final desta pesquisa consistiu na formalização do protótipo, construído com base nas avaliações realizadas ao longo do estudo. Nessa fase, foram elaboradas as considerações finais, consolidando os aprendizados e as contribuições geradas durante todo o processo. Além disso, essa etapa gerou produções científicas, descritas no item 6.2.

5 APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos ao longo do presente estudo, os quais estão organizados em três seções correspondentes às etapas de Sugestão, Desenvolvimento e Avaliação. Já os resultados relacionados à etapa de Conscientização, que envolveram a identificação de lacunas de conhecimento e a formalização da RSL foram detalhados no Capítulo 3, na Seção 3.1.1.

5.1 RESULTADOS DA ETAPA DE SUGESTÃO

Esta seção apresenta os resultados do estudo exploratório realizado Obra A da Empresa X.

5.1.1 DER

O DER foi desenvolvido a partir das descrições Fluxograma (AS-/S) do estado atual do processo de pagamento de concreto descrito no estudo de Piccoli *et al.* (2023). O DER visa garantir que a estrutura de dados refletisse o processo de pagamento de concreto de forma simplificada. Além de identificar os atores e entidades essenciais, bem como eles se relacionam dentro do processo de pagamento do concreto.

A estrutura do DER foi modelada a partir de tabelas que representam as entidades do sistema. Cada tabela é composta por um conjunto de atributos, que armazenam informações específicas da entidade correspondente, como identificadores, nomes, estados ou justificativas. Um exemplo prático dessa estrutura é a tabela "Histórico de Movimentação do Documento", conforme ilustrado na Figura 23.

Figura 23 – Tabela de Histórico de Movimentação do Documento

Histórico de Movimentação do Documento	
idHistórico de Movimentação do Documento	INT
Setor origem	VARCHAR(10)
Setor destino	VARCHAR(10)
Liberado	TINYINT(1)
Justificativa	VARCHAR(45)
Documento_idDocumento	BIGINT
Indexes	

Fonte: O autor (2025).

Esta tabela registra eventos de movimentação de documentos entre setores no fluxo de pagamento, funcionando como um registro das ações realizadas. A tabela contém:

Chave Primária: idHistórico de Movimentação do Documento (INT)

- Representado pelo ícone de chave amarela.
- É o identificador único de cada movimentação registrada na tabela.
- Garante a unicidade de cada linha (evento de movimentação).

Atributos

- **Setor origem VARCHAR(10):** Indica o setor que enviou o documento.

Exemplo: “Engenharia” ou “Financeiro”.

- **Setor destino VARCHAR(10):** Indica o setor para onde o documento foi enviado.

Exemplo: “Financeiro” ou “Suprimentos”.

- **Liberado TINYINT(1):** Armazena um valor booleano (0 ou 1) o número “1” indica que o documento foi liberado e o número “0” indica que ainda não foi liberado.

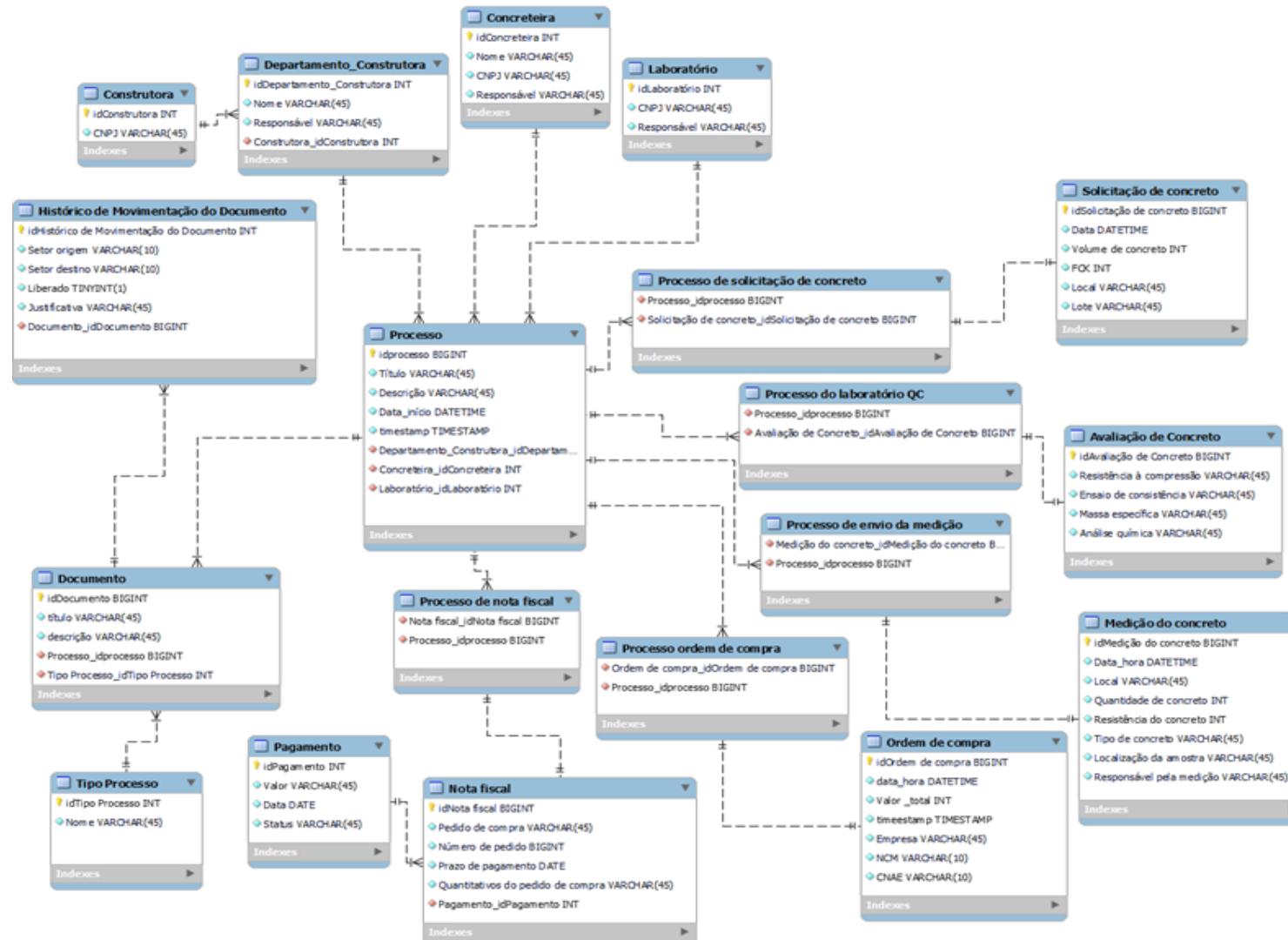
- **Justificativa VARCHAR(45):** Trata-se de um campo descritivo que tem como finalidade explicar o motivo da liberação do documento. Nele, podem ser registradas observações como: "Verificado e aprovado", "Correção pendente", "Aguardando assinatura", entre outras justificativas que descrevam o status ou a ação tomada em relação ao documento.

Chave Estrangeira

- **Documento_idDocumento(BIGINT):** Representado pelo ícone de chave vermelha. É uma chave estrangeira, que referencia a tabela Documento. Indica a qual documento específico aquele histórico de movimentação pertence.

A Figura 24 ilustra o Diagrama de Entidade-Relacionamento completo do fluxo de pagamento do concreto. Já o diagrama BPMN, localizado na seção 5.2.1, detalha de forma mais específica o fluxo atual do processo de pagamento do concreto da Empresa X.

Figura 24 – DER do fluxo de pagamento do concreto



Fonte: O autor (2025).

5.1.2 MER

O MER oferece uma visão estruturada e detalhada do DER. Na descrição do MER, nesse cenário, observa-se a existência dos atores principais (Construtora, Concreteira e Laboratório de Controle e Qualidade) como entidades, que permite uma representação clara e precisa das interações e transações, assegurando que todas as partes do processo sejam definidas e rastreáveis. Dessa forma os atores principais foram identificados como:

- **Construtora:** Identificação geral da empresa.
- **Departamento_construtora:** Setores da construtora, onde ocorrem os processos.
- **Concreteira:** Empresa fornecedora de concreto.
- **Laboratório de Qualidade:** Setor responsável pelo controle tecnológico do concreto.

Além disso, há as entidades que se relacionam com os atores (Histórico de Movimentação do documento, Processo e Documento). Cada uma dessas entidades desempenha um papel fundamental no fluxo de pagamento de concreto, com a entidade “processo” servindo como o ponto central que coordena as interações entre os documentos e o histórico de movimentação. Já o “tipo de processo”, classifica os tipos de processo que ocorrem dentro do fluxo. A entidade “documento” representa qualquer documento (pedido, nota fiscal, medição etc.).

A entidade Histórico de Movimentação desempenha um papel relevante para manter os registros e detalhes no contexto do fluxo de pagamento de concreto. Ela representa todo o trajeto percorrido por um documento desde o seu início até a conclusão da operação de um determinado processo. Esta representação é especialmente relevante, uma vez que, dentro nesse fluxo, um documento pode não ser liberado e precisa retornar à origem para uma reavaliação.

Isso permite uma compreensão abrangente de todas as etapas pelas quais o documento passa, incluindo eventuais revisões, reavaliações ou rejeições. Essa transparência e rastreabilidade são essenciais para garantir a integridade e a eficiência do processo de pagamento de concreto. Além disso, é importante destacar que o Histórico de Movimentações estabelece uma relação de N para 1 com a entidade documento. Isso significa que um documento pode ter vários históricos associados a ele, refletindo as diferentes mudanças e atualizações ocorridas ao longo do tempo.

Esses dados são essenciais para auditar e validar contratos inteligentes em blockchain no BIMLedger.

A entidade Processo, pela sua natureza multifacetada, engloba uma variedade de outras entidades que definem seu tipo e representa todas as atividades envolvidas no fluxo de pagamento de concreto, desde a solicitação inicial do material até a emissão da nota fiscal. Dentro desse amplo espectro de operações incluem-se etapas cruciais como a requisição de concreto, sua avaliação e medição.

É fundamental ressaltar que a entidade Processo não apenas inicia as operações a serem realizadas, mas também é responsável por gerar os documentos necessários ao longo do fluxo de pagamento. A visualização e descrição destes documentos com bases nas atividades são ilustradas no diagrama BPMN na seção 5.2.1.

Da mesma forma, se estiver envolvido na avaliação do concreto, produzirá o relatório correspondente a essa avaliação. Essa capacidade de gerar diferentes tipos de documentos evidencia a versatilidade da entidade no processo e sua importância no contexto do fluxo de pagamento de concreto, e então, estabelece-se uma relação de 1 para N com a entidade documento. Ademais, a entidade processo também estabelece uma relação de 1 para N com as entidades que definem seu tipo, uma vez que o processo pode ser de vários tipos, como mencionado anteriormente.

Além disso, a introdução da entidade "Tipo de Processo", com uma chave estrangeira na entidade documento, desempenhando um papel importante. Essa abordagem visa facilitar a identificação dos documentos vinculados a um processo específico, garantindo uma maior fluidez no fluxo de trabalho. Ao estabelecer essa relação entre documentos e tipos de processo, evitam-se interrupções desnecessárias, especialmente quando múltiplos documentos estão associados a um mesmo processo em andamento.

Dentro do Processo, destaca-se a etapa de solicitação e entrega de concreto, que representa o ponto de partida do fluxo operacional. A "Solicitação de concreto" contém informações essenciais como a data, o volume solicitado, o local de entrega e a identificação do processo ao qual está vinculada. Essa solicitação é formalmente conectada ao fluxo principal por meio da entidade "Processo de solicitação de concreto", que garante a rastreabilidade e a integração dos dados.

O "Processo do laboratório QC" estabelece a conexão entre o processo principal e o laboratório responsável pelos ensaios, permitindo o acompanhamento técnico e documental das amostras coletadas. A "Avaliação de concreto" registra os resultados obtidos, (f_{ck}), *slump* teste e demais parâmetros relevantes para a qualidade do material. Essa avaliação técnica é fundamental para a automação do fluxo de pagamento no BIMLedger, pois permite condicionar a liberação dos recursos financeiros ao desempenho efetivo do concreto, conforme previsto nos critérios do contrato inteligente.

Após a entrega do concreto, a medição do volume efetivamente recebido é realizada e registrada na entidade "Medição de concreto", que inclui dados como quantidade medida, local, setor responsável e eventuais observações relevantes. Esses dados são então transmitidos à construtora através do "Processo de envio de medição", etapa fundamental para validar o fornecimento e viabilizar os procedimentos subsequentes, como controle de qualidade e autorização de pagamento.

A etapa de compra e pagamento corresponde ao fluxo financeiro do processo, sendo fundamental para o encerramento das obrigações contratuais. A "Ordem de compra" é responsável pela formalização da aquisição do concreto, contendo informações como data de emissão, valor acordado e o responsável pela solicitação. Em seguida, a "Nota fiscal" registra os dados fiscais da operação, incluindo o valor faturado, o fornecedor envolvido e a vinculação com o pagamento correspondente. O "Pagamento" é então realizado com base nesses registros, informando a data e o valor efetivamente quitado.

As entidades "Processo ordem de compra" e "Processo nota fiscal" atuam como elementos de integração entre o processo técnico e os documentos financeiros, garantindo a consistência e a rastreabilidade das informações. Essa etapa representa o núcleo do fluxo do BIMLedger, pois é nela que o contrato inteligente opera comparando os dados de medição e avaliação técnica do concreto, verificando se a entrega está conforme os critérios definidos e, a partir disso, autorizando ou recusando automaticamente o pagamento.

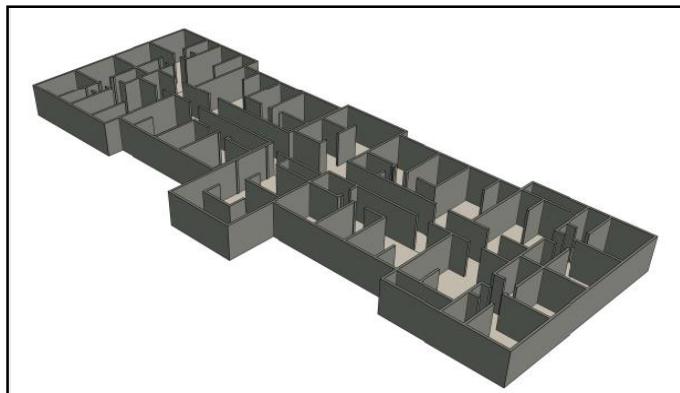
O DER apresentado é tecnicamente adequado para a implementação do BIMLedger, pois organiza os dados de forma modular e relacional, viabilizando a integração entre as diversas etapas do processo. Além disso, contempla o controle de qualidade e as medições como elementos passíveis de parametrização contratual, permitindo que esses dados sejam utilizados como condições para a execução automática de pagamentos por meio de contratos inteligentes. O modelo também

integra documentos fiscais e financeiros ao fluxo do processo, e apresenta entidades que favorecem a rastreabilidade e auditoria, aspectos essenciais para aplicações baseadas em blockchain.

5.1.3 Modelos BIM preliminar

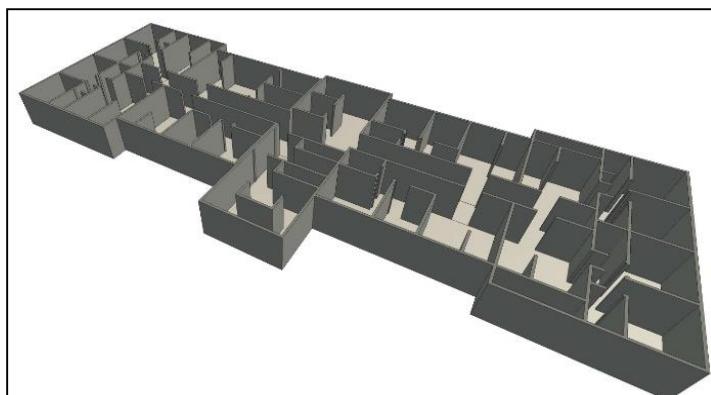
Os modelos BIM foram desenvolvidos de acordo com as plantas baixas fornecidas pela Empresa X, conforme as Figuras 25, 26.

Figura 25 – Modelagem 3D pavimento tipo (1° ao 9°) e térreo sem laje.



Fonte: O autor (2025).

Figura 26 – Modelagem 3D pavimento tipo (10° ao 17°) e térreo sem laje.



Fonte: O autor (2025).

5.2 RESULTADOS DA ETAPA DE DESENVOLVIMENTO

Nesta seção são apresentados os resultados da etapa de desenvolvimento.

5.2.1 Modelo BIM final

Após o desenvolvimento do modelo BIM preliminar, foi realizado o detalhamento do LOIN visando organizar e estruturar as informações necessárias no modelo BIM final. Esse modelo, desenvolvido para ser integrado ao contrato inteligente, concentra os dados essenciais para o rastreamento das atividades e entregas vinculadas ao fornecimento de concreto.

Dessa forma, o modelo BIM não apenas representa geometricamente os elementos da construção, mas também funciona como uma fonte confiável de dados operacionais, permitindo a construtora monitorar com precisão o cumprimento das etapas contratuais. O Quadro 14 mostra o detalhamento das informações do modelo BIM da edificação em estudo, estruturado conforme as diretrizes da ISO 7817-1:2024.

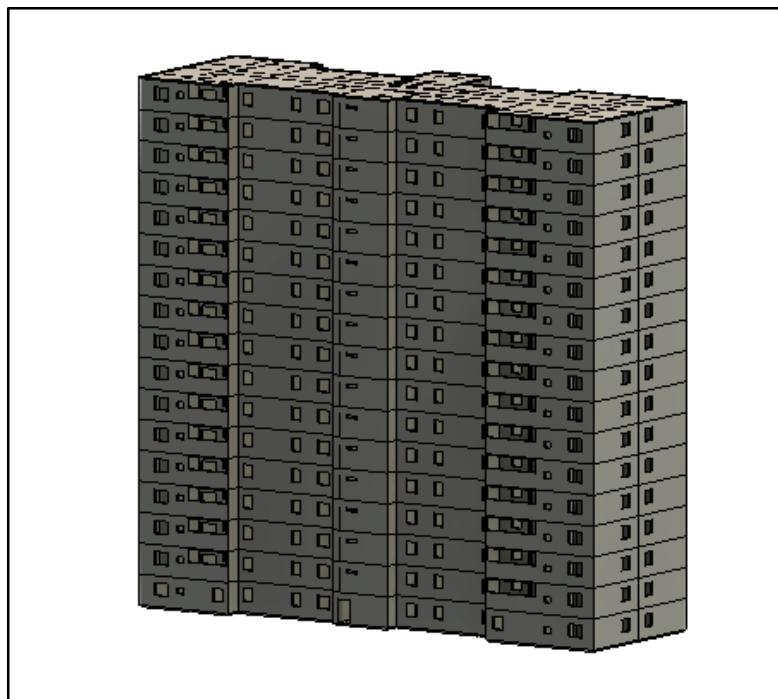
Quadro 13 – Detalhamento do nível de informações necessárias do modelo BIM

Informação	Categoria	Why (Propósito)	When (Marco de entrega)	Who (Fornecedor/Receptor)	What (Objeto/ Estrutura)
Dimensões (largura, altura, espessura, área)	Geométrica	Dimensionamento e Compatibilização de projeto	Projeto Executivo	Arquiteto/Engenheiro Estrutural	Parede e lajes/Vedações e coberturas por pavimento
Volume de concreto	Alfanumérica	Rastreamento do concreto	Execução	Concreteira/Gestor da obra	Paredes e lajes/Volume de concreto executado por elemento modelado
Localização do bloco no empreendimento	Alfanumérica	Rastreamento do concreto	Execução	Coordenação/Equipe de obra	Paredes e lajes/Bloco de referência para controle de execução e rastreamento
Localização do pavimento por edificação	Alfanumérica	Rastreamento do concreto	Execução	Coordenação/Equipe de obra	Paredes e lajes/Pavimento de referência para controle de execução e rastreamento
Especificações do concreto (traço, brita, fck)	Alfanumérica	Controle de qualidade do concreto	Execução	Gestor da obra/Concreteira	Paredes e lajes/ Especificações técnicas para controle de execução e rastreamento
Resultado do slump teste	Alfanumérica	Controle de qualidade do concreto	Execução	Laboratório/Gestor da obra	Paredes e lajes/ Controle tecnológico para execução e rastreamento

Fonte: O autor (2025).

Após a fase inicial de modelagem BIM, foram realizados ajustes técnicos para aprimorar a fidelidade do modelo, incluindo a inserção de aberturas (portas e janelas), a modelagem detalhada das varandas e a unificação dos pavimentos-tipo previamente modelados separadamente. Esses aprimoramentos resultaram em uma representação mais precisa do sistema construtivo, conforme ilustrado na Figura 27.

Figura 27 – Modelo BIM final da edificação



Fonte: O autor (2025).

Após a modelagem da geometria no modelo BIM foram inseridos os parâmetros de identidade, necessários para realizarem a leitura e pagamento de cada fase da concretagem. O primeiro tipo de parâmetro inserido foi chamado de “Rastreamento” que teve como objetivo informar a localização dos objetos concretados em seus respectivos pavimentos e blocos, assim como mostrar as especificações do concreto avaliado.

A partir da definição dos parâmetros de rastreamento, foi desenvolvido um código identificador no modelo BIM, associando cada elemento aos respectivos dados técnicos. O Quadro 14 apresenta a estrutura e os componentes desse código. Por exemplo, o código “B01BR0F20P01SL22V10” representa o primeiro bloco (B01), brita tipo 0 (BR0), concreto com resistência característica à compressão de 20 MPa (F20), primeiro pavimento (P01), valor do *slump* teste de 22 centímetros (SL22) e volume de 10 m³ de concreto (V10). Ressalta-se que os valores referentes ao tipo de brita e ao fck do concreto são padronizados conforme as diretrizes do controle tecnológico da Empresa X, não apresentando variação numérica entre os elementos.

Quadro 14 – Composição do código do parâmetro de rastreamento

Composição do Código	
Bloco	B01,B02,B03 [...]
Brita	BR0
FCK	F20
Pavimento	P01,P02,P03 [...]
Slump teste	SL22, SL23,SL24 [...]
Volume	V10, V11, V12 [...]

Fonte: O autor (2025).

O segundo tipo de parâmetro de identidade desenvolvido foi denominado “Status”, com o objetivo de indicar a situação da concretagem de cada pavimento. Esse parâmetro permite identificar se o pavimento já foi concretado ou não, contribuindo para o acompanhamento do progresso da obra. No ambiente do Revit, o *status* é representado por uma *checkbox*, (caixa de checagem); quando marcada, indica que o pavimento está concretado; quando desmarcada, indica que o pavimento ainda não foi concretado. A Figura 28 indica os referidos parâmetros, enquanto que o procedimento de inserção dos parâmetros de identidade está detalhado no Apêndice D.

Figura 28 – Parâmetros de Rastreamento e Status do modelo BIM no Revit



Fonte: O autor (2025).

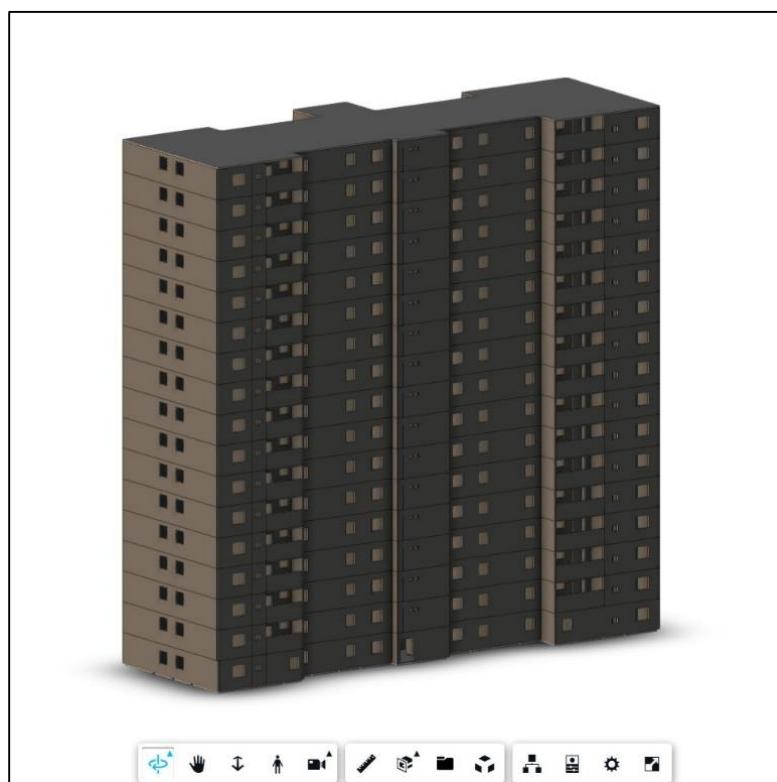
Para que a integração entre o modelo BIM e o *front-end* do BIMLedger ocorra de forma eficiente e automatizada, é fundamental a padronização da estrutura dos dados. No ambiente BIM, desenvolvido no Autodesk Revit, cada pavimento possui dois parâmetros essenciais diretamente vinculados à validação de pagamento na interface do BIMLedger: a localização do pavimento, representada no formato padronizado (P01, P02, P03, etc.), conforme definido no código de rastreamento, e o status de concretagem, que indica se o pavimento foi ou não executado. No *front-end*, ao ser realizada uma solicitação, o sistema compara automaticamente a localização informada com o dado correspondente registrado no modelo BIM.

Essa correspondência é fundamental, pois, no momento da emissão do comprovante de pagamento, o sistema verifica o status do pavimento diretamente no modelo. Caso o status esteja definido como "concretado", o comprovante é gerado; caso contrário, o processo é interrompido. A manutenção dessa estrutura padronizada garante que os pagamentos sejam autorizados exclusivamente para as etapas efetivamente concluídas, assegurando a rastreabilidade, confiabilidade e automação do processo. Por fim, o modelo BIM é exportado para a Autodesk Platform Service gerando o modelo BIM derivado que será apresentado na próxima seção.

5.2.2. Modelo BIM derivado

O desenvolvimento do modelo derivado envolveu a utilização das APIs e extensões nativas do Ecossistema Digital do Autodesk Platform Service. Para gerar a aplicação completa, foram seguidos tutoriais disponíveis no site da Autodesk. Toda a programação foi realizada na linguagem Java Script (Node.js), com algumas implementações em HTML para colocação do modelo em instância local. A Figura 29 mostra o modelo BIM inserido na Autodesk Platform Service.

Figura 29 – Representação 3D no visualizado da Autodesk Platform Service



Fonte: O autor (2025).

O procedimento para criação do modelo BIM derivado se encontra no Apêndice E.

5.2.3 Fluxo de pagamento do concreto (AS-/S) atualizado

De acordo com a coleta de dados realizada no estudo empírico, foi elaborado um diagrama BPMN que representa uma atualização do fluxograma AS-/S do fluxo de pagamento do concreto apresentado por Piccoli *et al.* (2023). Esse diagrama está ilustrado na Figura 47 e se encontra no Apêndice C.

O BPMN descreve de forma estruturada as interações entre a construtora, a concreteira e o laboratório de controle de qualidade, este último pertencente à construtora e que está situado no canteiro da Obra A. O processo modelado abrange desde o cadastro e a conferência do contrato com a concreteira até a emissão do pedido de compra e o envio da documentação para o setor responsável pelo pagamento, refletindo a dinâmica real observada no canteiro.

Este processo é composto pelas seguintes atividades:

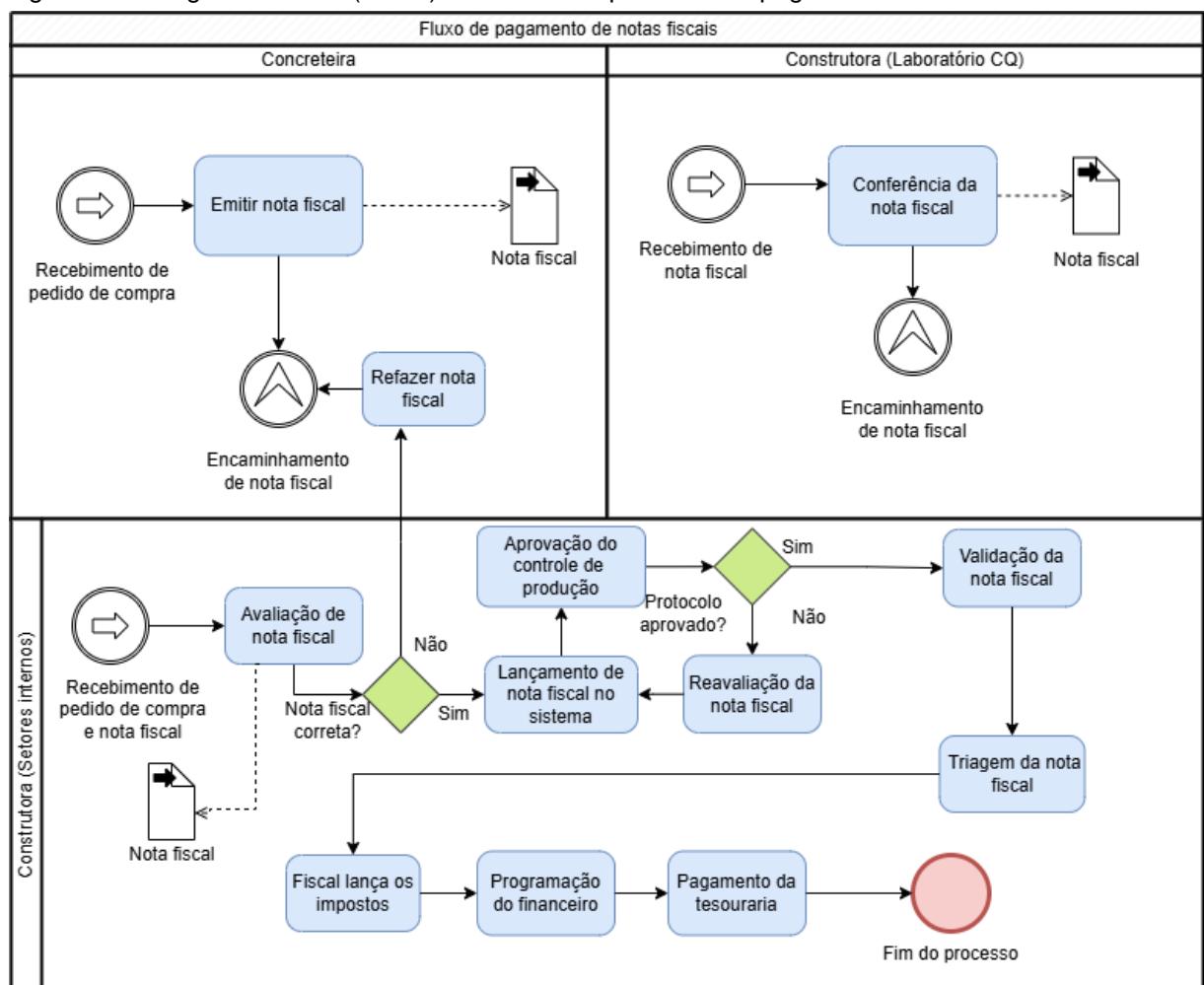
- A construtora solicita o concreto para a concreteira, em seguida é realizado o cadastro da concreteira e é gerado um contrato (documento);
- A concreteira recebe este contrato e realiza a conferência, caso o contrato não seja aprovado o documento é reenviado para construtora para correção;
- Após a aprovação do contrato, a concreteira é autorizada a enviar o concreto à obra por meio de um caminhão betoneira;
- A construtora envia a medição e especificação do concreto, em seguida é gerado um relatório de medição (documento);
- A concreteira envia o concreto juntamente com a nota fiscal para a obra, em seguida o caminhão betoneira ao entrar na obra passa pelo Laboratório de controle de qualidade;
- O laboratório avalia a nota fiscal e realiza o *slump* teste, caso o concreto não atenda a qualidade ele é rejeitado pela construtora e devolvido para concreteira para redosagem ou descarte;
- Após a aprovação do concreto, o caminhão betoneira enviado pela concreteira se dirige ao local da concretagem. No local, o operador da concreteira realiza a operação de bombeamento, enquanto os funcionários da construtora executam o espalhamento do concreto nas formas. O mapeamento e o rastreamento do concreto são realizados por meio de uma plataforma específica da empresa construtora.

- Nesse mapeamento, são registrados os locais exatos onde cada caminhão betoneira lançou o concreto, incluindo informações como bloco, pavimento, parede, laje, valor do fck e o resultado do slump teste;
- A construtora avalia a medição, caso não esteja conforme, a medição é reenviada à concreteira para que seja corrigida;
- Após a aprovação da medição é emitido o pedido de compra (documento);
- A construtora envia o pedido de compra para os setores internos.

5.2.4 Fluxo de pagamento da nota fiscal (AS-IS) atualizado

Após o fluxo de pagamento do concreto, ocorre o fluxo de pagamento da nota fiscal referente ao serviço executado pela concreteira. O diagrama BPMN, conforme ilustrado na Figura 30, representa uma atualização do fluxograma AS-IS do estado atual do pagamento de notas fiscais descrito por Piccoli *et al.* (2023). Esse modelo visa detalhar o processo de faturamento e validação do serviço de entrega de concreto, abrangendo as etapas desde a emissão da nota fiscal pela concreteira até o efetivo pagamento pela tesouraria da construtora. O fluxo envolve a concreteira, o laboratório de controle de qualidade e os setores internos administrativos da própria construtora.

Figura 30 – Diagrama BPMN (AS-IS) atualizado do processo do pagamento da nota fiscal.



Fonte: Adaptado de Piccoli *et al.*, (2023).

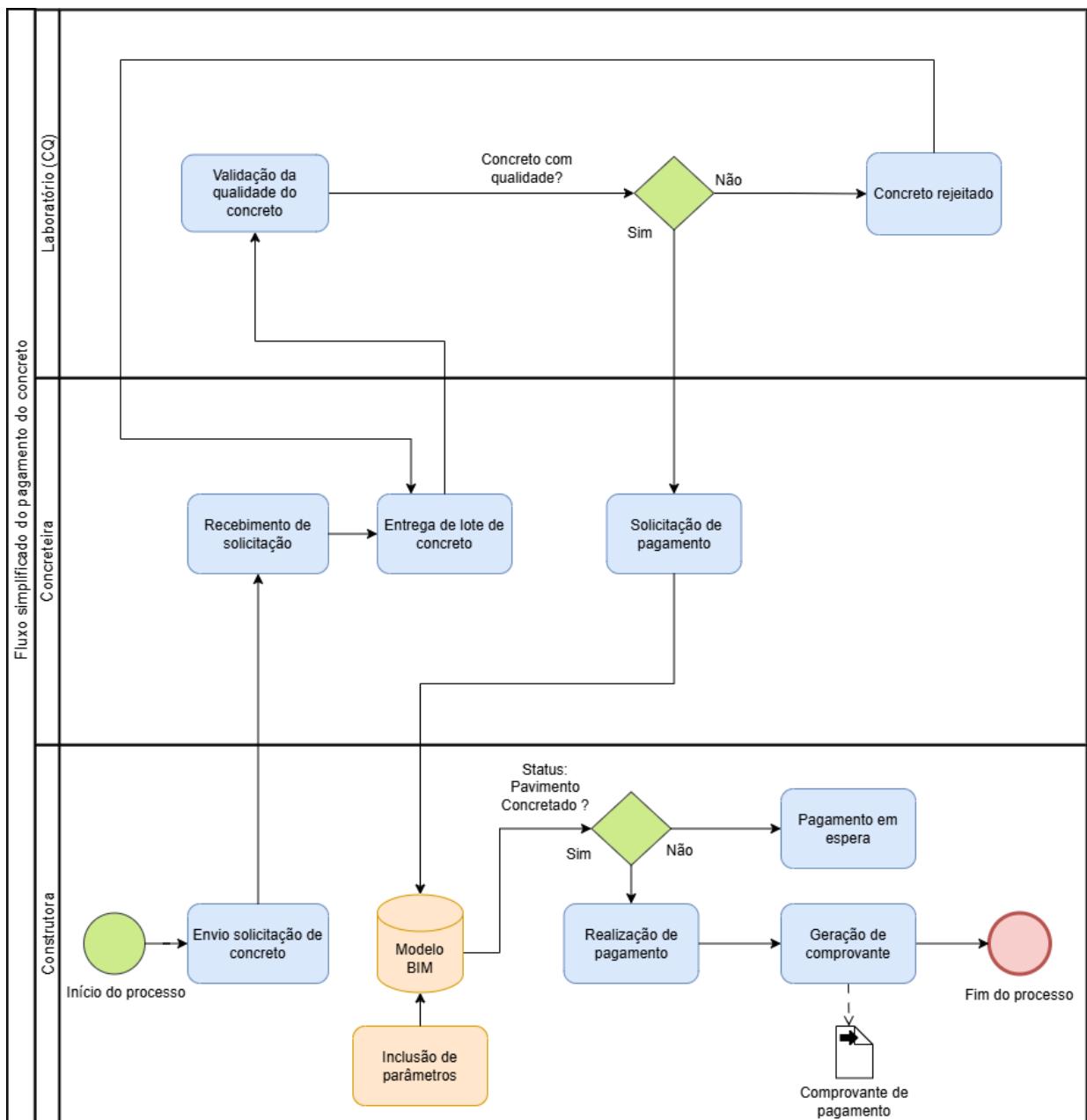
Este processo acontece da seguinte forma:

- A concreteira recebe o pedido de compra da construtora, emite a nota fiscal e encaminha para a construtora.
- O laboratório também recebe a nota fiscal, sendo este processo o mesmo mencionado no mapa de processo do fluxo de pagamento do concreto que se encontra no Apêndice C.
- Os setores internos da construtora recebem o pedido de compra e a nota fiscal;
- É realizada a avaliação da nota fiscal. Caso a nota fiscal esteja com dados incorretos ela é enviada para a concreteira para correção.
- Após a aprovação, a nota fiscal é lançada nos sistemas internos da construtora;
- A nota fiscal é avaliada pela produção, caso não seja aprovada, ela é revisada;
- Após a validação da nota fiscal, é realizada uma triagem por meio de sistemas internos.
- Um fiscal lança os impostos referentes a nota fiscal.
- A nota é programada para pagamento.
- O pagamento é realizado para a concreteira.

5.2.5 Fluxo de pagamento do concreto (*TO-BE*) simplificado

Para o desenvolvimento do protótipo, foi necessário simplificar o fluxo de pagamento do sistema de paredes de concreto moldadas *in loco* da Empresa X para corresponder com o fluxo de pagamento que o contrato teve como referência. O Diagrama BPMN do estado futuro (*TO-BE*) simplificado é ilustrado na Figura 31.

Figura 31 – Diagrama BPMN (*TO-BE*) simplificado do fluxo de pagamento do concreto.



Fonte: O autor (2025).

Este fluxo acontece da seguinte forma:

- A construtora realiza o envio da solicitação de concreto.
- A concreteira recebe a solicitação e realiza a entrega do lote de concreto.
- O laboratório de controle de qualidade (CQ) verifica se o concreto atende aos requisitos de qualidade.

Decisão 1:

- Se não atende, o concreto é rejeitado. Se atende, o fluxo segue para a próxima etapa.
- A concreteira realiza a solicitação de pagamento após a validação da qualidade.
- O modelo BIM é atualizado com o status do pavimento concretado.

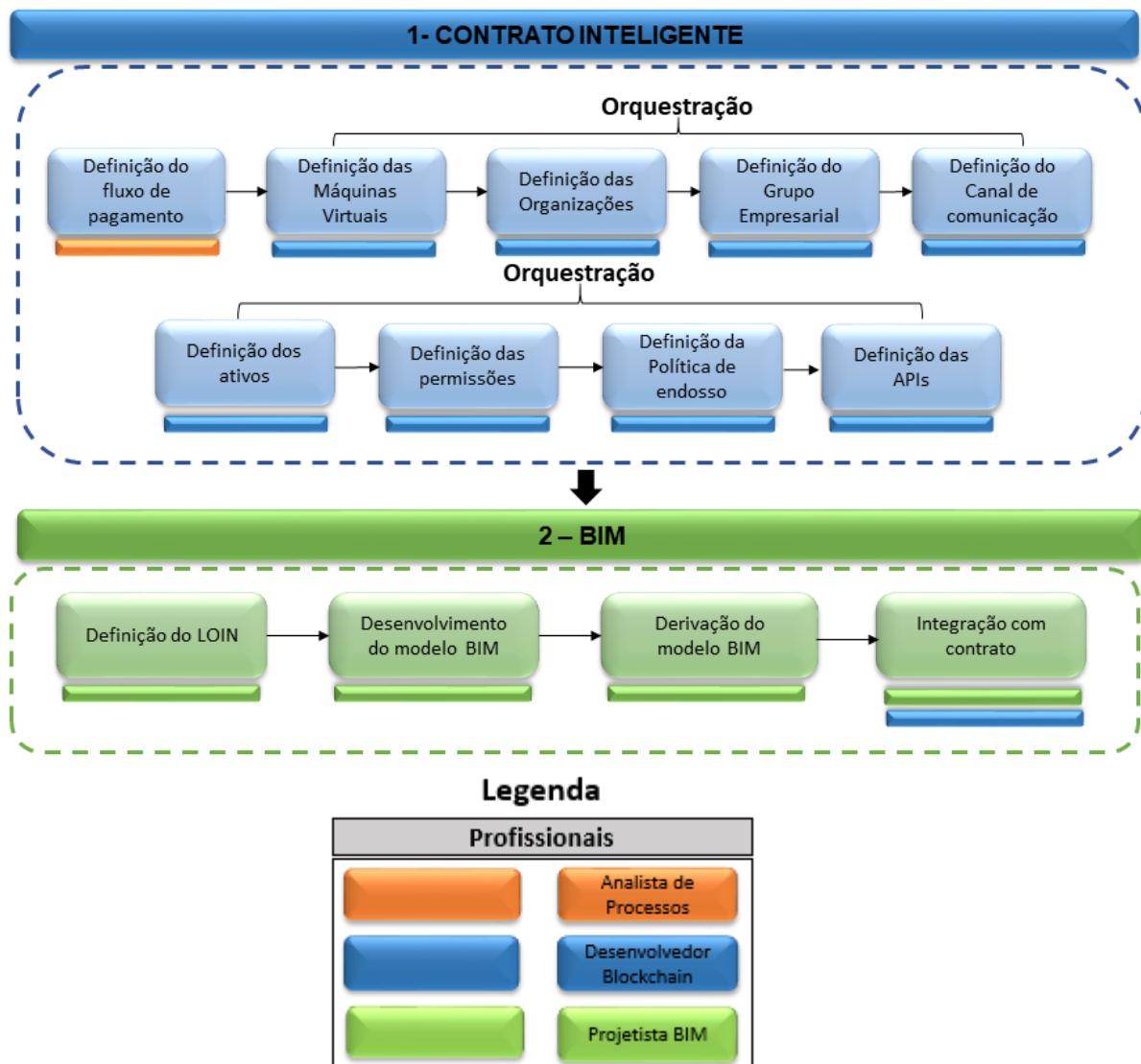
Decisão 2:

- Se não concretado, o pagamento fica em espera. Se concretado, o processo segue para pagamento.
- A construtora efetua o pagamento e o sistema gera o comprovante de pagamento.

5.2.6. Método para desenvolvimento do BIMLedger

O método apresenta potencial de aplicação em diferentes contextos de contratos inteligentes, possibilitando a realização de pagamentos referentes a distintos insumos ou serviços. A sequência de atividades delineada demonstra caráter generalizável, podendo ser adaptada a variados cenários. No caso deste trabalho, o método de estudo se configura como contrato para pagamento da concretagem do sistema de paredes moldadas *in loco*. A Figura 32 ilustra a estrutura do método.

Figura 32 – Estrutura geral do método para desenvolvimento do BIMLedger



Fonte: O autor (2025).

O método foi estruturado em duas camadas complementares. A primeira, denominada camada do contrato inteligente, compreende as atividades relacionadas à orquestração do contrato. A segunda, denominada camada BIM, envolve o desenvolvimento e a derivação do modelo BIM das estruturas de concreto da edificação, além da integração desse modelo com o contrato inteligente.

A legenda ilustra os principais profissionais necessários para a execução das atividades nas respectivas camadas do método proposto para o BIMLedger. O Analista de Processos é responsável por mapear e modelar os fluxos de negócio, assegurando a correta representação das etapas de pagamento e controle dentro do contrato inteligente.

O Desenvolvedor Blockchain atua na implementação da lógica do contrato, garantindo a orquestração das transações e a integração segura com a plataforma blockchain. Já o Projetista BIM é responsável pelo desenvolvimento e derivação do modelo BIM das estruturas de concreto, além de colaborar em conjunto com o Desenvolvedor Blockchain na integração entre o modelo digital da edificação e o contrato inteligente. Dessa forma, a interação entre esses profissionais viabiliza o funcionamento integrado do BIMLedger, unindo as camadas de processos, tecnologia blockchain e modelagem BIM.

5.2.7. Camada Contrato Inteligente

Esta camada é composta por dez etapas. A primeira corresponde a uma atividade preparatória, realizada antes do desenvolvimento do contrato. As demais integram a orquestração do contrato, contemplando todas as definições necessárias ao seu funcionamento. Para a execução do contrato em escala comercial, faz-se necessária a participação de profissionais especializados responsáveis pelas atividades em cada camada do método.

Ademais, a definição do fluxo de pagamento e a orquestração do contrato requerem a atuação de desenvolvedores com conhecimento em blockchain e expertise no uso da plataforma GoFabric.

A seguir, cada uma dessas etapas é explicada tecnicamente, com base nas informações estruturadas ao longo deste estudo:

- **Definição do fluxo de pagamento do contrato:** Esta etapa inicial consistiu na análise detalhada do processo de pagamento do concreto na Empresa X, incluindo a identificação dos atores envolvidos, etapas operacionais, documentos emitidos, critérios de medição e condicionantes técnicas como a avaliação do concreto. Esse mapeamento permitiu compreender os gatilhos de liberação de pagamento e os pontos críticos de controle, sendo fundamental para o posterior desenvolvimento do Diagrama BPMN (*TO-BE*) simplificado do fluxo de pagamento do concreto.
- **Orquestração do contrato inteligente:** Com os processos definidos, foi realizada a orquestração do BIMLedger, abrangendo todas as etapas necessárias para a construção do contrato na Plataforma GoFabric. O sistema foi programado para operar de forma segura, modular e escalável, permitindo a automação dos pagamentos conforme a evolução da obra. O procedimento de desenvolvimento das etapas de orquestração encontra-se descrito no Apêndice F, enquanto as propriedades blockchain das principais etapas são detalhadas a seguir:

Organizações

A Figura 33 ilustra a visão geral da GoFabric. Nesta tela, pode-se observar que foram criadas três organizações distintas, laboratório, concreteira e construtora. Cada uma representando uma entidade principal dentro do BIMLedger.

Figura 33 – Organizações do BIMLedger criadas na GoFabric

The screenshot shows a user interface titled "Minhas Organizações" (My Organizations). It displays three distinct organizations as cards:

- laboratório**: Represented by ".com" and a green circular icon labeled "peer0.laboratorio.com". Below it are sections for "Pares" and "Ordenadores", both currently empty ("Sem nós").
- concreteira**: Represented by ".com" and a green circular icon labeled "peer0.concreteira.com". Below it are sections for "Pares" and "Ordenadores", both currently empty ("Sem nós").
- construtora**: Represented by ".com" and a green circular icon labeled "peer0.construtora.com". Below it are sections for "Pares" and "Ordenadores", both currently empty ("Sem nós").

Fonte: O autor (2025).

Cada organização possui um nó do tipo *peer* associado, responsável por manter o *ledger*, validar e propagar transações dentro da rede. Os *peers* criados são: peer0.laboratorio.com, peer0.concreteira.com e peer0.construtora.com. Além disso, apenas a organização construtora conta com um nó *orderer* (orderer0.construtora.com), cuja função é ordenar as transações e garantir a consistência da blockchain.

A Figura 33 mostra uma visão geral da estrutura organizacional e dos *peers* participantes da rede, evidenciando a criação de três entidades independentes com suas respectivas infraestruturas de segurança e operação. Tal configuração segue os princípios arquiteturais da Hyperledger Fabric, que favorecem a colaboração entre entidades que não compartilham confiança mútua, mas que necessitam interagir sob os termos de um contrato inteligente comum.

Grupo de trabalho

A Figura 34 ilustra a estrutura de um grupo empresarial denominado UFBA, que representa uma instância de consórcio empresarial ou rede de colaboração dentro da infraestrutura Hyperledger Fabric.

Figura 34 – Grupo empresarial criado na GoFabric

The screenshot shows a user interface for managing business groups in a Hyperledger Fabric network. The main title is "Grupos Empresariais". Below it, a sub-section header reads "Todos os grupos empresariais dos quais suas organizações são membros." A list of groups is shown, starting with "UFBA", which has a green circular icon. To the right of "UFBA" is a three-dot menu icon. Below "UFBA", under the heading "Canais", there is a blue button labeled "canal-bim". Under the heading "Organizações", there are three entries: "construtora" (green circle), "concreteira" (light blue circle), and "laboratório" (dark blue circle). The background of the interface is white, and the overall design is clean and modern.

Fonte: O autor (2025).

Esse grupo é composto pelas organizações principais que compartilham um canal de comunicação comum denominado canal-bim. No contexto da Hyperledger Fabric, esse canal funciona como uma sub-rede privada, permitindo que apenas as organizações participantes tenham acesso às transações, garantindo privacidade e controle sobre os dados compartilhados. A utilização de grupos empresariais e canais possibilita a segregação lógica das informações, assegurando que apenas os membros autorizados possam interagir com os contratos inteligentes e com o *ledger* correspondente, promovendo segurança, governança e interoperabilidade entre os diferentes atores do sistema.

Canal de comunicação

A Figura 35 ilustra o canal de comunicação denominado “Canal-BIM”. Este canal representa um ambiente privado de comunicação e registro entre as organizações autorizadas, assegurando que apenas os membros participantes tenham acesso às informações e transações realizadas.

Figura 35 – Canal-BIM associado ao grupo empresarial



Fonte: O autor (2025).

No caso do BIMLedger, esse canal é utilizado para conectar a construtora, concreteira e laboratório, permitindo a execução de contratos inteligentes de forma segura e auditável.

As propriedades da blockchain, como imutabilidade, consenso, rastreabilidade e transparência restrita aos participantes, garantem que cada etapa, desde a solicitação até a aprovação da qualidade e o pagamento da concretagem, seja registrada de forma confiável e inviolável. O uso do canal torna-se especialmente relevante por possibilitar a automatização do fluxo de pagamentos a partir da validação dos serviços, eliminando disputas e aumentando a confiança entre as partes.

Autoridades Certificadoras

As Figuras 36, 37 e 38 apresentam as seções de Identidades das Autoridades Certificadoras das respectivas organizações.

Figura 36 – Autoridade Certificadora da organização construtora

Identidades da Autoridade Certificadora			
Identidades da Autoridade Certificadora da Organização.			
IDENTIDADE	CHAVE DE AUTORIDADE	TERMO	REVOGADO EM
ca_construtora		-	-
construtoraadmin	8vjBLpJj3+QubWtlnljNLJ7UNYU=	-	-
ordenador0	8vjBLpJj3+QubWtlnljNLJ7UNYU=	-	-
peer0	8vjBLpJj3+QubWtlnljNLJ7UNYU=	-	-
raiz		-	-
ca_construtora		-	-
construtoraadmin	8vjBLpJj3+QubWtlnljNLJ7UNYU=	-	-
ordenador0	8vjBLpJj3+QubWtlnljNLJ7UNYU=	-	-
peer0	8vjBLpJj3+QubWtlnljNLJ7UNYU=	-	-
raiz		-	-
10 Certificados			

Fonte: O autor (2025).

Figura 37 – Autoridade Certificadora da organização concreteira

Identidades da Autoridade Certificadora			
Identidades da Autoridade Certificadora da Organização.			
IDENTIDADE	CHAVE DE AUTORIDADE	TERMO	REVOGADO EM
ca_concreta		-	-
concretoiradmin	pPN48clpdFnVu1YS8OnQutHpcT0=	-	-
peer0	pPN48clpdFnVu1YS8OnQutHpcT0=	-	-
raiz		-	-
ca_concreta		-	-
concretoiradmin	pPN48clpdFnVu1YS8OnQutHpcT0=	-	-
peer0	pPN48clpdFnVu1YS8OnQutHpcT0=	-	-
raiz		-	-
8Certificados			

Fonte: O autor (2025).

Figura 38 – Autoridade Certificadora da organização laboratório

Identidades da Autoridade Certificadora			
Identidades da Autoridade Certificadora da Organização.			
IDENTIDADE	CHAVE DE AUTORIDADE	TERMO	REVOGADO EM
ca_laboratório		-	-
laboratórioadmin	XMDhqFH36tW0M+N059L04XJcaqA=	-	-
peer0	XMDhqFH36tW0M+N059L04XJcaqA=	-	-
raiz		-	-
ca_laboratório		-	-
laboratórioadmin	XMDhqFH36tW0M+N059L04XJcaqA=	-	-
peer0	XMDhqFH36tW0M+N059L04XJcaqA=	-	-
raiz		-	-
8Certificados			

Fonte: O autor (2025).

A construtora é responsável pela emissão e gerenciamento das identidades digitais dos participantes da rede blockchain Hyperledger Fabric. Cada identidade, como “peer0”, “orderer0” e “construtoraadmin”, é associada a uma chave criptográfica única gerada pela AC da organização “ca_construtora”, permitindo autenticação, assinatura digital e controle de acesso dentro da rede. Todas essas identidades compartilham a mesma chave de autoridade, garantindo que estão subordinadas à mesma raiz de confiança.

Esse modelo de identidade baseada em certificados é essencial para manter a segurança, a confidencialidade e a integridade das transações na blockchain. De forma semelhante à organização construtora, as entidades concreteira e laboratório também possuem suas respectivas Autoridades Certificadoras, garantindo que cada organização tenha autonomia para gerenciar suas próprias identidades, seguindo o princípio de descentralização e confiança distribuída específica das redes Hyperledger Fabric.

Permissões

As permissões definidas foram estruturadas para refletir com precisão as responsabilidades de cada organização no processo de concretagem. Esse modelo se integra diretamente à política de endosso do GoFabric. Assim, a configuração das permissões não apenas organiza o fluxo de trabalho, mas também garante segurança, rastreabilidade e confiança distribuída. A seguir é detalhada a estrutura de permissões de cada organização:

Construtora

Permissões: Criar/Alterar Ativos

- Solicitação de Serviço: apenas a Construtora pode iniciar o processo de concretagem criando a solicitação.
- ComprovantePagamento: apenas a Construtora registra o pagamento realizado.
- *Dados da empresa*: a Construtora mantém e altera apenas seu próprio cadastro.

Visualizar Ativos: Pode visualizar o tipo de produto criado pela Concreteira, o resultado de validação do Laboratório, a solicitação de pagamento e os dados das demais empresas.

Concreteira

Permissões: Criar/Alterar Ativos

- **Concreto:** somente a Concreteira pode criar e alterar o tipo de produto fornecido.
- **SolicitarPagamento:** após a conclusão do serviço, apenas a Concreteira tem permissão para registrar a solicitação de pagamento.
- Dados da empresa: apenas a própria Concreteira pode alterar seus dados cadastrais.
- **Visualizar Ativos:** Pode visualizar solicitações feitas pela Construtora, validações de qualidade do Laboratório e comprovantes de pagamento emitidos pela Construtora.

Laboratório

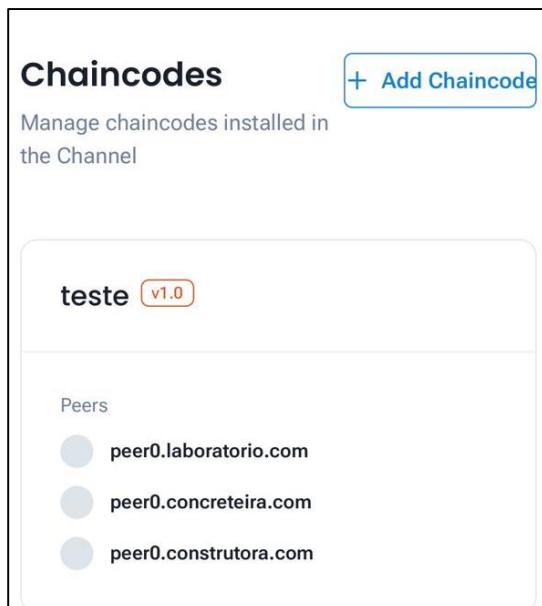
Permissões: Criar/Alterar Ativos

- **ValidarQualidade:** somente o Laboratório pode criar esse ativo, que comprova a conformidade do concreto fornecido.
- **Dados da empresa:** somente ele altera seus próprios dados cadastrais.
- **Visualizar Ativos:** Pode visualizar as solicitações da Construtora, os dados da Concreteira e os comprovantes de pagamento, assegurando transparência no processo.

Chaincode

Na plataforma GoFabric, a criação de um *chaincode* ocorre após a definição das permissões e papéis das organizações participantes no canal, garantindo que apenas os agentes autorizados possam interagir com as regras de negócio implementadas. A Figura 39 ilustra o *chaincode* definido.

Figura 39 – Visualização do chaincode



Fonte: O autor (2025).

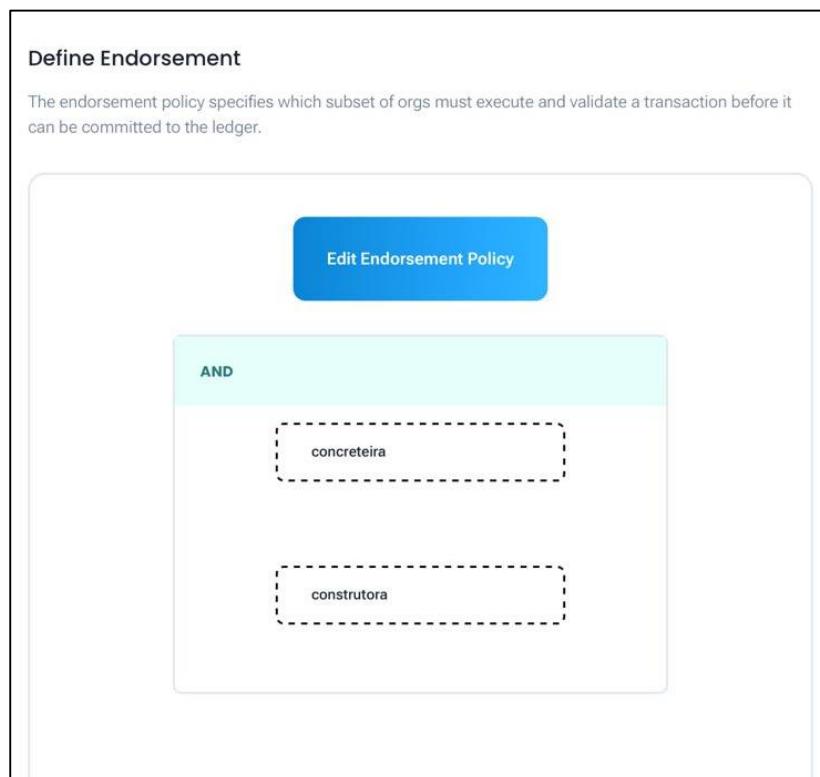
No caso apresentado, foi desenvolvido o *chaincode* denominado “teste”, cujo objetivo é operacionalizar as etapas contratuais previstas no protótipo do BIMLedger. Esse contrato inteligente contempla funções como solicitação de entrega, registro de entrega, avaliação da qualidade e solicitação de pagamento.

Cada organização envolvida executa o *chaincode* por meio de seus peers, de modo que todas as transações passam por validação distribuída e são registradas de forma imutável e auditável. Essa arquitetura tem potencial para garantir que o fluxo de pagamentos e verificações de qualidade na obra seja automatizado, confiável e isento de manipulação, trazendo maior segurança e eficiência para o processo de concretagem das paredes de concreto.

Política de endosso

A definição de permissões para criação, alteração e visualização de ativos no contrato inteligente foi complementada pela adoção de uma política de endosso Fabric como ilustrado na Figura 40.

Figura 40 – Estrutura da política de endosso



Fonte: O autor (2025).

Essa política estabelece que determinadas funções críticas sejam somente validadas quando duas organizações distintas endossam conjuntamente a transação, obedecendo à lógica do operador [AND].

A lógica do operador AND significa que todas as organizações listadas na regra precisam endossar a transação para que ela seja considerada válida e registrada no ledger. Isso reforça a transparência, a confiança mútua e a segurança do processo.

Por exemplo, a função SolicitarPagamento demanda o endosso da Concreteira e da Construtora. Esse mecanismo assegura que a solicitação de pagamento seja submetida pela contratada, mas somente considerada válida quando confirmada pelo contratante, prevenindo cobranças unilaterais.

Na função EfetuarPagamento, a Construtora registra o pagamento, o qual apenas é reconhecido na rede quando a Concreteira endossa o recebimento, garantindo a integridade da operação financeira.

APIs e Golnitus

As Figuras 41,42 e 43 exibem as seções das APIs das organizações na plataforma GoFabric, revelando dois componentes fundamentais para a interação com a rede *Hyperledger Fabric*: a API de código de cadeia (*Chaincode API*) e o Golnitus.

Figura 41 – Seção de APIs e Golnitus da construtora



Fonte: O autor (2025).

Figura 42 – Seção de APIs e Golnitus da concreteira

The screenshot displays two sections of a user interface:

APIs de código de cadeia
A API Chaincode na organização.

IP: 54.233.78.223 :80
Host: ccapi0.concreteira.c...
Canal: canal-bim
Código de corrente: teste

Golnitus
O Golnitus na Organização.

IP: 54.233.78.223 :8080
Host: goinitus0.concreteira.com
API: 54.233.78.223 : 8080
Rede: concreteira

Fonte: O autor (2025).

Figura 43 – Seção de APIs e Golnitus do laboratório

The screenshot displays two sections of a user interface:

APIs de código de cadeia
A API Chaincode na organização.

IP: 18.116.118.100 :80
Host: ccapi0.laboratorio.c...
Canal: canal-bim
Código de corrente: teste

Golnitus
O Golnitus na Organização.

IP: 18.116.118.100 :8080
Host: goinitus0.laboratorio.com
API: 18.116.118.100 : 8080
Rede: laboratório

Fonte: O autor (2025).

A *Chaincode* API permite a interação direta com os contratos inteligentes implantados na rede. Neste caso, o *chaincode* denominado teste está instalado e associado ao canal “canal-bim”, permitindo que aplicações externas executem funções do contrato inteligente, como envio de transações e consultas ao *ledger*, por meio de chamadas HTTP. Essa API é essencial para expor funcionalidades da blockchain de forma segura e programável, viabilizando a integração com sistemas externos (como sistemas de gestão ou aplicações web).

Já o Golnitus, como o (goinitus0.construtora.com), é uma ferramenta que atua como um *middleware* ou *gateway* de comunicação RESTful, facilitando a interação entre sistemas clientes e a infraestrutura da Hyperledger Fabric. Ele fornece uma interface de acesso padronizada à rede, abstraindo a complexidade do protocolo interno da Fabric e tornando mais simples o consumo dos serviços blockchain por outras aplicações.

Assim como a organização construtora, as organizações concretaria e laboratório também contam com suas próprias instâncias de API de *chaincode* e Golnitus, cada uma conectada aos seus respectivos *peers* e canais. Isso garante que todas as organizações da rede possam executar operações com os contratos inteligentes de forma autônoma, segura e com base nas permissões definidas pela infraestrutura da Hyperledger Fabric. Essa arquitetura distribuída e modular é um dos pilares que assegura a descentralização e a confiabilidade nas interações da rede blockchain.

Por fim, o contrato foi implantado em ambiente de nuvem, utilizando a infraestrutura da *Amazon Web Service*. Essa hospedagem garante alta disponibilidade, escalabilidade e segurança dos serviços, permitindo que a estrutura do contrato seja acessada de forma remota, com integração em tempo real ao modelo BIM e à interface do usuário.

5.2.8. Camada BIM

Nesta etapa, faz-se necessária a participação de um engenheiro ou arquiteto projetista BIM, cuja atribuição consiste em modelar a estrutura da edificação por meio do Revit. Em continuidade ao método, a segunda etapa é composta pelos seguintes passos:

- **Definição do LOIN do modelo BIM:** O LOIN foi utilizado para determinar o grau de detalhe, precisão e informações necessárias no modelo. Essa definição é crucial para garantir que o modelo atenda aos requisitos dos processos de rastreamento e integração com a blockchain.
- **Desenvolvimento do modelo BIM:** Com base no LOIN definido, o modelo BIM foi desenvolvido por meio de ferramentas de modelagem digital. Nesta fase, o modelo reúne elementos geométricos e informacionais que representam digitalmente o objeto físico. Foram atribuídos parâmetros de identidade únicos e específicos a cada elemento, possibilitando sua vinculação posterior aos registros na blockchain e garantindo a rastreabilidade dos componentes. Todos os pavimentos da edificação são modelados. Após cada etapa de concretagem, que pode corresponder à metade ou a um pavimento completo, o status de “concretado” é registrado no modelo e vinculado ao pagamento previsto no contrato inteligente.
- **Derivação do modelo BIM:** O modelo foi carregado na Autodesk Platform Services para permitir sua conversão e manipulação via API. Esta etapa viabiliza a extração do modelo derivado com os dados integrados para aplicação web do BIMLedger. O modelo derivado foi hospedado em uma plataforma web, permitindo visualização interativa, acesso remoto e integração com os dados registrados no BIMLedger de forma segura.

Além disso, foram desenvolvidas interfaces gráficas de usuário com o objetivo de possibilitar a visualização do modelo BIM, o acompanhamento das informações rastreadas e a interação com os dados registrados na blockchain. Para a construção do *front-end*, faz-se necessária a atuação de desenvolvedores de software. O procedimento de desenvolvimento do *front-end* encontra-se detalhado no Apêndice H.

5.2.9. Funcionamento do BIMLedger

O vídeo demonstrativo do funcionamento do BIMLedger pode ser visualizado a partir da leitura do QR CODE disponível na Figura 44. Como também pode ser visto através do link: <https://youtu.be/p7B1N1TZ4nk>.

Figura 44 – QR CODE de acesso ao funcionamento do BIMLedger



Fonte: O autor (2025).

5.2.10 Estudo comparativo

O Quadro 15 mostra um comparativo entre o BIMLedger e três estudos selecionados abordados no capítulo 3, com o objetivo de destacar aspectos técnicos e tecnológicos adotados em cada proposta. Dentre os critérios analisados estão: o tipo de rede blockchain utilizada, o modelo BIM aplicado, o nível de detalhamento do modelo, a forma de automação dos contratos inteligentes, a arquitetura do sistema, o nível de maturidade tecnológica, entre outros.

Quadro 15 – Comparativo entre o BIMLedger e outros contratos inteligentes

Autores	Elghaish, Abrishami e Hosseini (2020)	Wu <i>et al.</i> , (2022)	Brandín e Abrishami (2024)	Martins (2025) (este estudo)
Objetivo	Pagar construção de conjunto residencial	Rastrear módulos pré-fabricados	Rastrear e pagar módulos pré-fabricados	Pagar concreto
Modelagem de dados	Não informado	Não informado	Não informado	Sim
Arquitetura do sistema	Camada BIM e Hyperledger	IaaS, BaaS e SaaS	IaaS, BaaS e SaaS	Blockchain, Modelagem BIM e Interface web
Tipo de Blockchain	Hyperledger Fabric	Hyperledger Fabric	Hyperledger Fabric	Hyperledger Fabric
Integração BIM Blockchain	Via API IBM	Via aplicativo personalizado	Via aplicativo personalizado	Via <i>front-end</i>
Nível de detalhamento BIM	Não informado	Não informado	Não informado	LOIN
Modelo BIM	3D,4D e 5D	3D,4D e 5D	3D,4D e 5D	3D e 4D
Automação do contrato	Semiautomático	Automático	Automático	Semiautomático
Natureza do estudo	Prova de conceito	Prova de conceito	Prova de conceito	Prova de conceito
Nível TRL	4	4	4	4
Custos Estimados	Não informado	Não informado	Não informado	R\$ 77.232,00
Tecnologias integradas	BIM e blockchain	BIM, IoT e blockchain	BIM, IoT e blockchain	BIM e blockchain

Fonte: O autor (2025).

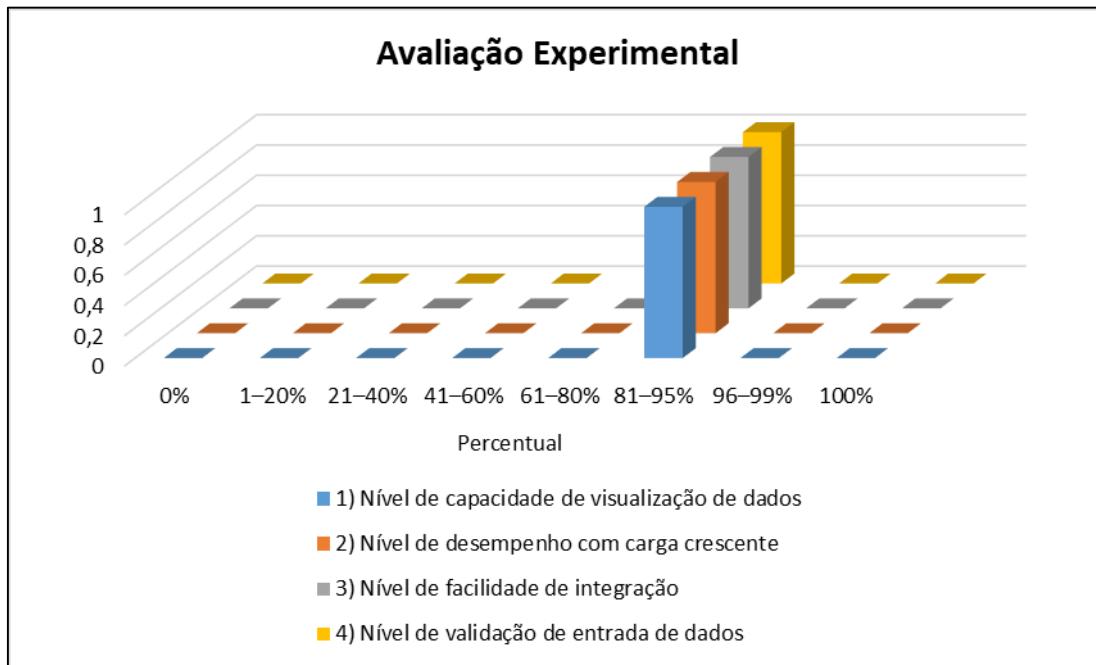
Observa-se que todos os estudos utilizam a rede Hyperledger Fabric como base para a implementação da tecnologia blockchain, o que reforça sua adequação a projetos voltados à construção civil. Em relação ao modelo BIM, há predominância do uso das representações 3D, 4D e 5D, evidenciando a busca por maior profundidade na modelagem das informações da construção.

No tocante à automação dos contratos, nota-se que os estudos mais recentes tendem à automação total, enquanto o BIMLedger, assim como a proposta de Elghaish *et al.* (2020) ainda se encontram em estágio semiautomático. Outro destaque relevante é o nível TRL no qual o BIMLedger está classificado no nível 4, ligeiramente inferior ao nível 5 alcançado pelos demais estudos, indicando que ainda há margem para avanços em termos de validação tecnológica e escalabilidade.

5.3 RESULTADOS DA ETAPA DE AVALIAÇÃO

Essa seção apresenta os resultados da etapa de avaliação experimental do BIMLedger, considerando os constructo e variáveis definidos. Como ilustrado no gráfico na Figura 45 observa-se que o protótipo obteve desempenho na faixa de 81% a 95% nas quatro variáveis analisadas, alinhadas ao modelo de qualidade da norma ISO/IEC 25010:2023.

Figura 45 – Resultados da avaliação experimental do BIMLedger



Fonte: O autor (2025).

A seguir, é apresentada uma análise técnica de cada constructo e variável conforme a ISO/IEC 25010:2023.

5.3.1 Constructo Funcionalidade

A variável avaliada, nível de validação de entrada de dados, obteve desempenho na faixa de 81% a 95% conforme a Tabela 1 do Capítulo 4 na seção 4.6.1, indicando um elevado grau de robustez e maturidade da aplicação no tratamento de entradas fornecidas pelos usuários.

A avaliação qualitativa da solução como “muito robusta” mostra que o BIMLedger incorpora mecanismos eficazes de verificação e controle de dados, assegurando que as informações inseridas estejam de acordo com os requisitos funcionais definidos pelo sistema. Esse comportamento é essencial para prevenir inconsistências, duplicações ou falhas lógicas que possam comprometer a integridade do modelo de dados BIM.

Além disso, destaca-se o fato de que o sistema trata respostas incompletas com mensagens amigáveis, o que reforça duas dimensões centrais da qualidade funcional: a usabilidade e a confiabilidade. Portanto, a avaliação na faixa de 81–95% conforme a Tabela 2 do Capítulo 4 na seção 4.6.1, reflete que o BIMLedger apresenta boa conformidade funcional, com validação eficaz de dados, resposta adequada a entradas incompletas e foco na integridade do sistema, atendendo aos requisitos da ISO/IEC 25010:2023 com elevado padrão de qualidade.

5.3.2 Constructo Escalabilidade

A variável avaliada, nível de desempenho de carga crescente obteve desempenho na faixa de 81 a 95%, refletindo um desempenho altamente satisfatório mesmo sob condições de carga intensificada. A classificação como “muito eficiente” conforme mostrado na Tabela 2 indica que o contrato é sustentado por algoritmos otimizados, capazes de executar operações de forma rápida e estável.

Essa otimização se traduz em baixo consumo de recursos computacionais, o que é especialmente relevante em ambientes com múltiplos usuários ou grandes volumes de dados típicos de sistemas BIM. Além disso, a alta capacidade de resposta garante que as operações sejam realizadas com mínima latência, mesmo com a crescente demanda de processos concorrentes ou integrações simultâneas.

Essas características refletem diretamente a escalabilidade da solução, isto é, sua habilidade de manter desempenho consistente à medida que a carga aumenta, seja por acréscimo de usuários, dados ou integrações.

A eficiência computacional observada sugere que o BIMLedger foi projetado com uma arquitetura modular e escalável, capaz de distribuir cargas de maneira inteligente e preservar a experiência do usuário final em diferentes contextos operacionais. Assim, o posicionamento da variável na faixa de 81–95% indica que o BIMLedger oferece um desempenho robusto, estável e eficiente, sendo tecnicamente apto a operar em cenários de grande escala com elevada confiabilidade.

5.3.3 Constructo Interoperabilidade

A variável avaliada, nível de facilidade de integração do BIMLedger, foi classificada como altamente compatível. Essa compatibilidade elevada impacta diretamente a qualidade da visualização, uma vez que a integração fluida de informações provenientes de múltiplos sistemas permite a apresentação consolidada e contextualizada dos dados em interfaces gráficas. A habilidade do sistema em adaptar-se a diferentes padrões e modelos de informação garante que os usuários tenham acesso a representações visuais completas, coerentes e inteligíveis, mesmo em ambientes tecnicamente heterogêneos.

Além disso, o suporte a *fallback*, isto é, a capacidade do sistema de manter funcionalidades mínimas em caso de falhas de integração. Assegura uma experiência de visualização estável, mesmo diante de instabilidades em sistemas externos. Essa robustez contribui para a confiança do usuário na interpretação visual dos dados e reforça a maturidade do BIMLedger quanto à sua capacidade de comunicar informações complexas de maneira clara e eficiente.

Em síntese, a avaliação na faixa de 81 a 95% conforme a Tabela 3 para esta variável. Reflete um sistema que tem uma boa apresentação visual dos dados, sustentada por uma base tecnológica interoperável, adaptativa e centrada na experiência do usuário.

5.3.4 Constructo Segurança

A variável nível de validação de entrada de dados é um dos componentes centrais para assegurar que o sistema funcione corretamente mesmo diante de tentativas de uso indevido, entradas incompletas ou dados inconsistentes.

A avaliação do BIMLedger na faixa de 81% a 95%, acompanhada da descrição “alta compatibilidade e boa manipulação de exceções”, indica que o sistema foi projetado com robustez e atenção à segurança estrutural. A presença de elevada cobertura funcional sugere que os mecanismos de validação contemplam um amplo conjunto de cenários possíveis de erro, incluindo entradas mal formatadas, ausentes ou fora dos padrões esperados.

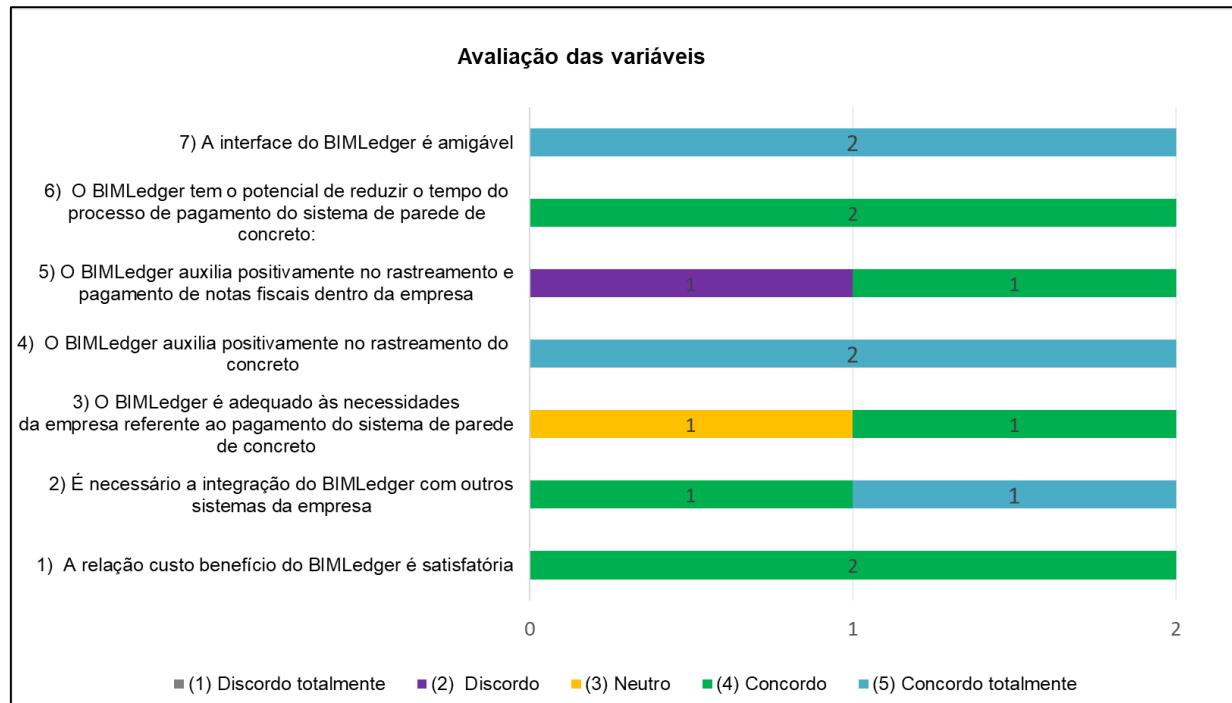
Além disso, a resiliência a entradas inválidas demonstra que o sistema é capaz de isolar e conter falhas sem comprometer o funcionamento geral, característica fundamental para ambientes colaborativos e críticos como o BIM. A habilidade de capturar exceções, tratá-las adequadamente e informar o usuário por meio de mensagens de erro claras e instrutivas fortalece tanto a confiabilidade do sistema quanto a experiência do usuário.

Por fim, embora a validação de dados também se relate à qualidade funcional, sua abordagem sob o ponto de vista da segurança destaca o compromisso do BIMLedger com a integridade do sistema e prevenção de falhas operacionais ou vulnerabilidades, inclusive frente a ações não intencionais por parte dos usuários.

5.4 AVALIAÇÃO DA PERCEPÇÃO DOS ENTREVISTADOS

Essa seção apresenta a avaliação de requisitos do cliente realizada pelos entrevistados considerando os constructos e variáveis definidas. A Figura 46 mostra os resultados da avaliação referentes as sete variáveis principais dos dois constructos analisados.

Figura 46 – Resultado da avaliação das entrevistas



Fonte: O autor (2025).

Com base nos dados coletados por meio das entrevistas semiestruturadas foi possível avaliar a percepção dos usuários em relação ao desempenho do sistema BIMLedger frente a sete variáveis diretamente ligadas aos seus requisitos de uso. A escala de avaliação utilizada segue o modelo de Likert, variando de “Discordo totalmente” (1) a “Concordo totalmente” (5), o que possibilita captar nuances importantes da experiência dos participantes.

A primeira variável avaliada refere-se à satisfação com a relação custo-benefício do BIMLedger. Os participantes expressaram uma percepção positiva, com duas respostas na categoria “Concordo”. Isso sugere que o sistema é visto como um investimento justificado pelos benefícios que entrega, evidenciando coerência entre o valor percebido e a utilidade prática da solução.

Em relação à necessidade de integração do BIMLedger com outros sistemas da empresa, foi registrada uma resposta neutra. Essa avaliação pode indicar incertezas quanto à relevância ou efetividade dessa integração no contexto específico do participante, ou ainda sinalizar que o sistema apresenta limitações na interoperabilidade com plataformas já utilizadas pelas organizações.

Esta percepção sugere a necessidade de aprimoramento na compatibilidade sistêmica ou na comunicação sobre o potencial de integração oferecido pela solução. Um ponto de atenção relevante emerge na avaliação da adequação do sistema às necessidades da empresa no processo de pagamento do sistema de parede de concreto, onde foi registrada uma resposta “Discordo totalmente”. Este dado pode evidenciar uma lacuna entre a funcionalidade disponibilizada e os fluxos operacionais específicos da organização em questão. Tal resultado aponta para a necessidade de ajustes ou customizações funcionais, de modo a alinhar o BIMLedger às particularidades dos processos empresariais.

No entanto, o sistema foi avaliado de maneira altamente positiva no que se refere ao rastreamento do concreto, recebendo uma resposta na categoria “Concordo totalmente”. Essa avaliação demonstra que, ao menos para essa funcionalidade específica, o BIMLedger atende plenamente às expectativas dos usuários, proporcionando controle e visibilidade adequados sobre os dados gerenciados.

Por outro lado, a variável que trata da assistência no rastreamento e pagamento de notas fiscais obteve uma resposta “Discordo”. Essa avaliação sugere limitações na automação, integração ou usabilidade das funções relacionadas à gestão fiscal, indicando a ausência de sincronização com sistemas contábeis ou lacunas na forma

como o sistema comunica e trata documentos fiscais. No que diz respeito à eficiência operacional, a avaliação sobre o potencial do BIMLedger de reduzir o tempo no processo de pagamento do sistema de parede de concreto foi positiva. Duas respostas na categoria “Concordo” mostram que os usuários reconhecem o potencial da ferramenta em agilizar processos administrativos.

O Quadro 16 resume e descreve os principais comentários e contribuições dos especialistas durante a discussão das entrevistas. Os participantes destacaram pontos positivos e oportunidades de melhoria da versão atual do protótipo.

Quadro 16 – Pontos positivos e oportunidades de melhoria da avaliação dos participantes

Participante	Ponto positivo
E1	O participante fez uma pontuação relevante ao identificar a preocupação com a qualidade do concreto, especialmente em relação ao slump teste. Reconheceu que o sistema BIMLedger apresenta um mecanismo de controle de qualidade ao bloquear automaticamente o processo quando o valor do <i>slump</i> teste está fora da faixa aceitável. Além disso, destacou que o sistema possui potencial para reduzir etapas e aumentar a eficiência, promovendo avanços significativos nos fluxos operacionais e contratuais.
Oportunidade de melhoria	
E1	O participante destacou a ausência de diretrizes claras para o tratamento nos casos em que o concreto não atende aos critérios de qualidade. Atualmente, o protótipo não define se o concreto fora do padrão deve ser devolvido ou ajustado, tampouco contempla a possibilidade de correção do traço por meio de adição controlada de água, medida que exige autorização formal do responsável técnico. Também foi mencionada a falta de uma funcionalidade que notifique automaticamente a construtora sobre divergências nos parâmetros de qualidade, como o valor do <i>slump</i> .
Ponto positivo	
E2	O participante reconheceu que o protótipo consegue unir duas funcionalidades essenciais: a facilitação do pagamento e a melhoria na gestão da cadeia produtiva do concreto dentro da obra. Ele destacou que, ao automatizar essas etapas e permitir a visualização dos dados em tempo real por meio de <i>dashboards</i> , o sistema pode oferecer ganhos significativos em rastreabilidade, controle e eficiência operacional, o que representa um diferencial competitivo importante para o setor da construção civil
Oportunidade de melhoria	
E2	O participante levantou a necessidade de pensar nos cenários de exceção e falhas operacionais, como problemas na aplicação do concreto, devoluções e custos adicionais. Para isso, o participante sugeriu que o <i>smart contract</i> seja desenhado de forma a prever essas situações, com cláusulas capazes de absorver falhas eventuais sem comprometer a relação entre concreteira e construtora. A existência de parâmetros e premissas bem definidas desde o início do processo, como critérios para pagamentos parciais ou retenções, poderia, segundo ele, contribuir para maior segurança jurídica e clareza contratual para ambas as partes.

Fonte: O autor (2025).

De modo geral, além das observações sistematizadas na tabela, os participantes mostraram satisfação em ver o BIMLedger em funcionamento, destacando o potencial do protótipo em melhorar significativamente o sistema de pagamento na construção civil. Foi ressaltado que a aplicação da tecnologia blockchain contribui de forma relevante para a modernização e maior transparência na gestão contratual.

No entanto, alguns pontos de atenção foram levantados. Os participantes enfatizaram a importância do sistema contemplar situações reais que possam impedir ou adiar o pagamento, cenários que, muitas vezes, não estão previstos nos fluxos padrão do BIMLedger. Também foi mencionada a necessidade de o sistema permitir adaptações ao perfil e às práticas específicas de cada empresa, possibilitando contratos mais personalizados. Reforçou-se ainda a importância de comunicar com clareza os benefícios e diferenciais do uso de contratos inteligentes em comparação com contratos convencionais, especialmente para fins de convencimento e adoção por parte dos agentes envolvidos.

A variável referente à usabilidade da *interface* foi unanimemente bem avaliada, com duas respostas na categoria “Concordo totalmente”. Esse resultado evidencia que o sistema apresenta uma interface considerada amigável e de fácil interação, fator essencial para a adoção da tecnologia e para a redução da curva de aprendizado por parte dos usuários. A alta avaliação nesse quesito reforça o comprometimento do BIMLedger com princípios de design centrado no usuário.

Em síntese, os dados revelam que o BIMLedger apresenta desempenho satisfatório em aspectos como usabilidade, rastreamento de materiais e percepção de valor agregado, posicionando-se de forma positiva frente aos requisitos esperados pelos usuários. Entretanto, as avaliações menos favoráveis quanto à integração sistêmica, aderência funcional em processos específicos e gestão fiscal indicam a necessidade de aperfeiçoamentos pontuais, seja em termos de desenvolvimento técnico, seja em ações de alinhamento com os fluxos e expectativas de diferentes contextos empresariais.

5.5 ESTIMATIVA DE CUSTO NO DESENVOLVIMENTO DO BIMLEDGER

Esta seção apresenta uma estimativa dos custos envolvidos no desenvolvimento do BIMLedger considerando sua aplicação em escala comercial. Para isso, foram identificados e quantificados os principais serviços envolvidos na sua implementação. Além disso, o levantamento foi realizado com base em uma perspectiva de implantação em escala comercial, visando a operação da plataforma em ambientes corporativos.

As informações utilizadas para a composição dos custos foram obtidas a partir de dados fornecidos pela empresa GoLedger, bem como por meio de consultas aos sites oficiais da Autodesk, Vercel e Amazon AWS. A Tabela 5 apresenta a estrutura detalhada dos serviços considerados e seus respectivos custos estimados.

Tabela 5 – Composição de custos de serviços para desenvolvimento do BIMLedger

Desenvolvimento do back-end (Blockchain)					
Item	Descrição	Unid	Quant	Custo Unit	Custo total
1	Documento de projeto	hh	10	R\$ 280	R\$ 2.800
2	Desenvolvimento e customização de contrato inteligente	hh	120	R\$280	R\$ 33.600
3	Desenvolvimento e customização de API (middleware)	hh	32	R\$ 280	R\$ 8.960
4	Instalação de contrato inteligente e API (validação/produção)	hh	30	R\$ 280	R\$ 8.400
5	GoFabric versão 2.0 até 3 organizações e 9 nodes	vb	1	R\$ 3.450	R\$ 3.450
6	Supporte de redes	vb	1	R\$ 490	R\$ 490
Subtotal (a)					R\$ 57.700
Desenvolvimento do front-end					
Item	Descrição	Unid	Quant	Custo Unit	Custo total
1	Desenvolvimento da interface do usuário e validação dos dados do protótipo	vb	1	R\$ 5.500	R\$ 5.500
Desenvolvimento do modelo BIM					
Item	Descrição	Unid	Quant	Custo Unit	Custo total
1	Licença anual do Autodesk Revit 2025	vb	1	R\$ 11.615	R\$ 11.615
Hospedagem em nuvem					
Item	Descrição	Unid	Quant	Custo Unit	Custo total
1	Hospedagem do back-end da plataforma GoFabric na Amazon AWS	ano	1	R\$ 1.117	R\$ 1.117
2	Hospedagem do front-end Plano pro do Vercel	ano	1	R\$ 1.300	R\$ 1.300
Subtotal (b)					R\$ 2.417
Valor total					R\$ 77.232

Fonte: O autor (2025).

Na planilha de estimativa de custos, são utilizadas três unidades principais: hh, vb e ano. A unidade hh (hora-homem) tem valor unitário de R\$ 280,00, representando o custo estimado por hora de trabalho de um profissional. Já a unidade vb (verba) refere-se a um valor fixo reservado para atividades ou pacotes fechados, sem detalhamento do tempo de execução. A unidade ano representa o custo anual de serviços contratados, sendo utilizada para despesas recorrentes como hospedagem em nuvem e licenciamento do Revit.

A estimativa de custos apresentada na Tabela 5 totaliza R\$ 77.232,00. A maior parcela do orçamento está concentrada na criação do ambiente da plataforma, com um custo de R\$ 53.760,00, o que equivale a aproximadamente 69,6% do total. Esse montante inclui as etapas de desenvolvimento e customização de contratos inteligentes, construção de APIs (*middleware*) e a integração com a rede blockchain por meio do Hyperledger Fabric. Esse dado reforça o caráter técnico e especializado do projeto, que demanda mão de obra qualificada e tempo significativo de desenvolvimento.

Outro ponto que cabe destaque é os custos com a orquestração da infraestrutura blockchain, que totalizam R\$ 3.940,00, representando apenas 5,1% do custo total. O desenvolvimento da interface do usuário (*front-end*) corresponde a R\$ 5.500,00, enquanto os custos com hospedagem em nuvem (AWS e Vercel) somam R\$ 2.417,00. Esses valores indicam um impacto orçamentário relativamente pequeno da infraestrutura de nuvem e das camadas de apresentação do sistema, o que favorece a escalabilidade técnica com baixo custo incremental.

Já o licenciamento do modelo BIM, por meio do Autodesk Revit, representa um custo fixo de R\$ 11.615,00, aproximadamente 15% do total estimado. No entanto, esse valor pode ser eliminado nos casos em que a empresa contratante já possua licenças ativas da ferramenta.

Em síntese, os dados atualizados demonstram que a maior parte dos recursos está alocada no desenvolvimento técnico do núcleo da plataforma, com custos operacionais e de infraestrutura. A estrutura modular do sistema indica uma boa perspectiva de escalabilidade e adoção em diferentes contextos organizacionais.

5.6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Estrutura do método de desenvolvimento do BIMLedger

A estrutura geral do método para desenvolvimento do BIMLedger, representada no fluxograma proposto neste estudo apresenta diferenças significativas em relação aos estudos de Elghaish *et al.* (2020), Wu *et al.* (2022) e Brandín e Abrishami (2024). No estudo de Elghaish *et al.* (2020) a estrutura do contrato inteligente foi organizada em três etapas alinhadas às fases do IPD, com integração direta aos dados do modelo BIM e à arquitetura da tecnologia Hyperledger Fabric. Wu *et al.* (2022), por sua vez, também propôs uma estrutura em três camadas, porém fundamentada em níveis de infraestrutura em nuvem, sendo elas: Infraestrutura como Serviço, Blockchain BIM como Serviço e Software como Serviço, cada uma associada a dados, informações e conhecimentos específicos.

Já Brandín e Abrishami (2024) apresentaram um esquema sequencial voltado à interação entre os usuários e os contratos inteligentes, destacando a integração com o modelo BIM e o uso de armazenamento em nuvem para dados externos à blockchain. Em contraste, o método proposto para o BIMLedger foca na articulação direta entre modelo BIM, controle de execução por pavimento e automação do pagamento por meio de uma interface amigável, priorizando a rastreabilidade e a padronização de dados operacionais como base para o funcionamento dos contratos inteligentes.

Camada Contrato Inteligente

Em uma análise comparativa, observa-se que tanto o presente estudo quanto os estudos de Elghaish *et al.* (2020), Wu *et al.* (2022) e Brandín e Abrishami (2024) realizaram a definição do fluxo de pagamento do contrato com base em estudos empíricos e observações em campo. Essa abordagem permitiu representar de forma mais fiel as regras de negócio nos respectivos protótipos de contratos inteligentes. Essa fase preliminar foi essencial para compreender os gatilhos de pagamento, as validações operacionais e os pontos críticos de controle dentro do ciclo de fornecimento e execução contratual.

Em relação aos estudos de Elghaish *et al.* (2020), Wu *et al.* (2022) e Brandín e Abrishami (2024), este trabalho apresenta avanços significativos na modelagem de dados, ao aprofundar-se na estrutura lógica da informação por meio da elaboração de um DER. Diferentemente das abordagens com foco funcional ou conceitual, o DER desenvolvido neste estudo organiza as entidades e seus atributos de forma clara,

promovendo rastreabilidade, consistência e melhor compreensão do funcionamento do contrato inteligente. Essa abordagem fortalece a robustez e a coerência da solução, alinhando-a com as necessidades reais do processo construtivo.

No que se refere à modelagem dos processos de negócio, este trabalho também apresenta um avanço em relação aos trabalhos de Groesen e Pauwels (2022), Sonmez, Ahmadi-Sheykhsarmast e Gungor (2022) e Elghaish, Abrishami e Hosseini (2020). Embora os autores anteriores reconheçam a relevância dos fluxos operacionais, não há, em seus estudos, a utilização estruturada da notação BPMN para descrever de forma detalhada os processos.

Neste trabalho, a partir do mapeamento do fluxo atual de pagamento do concreto e do trâmite das notas fiscais, foi possível elaborar um diagrama BPMN do tipo *TO-BE*, que representa o fluxo futuro idealizado para ser implementado de forma simplificada no protótipo BIMLedger. Essa modelagem orientada à melhoria permitiu representar os pontos de controle, os documentos envolvidos, os responsáveis por cada etapa e os eventos que acionam as transições no processo, oferecendo uma base sólida para a automação e digitalização do pagamento.

Portanto, tanto a modelagem de dados quanto a modelagem de processos de negócio viabilizaram a visualização clara das decisões tomadas pelos setores envolvidos, bem como dos documentos que são gerados e percorrem o fluxo de pagamento. A partir dessa estrutura, é possível observar gargalos, identificar pontos de melhoria e promover a simplificação do processo, criando condições mais favoráveis à implementação de contratos inteligentes.

No contexto do protótipo BIMLedger, a GoFabric ofereceu uma estrutura robusta para a personalização do contrato inteligente, possibilitando sua adaptação ao fluxo real de pagamento do concreto e aos principais atores envolvidos, como fornecedor, gestor de obra, financeiro e setor fiscal. A plataforma permitiu definir condições, eventos e regras de execução que refletem fielmente os pontos críticos do processo, como a verificação da entrega do concreto, a aprovação da nota fiscal e a autorização do pagamento. Outro avanço importante foi a instanciação do contrato em nuvem, característica nativa da GoFabric, que garante escalabilidade, segurança e disponibilidade da execução contratual, além de facilitar auditorias e o rastreamento de transações.

Camada BIM

Este estudo apresenta um avanço em relação aos trabalhos de Groesen e Pauwels (2022), Sonmez, Ahmadisheykhsarmast e Gungor (2022), e Elghaish, Abrishami e Hosseini (2020), no que diz respeito ao nível de detalhamento das informações do modelo BIM. Os estudos de Groesen Pauwels (2022) e Sonmez, Ahmadisheykhsarmast e Gungor (2022) adotam a metodologia LOD para definir o grau de maturidade dos elementos do modelo BIM. Apesar de o LOD ser amplamente utilizado, sua abordagem foca predominantemente nos aspectos geométricos e de representação gráfica dos elementos, o que pode limitar a especificidade informacional necessária para aplicações contratuais automatizadas.

Neste contexto, este trabalho avança ao adotar a metodologia LOIN, conforme as diretrizes da ISO 7817-1:2024, oferecem uma abordagem mais específica, flexível e orientada por contexto. Ao invés de focar somente na representação gráfica dos objetos, o LOIN considera o conteúdo informacional necessário conforme o propósito, o momento da entrega, o responsável pela informação e o objeto ao qual ela está associada. Com base nessa estrutura, foi elaborado um quadro comparativo que detalha as informações do modelo BIM da edificação em estudo.

Ao aplicar o LOIN de forma estruturada, este estudo não apenas supera a abordagem dos autores que utilizaram o LOD, por oferecer uma visão mais contextualizada e funcional do uso da informação, como também preenche a lacuna dos estudos que sequer especificam critérios para o nível de detalhamento do modelo BIM.

Front-end

No BIMLedger, o *front-end* foi desenvolvido com foco na visualização intuitiva e na interação direta com os dados extraídos do modelo BIM. A integração com o modelo BIM permite a conversão e disponibilização do modelo em um formato compatível com aplicações web. Essa integração possibilita a renderização do modelo tridimensional diretamente na interface do sistema, permitindo que usuários visualizem elementos da obra conforme executado com seus respectivos dados vinculados.

Em comparação com os trabalhos de Groesen e Pauwels (2022), Sonmez, Ahmadisheykhsarmast e Gungor (2022) e Elghaish, Abrishami e Hosseini (2020), o BIMLedger representa um avanço ao atrelar o pagamento não apenas ao progresso físico da obra, mas também à verificação da qualidade do serviço executado,

especialmente no caso da concretagem. Diferentemente dos estudos anteriores, que automatizam pagamentos com base em cronogramas ou medições sem critérios técnicos de qualidade, o BIMLedger condiciona a liberação dos valores à validação de informações inseridas no modelo BIM, como o status de concretagem e os resultados do teste de *slump* do concreto. Essa abordagem assegura que apenas os serviços que atendam aos requisitos técnicos estabelecidos sejam remunerados, promovendo maior controle, confiabilidade e rigor na gestão contratual automatizada.

Avaliação experimental

Ao comparar os resultados do presente estudo com os trabalhos de Elghaish *et al.* (2020), Wu *et al.* (2022) e Brandín e Abrishami (2024), observa-se que nenhum dos três realiza uma avaliação estruturada da funcionalidade dos sistemas com base em métricas de qualidade formalizadas, como as propostas pela norma ISO/IEC 25010: 2023, especialmente no que se refere à funcionalidade e ao nível de visualização de dados.

Elghaish *et al.* (2020) abordam a escalabilidade de forma conceitual, sugerindo que o sistema de pagamentos com o contrato inteligente pode ser aplicado a diferentes fases e tipos de projetos. No entanto, não há testes práticos ou métricas para avaliar essa capacidade. Wu *et al.* (2022) mencionam a escalabilidade como um dos objetivos da arquitetura descentralizada proposta, utilizando a blockchain apenas para dados essenciais.

Apesar da intenção, não aplicam indicadores técnicos para mensurar a escalabilidade da solução. Brandín e Abrishami (2024) tratam da escalabilidade em termos de replicabilidade da metodologia em diferentes contextos. Ainda assim, a avaliação permanece descritiva e sem validação prática ou uso de métricas formais.

Dessa forma, conclui-se que os estudos de Elghaish *et al.* (2020), Wu *et al.* (2022) e Brandín e Abrishami (2024) reconhecem a importância da escalabilidade em suas propostas, mas nenhum deles realiza uma avaliação formal ou mensurável dessa variável. A discussão ocorre de forma qualitativa ou conceitual, sem respaldo em indicadores técnicos padronizados. Nesse contexto, o uso de escalas como as propostas na ISO/IEC 25010, embora ausente nos trabalhos citados, poderia oferecer maior robustez e comparabilidade para futuras avaliações.

Elghaish *et al.* (2020) reconhecem a importância da interoperabilidade ao integrar modelos BIM com blockchain e contratos inteligentes, porém tratam o tema de forma

conceitual. Não apresentam testes de integração com sistemas distintos nem utilizam métricas específicas para avaliar o grau de interoperabilidade. Wu *et al.* (2022) abordam a interoperabilidade de maneira mais estruturada, ao propor uma arquitetura que conecta BIM, IoT e blockchain. O estudo destaca a capacidade de integração entre diferentes plataformas, mas, apesar do detalhamento técnico, não realiza mensuração formal da interoperabilidade, limitando-se a apresentar a compatibilidade esperada entre os componentes.

Brandín e Abrishami (2024) mencionam a interoperabilidade como requisito fundamental para adoção do sistema em ambientes reais. Discutem a compatibilidade entre diferentes modelos BIM e a plataforma proposta, porém, assim como os demais, não realizam avaliação quantitativa ou aplicação de indicadores técnicos para medir essa integração.

Elghaish *et al.* (2020) mencionam a segurança como uma das vantagens do uso de *smart contracts*, destacando a confiabilidade e a imutabilidade das transações. No entanto, não apresentam nenhuma métrica ou método de avaliação quantitativa para medir o nível de segurança do sistema proposto. Wu *et al.* (2022) tratam a segurança de forma mais técnica, especialmente no contexto da integração entre IoT, BIM e blockchain. Apontam riscos e falhas em arquiteturas centralizadas e defendem a descentralização como solução. Apesar disso, não aplicam métricas ou testes específicos para mensurar a segurança da arquitetura desenvolvida.

Brandín e Abrishami (2024) reconhecem a segurança como aspecto essencial para a adoção de soluções baseadas em blockchain no setor da construção. Destacam os benefícios da rastreabilidade e da integridade dos dados, mas, assim como os demais, não utilizam indicadores técnicos ou instrumentos normativos para avaliar a segurança do sistema.

Análise comparativa de métricas

Elghaish *et al.* (2020), Wu et al. (2022) e Brandín e Abrishami (2024) abordam o uso de blockchain em diferentes contextos, porém apenas o estudo de Brandín e Abrishami (2024) realizou uma avaliação das métricas de desempenho operacional da rede. Especificamente, os autores mensuraram o *throughput* (taxa de processamento) e a latência do sistema desenvolvido, utilizando blocos com diferentes tamanhos 30 MB, 50 MB e 100 MB, para simular variações na carga de dados processada pela rede.

Essas métricas, no entanto, não foram abordadas no presente estudo. Os testes demonstraram um *throughput* variando entre 407 e 454 transações por segundo, enquanto a latência observada ficou entre 149 milissegundos e 208 milissegundos, dependendo do volume de dados trafegados. Essa abordagem permitiu avaliar a capacidade do sistema em processar múltiplas transações em um curto intervalo de tempo, fornecendo uma visão sobre o desempenho da rede em condições distintas de uso.

Portanto, a aplicação da ISO/IEC 25010 neste contexto não apenas preenche uma lacuna metodológica, mas também amplia a qualidade da análise experimental, fornecendo subsídios mais sólidos para a replicação, evolução e adoção do sistema em escala maior. Trata-se de uma contribuição significativa para o amadurecimento das metodologias de avaliação de protótipos no setor da construção digital.

Nível de maturidade tecnológica

O BIMLedger atingiu o Nível 4 da escala TRL, corroborando a tecnologia em ambiente laboratorial, o que representa um marco intermediário entre a prova de conceito e os testes em ambiente operacional real. Nesse estágio de maturidade tecnológica, inicia-se a fase ativa de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), voltada à análise crítica do conceito, à identificação de limitações e à realização de testes experimentais para comprovar sua viabilidade técnica.

A inserção do BIMLedger no TRL 4 é significativa, pois mostra que a solução já foi avaliada em condições controladas e está apta para evoluir para estágios mais avançados de aplicação e escalabilidade. Esse mesmo nível da escala é também alcançado nos estudos de Elghaish *et al.* (2020), Wu *et al.* (2022) e Brandín e Abrishami (2024), que apresentam protótipos funcionais com validação laboratorial, mas ainda sem implementação em ambientes industriais complexos.

Estimativa de custos

Com relação à estimativa de custos para desenvolvimento do BIMLedger, foi feito um esforço em apresentar de forma clara e fundamentada os valores envolvidos tanto na criação do protótipo quanto em uma possível implementação em escala comercial. Esse aspecto representa uma contribuição relevante do estudo, já que os trabalhos de Groesen e Pauwels (2022), Sonmez, Ahmadisheykhsarmast e Gungor (2022), e

Elghaish, Abrishami e Hosseini (2020) não abordam estimativas financeiras para a viabilização de suas propostas.

Ao trazer essa perspectiva econômica, o BIMLedger permite uma análise mais realista de sua aplicabilidade, possibilitando que empresas e instituições avaliem o investimento necessário frente aos benefícios potenciais, como automação de pagamentos, rastreabilidade, validação da qualidade e maior transparência nos processos construtivos. Tal abordagem contribui para o avanço da solução em direção ao nível de maturidade tecnológica 4, no qual um protótipo já validado pode ser transferido para o mercado, evidenciando o potencial de adoção do BIMLedger como ferramenta prática e escalável para a indústria da construção.

6 CONCLUSÃO

Neste capítulo é apresentada a conclusão da pesquisa, bem como suas limitações e sugestões para estudos futuros. A partir da análise e discussão dos resultados ao longo do trabalho, considera-se que os objetivos propostos foram atendidos, tendo culminado nas contribuições teóricas e práticas da pesquisa. Em seguida, são retomados os objetivos secundários e principal com as devidas considerações finais para cada um.

6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O primeiro objetivo específico foi modelar dados para auxiliar no desenvolvimento do BIMLedger. Foram modelados dados referentes a quatro grandes grupos de informação: (1) atores principais e entidades; (2) dados operacionais de processos (3) documentos (4) Interações entre processos. A modelagem de dados mostrou-se robusta e compatível ao propósito do BIMLedger ao estruturar, de forma clara e relacional, as informações necessárias para registrar e acompanhar o fluxo de pagamento do concreto na Empresa X. Essa modelagem também contribui para garantir a rastreabilidade e a integridade dos dados, atendendo aos requisitos de integração com o BIM.

Diferentemente dos estudos de Elghaish *et al.* (2020), Wu *et al.* (2022) e Brandín e Abrishami (2024), nos quais não foram apresentadas informações sobre a modelagem de dados, o BIMLedger propõe uma estruturação detalhada e relacional de dados orientada aos processos de pagamento vinculados ao fornecimento de concreto. Essa modelagem abrange desde a identificação dos atores envolvidos e o controle dos documentos até a integração com os processos operacionais da obra, permitindo não apenas a rastreabilidade das informações, mas também a vinculação direta dessas informações aos eventos que disparam os contratos inteligentes.

Além disso, o fluxo de pagamento proposto pelo BIMLedger, atrelado a marcos físicos como o recebimento e o controle de qualidade do concreto *in loco*, representa um avanço em relação aos trabalhos analisados, que se concentram majoritariamente no rastreamento de elementos pré-fabricados.

Ao conectar informações do modelo BIM com registros confiáveis em blockchain e com eventos operacionais reais da obra, o BIMLedger cria um ecossistema mais completo de governança digital, contribuindo para a transparência, automação e mitigação de conflitos no setor da construção civil. Essa abordagem amplia a

aplicabilidade das tecnologias BIM e blockchain para contextos de execução de obra que exigem maior flexibilidade e controle em tempo real.

O segundo objetivo específico foi mapear os processos de recebimento, pagamento e rastreamento do concreto para o sistema de paredes moldadas *in loco*. O fluxo analisado apresenta-se bem definido e estruturado, com etapas específicas de verificação contratual, controle de qualidade do concreto e validação das medições antes do pagamento, promovendo confiabilidade e rastreabilidade das informações por meio da atuação coordenada entre os agentes envolvidos. Contudo, apesar da clareza do processo, foram identificadas oportunidades de aprimoramento, especialmente na automação de registros, automatização dos pagamentos e integração de dados, o que pode ser potencializado com o uso de tecnologias como BIM e blockchain, visando maior agilidade, transparência, redução de erros e segurança nas decisões.

O último objetivo específico da pesquisa foi estimar o custo para comercialização do BIMLedger. O valor estimado foi de R\$ 77.232,00. Esse montante inclui os custos com a orquestração blockchain, a ser realizada pela empresa GoLedger, a aquisição de uma licença anual do Autodesk Revit para o desenvolvimento do modelo BIM, bem como a contribuição para o modelo BIM derivado. Além disso, estão previstos os custos com o desenvolvimento do *front-end* e a validação de dados, atividades que seriam realizadas por uma empresa parceira contratada, e os custos com a hospedagem do protótipo na web. Com base nessa estimativa, conclui-se que o custo apresentado fornece uma base realista para futuras decisões de investimento, considerando o potencial de aplicação prática do BIMLedger no mercado de construção civil com foco em rastreabilidade e automação de processos.

O objetivo geral desta pesquisa foi propor um protótipo de contrato inteligente, com o uso integrado de blockchain e BIM para automatizar o pagamento do sistema de paredes de concreto moldadas *in loco*. O BIMLedger foi classificado no Nível 4 da escala TRL por ter sua viabilidade validada em ambiente laboratorial. O desenvolvimento do BIMLedger foi estruturado em duas camadas: camada contrato inteligente e camada BIM.

O protótipo abrange um fluxo simplificado de pagamento do concreto, modelado com base em um estudo empírico, e conta com um modelo BIM integrado que representa o avanço da concretagem, contendo parâmetros que possibilitam o rastreamento do concreto e o acompanhamento do status da concretagem na obra. O pagamento é realizado de forma semiautomática, e um comprovante digital é gerado

ao final da simulação, demonstrando o potencial de automação e rastreabilidade do processo.

Outro aspecto que destaca a originalidade do BIMLedger é o seu foco em um sistema construtivo amplamente utilizado no Brasil, o sistema de parede de concreto moldadas *in loco*, com fluxos operacionais específicos, como o recebimento e controle tecnológico do concreto em campo.

Enquanto os estudos internacionais se concentram majoritariamente no rastreamento de componentes pré-fabricados ou na gestão documental em nuvem, o BIMLedger propõe um fluxo integrado de pagamento baseado em eventos físicos, conectando o modelo BIM, os dados operacionais e a lógica de contratos inteligentes em um ambiente distribuído. Essa proposta se alinha aos desafios enfrentados em obras reais e amplia o escopo de aplicação das tecnologias digitais, com potencial de replicação em diferentes tipos de empreendimentos.

Assim, esta pesquisa contribui significativamente ao demonstrar a viabilidade de integração entre BIM e blockchain para automação de pagamentos, respondendo às lacunas identificadas por autores como Wang *et al.* (2021), Perera *et al.* (2020) e Shojaei e Motamedi (2021), no que se refere à rastreabilidade e confiabilidade de transações em sistemas construtivos industrializados.

O BIMLedger se apresenta como uma proposta original e orientada à prática, especialmente no contexto da construção civil brasileira, ainda carente de soluções digitais integradas com esse grau de maturidade técnica. Ao integrar modelagem BIM, modelagem de dados e contratos inteligentes, o BIMLedger promove maior eficiência, transparência e confiabilidade na gestão de contratos e pagamentos, contribuindo com a digitalização da construção civil no Brasil e no cenário internacional.

6.2 PRODUÇÕES CIENTÍFICAS

Este item contempla as quatro produções científicas desenvolvidas ao longo desta pesquisa conforme ilustrado no Quadro 17.

Quadro 17 – Produção científica deste estudo.

Tipo	Título	Onde	Ano
Capítulo de E-book	BIMLEDGER: Protótipo de Contrato Inteligente para Pagamento Semiautomático de Concreto	E-book Prêmio ADEMI de inovação acadêmica.	2024
Capítulo de E-book	Blockchain	E-book Gêmeos digitais: a próxima construção revolução da construção civil, 1ª ed.	2025
Artigo	BIM e Blockchain: lacunas da literatura e regras de modelagem de dados para contrato inteligente	XX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ENTAC), Maceió. Anais	2024
Artigo	Desenvolvimento de protótipo preliminar de contrato inteligente para pagamento de concreto	5º Simpósio Brasileiro de Tecnologia da Informação e Comunicação na Construção, Florianópolis.	2025

Fonte: O autor (2025).

6.3 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Apesar dos avanços obtidos com o desenvolvimento do BIMLedger, é importante reconhecer as limitações identificadas durante sua avaliação. Com base nos testes experimentais relacionados ao desempenho do protótipo e na análise qualitativa realizada por meio de entrevistas semiestruturadas voltado à validação dos requisitos dos usuários, foram levantadas algumas limitações técnicas e metodológicas do protótipo. A seguir, são apresentadas e discutidas as principais limitações observadas ao longo da pesquisa:

Limitações Técnicas

- **Ausência de integração com dispositivos IoT:** o BIMLedger ainda não está conectado a dispositivos físicos capazes de registrar automaticamente eventos como a entrega, recebimento e análise do concreto. Portanto, essa integração seria essencial para que o pagamento ocorresse de forma totalmente automática, sem necessidade de intervenção humana.
- **Validações de dados inseridas no *front-end*:** As verificações como (entradas inválidas, bloqueios de operações indevidas e leituras de dados) provenientes do modelo BIM são realizadas no *front-end*.
- **Dependência de interoperabilidade parcial com o BIM:** Apesar de utilizar a Autodesk Platform Services como ponte entre o Revit e o BIMLedger, a integração é considerada parcial, uma vez que exige a atualização manual de parâmetros no modelo BIM, seguida da sincronização com a APS. O BIMLedger acessa os dados publicados na nuvem para validar o status e acionar o contrato inteligente, mas essa leitura ocorre de forma reativa e fora do ambiente nativo de modelagem. A ausência de interação direta entre o usuário e o contrato inteligente dentro da mesma interface BIM reduz a fluidez operacional e reforça a necessidade de avanços em direção à automação plena e à interoperabilidade em tempo real.
- **Ausência de correção na análise do concreto:** O BIMLedger não contempla, atualmente, a possibilidade de simular o acréscimo de água para ajuste do fator água/cimento, nos casos em que o concreto não atinge os parâmetros exigidos no *slump* teste. Uma possível melhoria seria a implementação de um fluxo de aprovação técnica, no qual o gestor da obra autorize a correção, permitindo a reavaliação laboratorial e a consequente validação do concreto ajustado.

- **Necessidade de acionamento manual para execução do pagamento:**

Atualmente, o sistema exige que o usuário acione manualmente o botão “atualizar” para que o pagamento seja realizado. Esse processo poderia ser automatizado, ocorrendo de forma imediata após a validação do controle de qualidade do concreto.

- **Ausência de carteira digital para simulação de pagamento real:** O protótipo

não integra uma carteira digital que permita a simulação de um pagamento com envio real ou simbólico de valores, limitando a experiência prática da operação financeira dentro do BIMLedger.

Limitações metodológicas

- **Limitações em testes de segurança e desempenho:** Não foram realizados

testes específicos de segurança voltados à resistência a ataques ou verificação da integridade das transações. Da mesma forma, não foram conduzidos testes de desempenho relacionados ao tempo de execução das transações registradas no sistema.

- **Validação restrita ao ambiente laboratorial (TRL 4):** Por estar no Nível 4 da

escala de maturidade tecnológica (TRL), o protótipo foi validado apenas em ambiente controlado, o que limita a comprovação de seu desempenho em cenários reais de obra. Testes em campo são necessários para avaliar sua aplicabilidade em contextos com maior variabilidade operacional, técnica e humana.

- **Foco específico em um sistema construtivo:** O objetivo exclusivo no

pagamento do sistema de parede de concreto moldada *in loco* pode limitar a transferência do modelo para outros contextos como pagamentos de serviços que abrangem pisos e revestimentos, estruturas metálicas, pré-moldados entre outros. Isso restringe o escopo conceitual do protótipo, que ainda não foi testado em fluxos com características distintas de controle e medição.

- **Ausência de comparação empírica com métodos tradicionais:** Não há uma

análise quantitativa comparando o fluxo tradicional (papel, medições manuais, pagamentos administrativos) com o fluxo digital proposto. Isso limita a comprovação dos ganhos reais de eficiência, confiabilidade ou economia de tempo/custos.

Ao comparar as limitações identificadas nesta pesquisa, observa-se que outras investigações na literatura enfrentam desafios similares, tanto em aspectos técnicos quanto conceituais. Elghaish *et al.* (2020), que embora tenha desenvolvido um modelo promissor para automação de pagamentos por meio de contratos inteligentes, também

foi validado apenas em ambiente laboratorial, com foco em um único tipo de fluxo construtivo e sem testes em campo, o que limita a comprovação de sua aplicabilidade prática. Hijazi *et al.* (2022) desenvolveram um modelo de rastreabilidade com BIM e blockchain, mas relataram uma abordagem conceitual sem testes em campo e integração limitada à construção modular.

A proposta de Wu *et al.* (2022) permanece no nível conceitual, sem validação prática da comunicação entre dispositivos físicos e o sistema. Embora o trabalho aborde interoperabilidade, também não oferece interação direta com o modelo BIM dentro de uma interface unificada, nem mecanismos de correção técnica ou simulação real de pagamentos.

No trabalho de Elghaish *et al.* (2020), não há integração com dispositivos IoT nem implementação de pagamentos automatizados em tempo real. O foco está na automação contratual com base em modelos BIM, mas a execução depende da inserção manual de informações no modelo.

No que se refere ao nível de maturidade tecnológica, os três estudos também se restringem ao ambiente laboratorial ou simulado, posicionando-se igualmente no TRL 4. Quanto à aplicabilidade do sistema, tanto Elghaish *et al.* (2020) quanto Wu *et al.* (2022) tratam de aplicações genéricas ou conceituais para contratos inteligentes na construção, mas sem aplicação prática testada em sistemas construtivos específicos. O estudo de Brandín e Abrishami (2024) foca na rastreabilidade de componentes *off-site*, como módulos pré-fabricados, o que também representa uma restrição de escopo funcional, embora distinta da abordagem adotada no BIMLedger, voltada ao sistema de paredes de concreto moldadas *in loco*.

Dessa forma, conclui-se que as limitações identificadas no BIMLedger são coerentes com o estágio atual da pesquisa internacional, refletindo desafios comuns à integração plena entre BIM, blockchain e sistemas construtivos. Ao mesmo tempo, evidenciam oportunidades claras para trabalhos futuros, especialmente no que se refere à validação em campo, expansão de escopo funcional e análise comparativa com processos convencionais.

6.4 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nas experiências obtidas ao longo dos estudos exploratório e empírico, bem como na análise das limitações identificadas, e visando a continuidade e o aprimoramento desta linha de pesquisa, apresentam-se a seguir algumas sugestões para trabalhos futuros. Para facilitar a organização e o direcionamento das propostas, as sugestões foram agrupadas em três eixos de desenvolvimento: tecnológico, experimental e operacional, conforme descrito a seguir:

Eixo tecnológico

- Explorar a incorporação de tecnologias de sensoriamento, como dispositivos IoT, para monitoramento em tempo real da execução da concretagem, possibilitando a liberação automática do pagamento com base em dados de campo sincronizados.
- Inserir as validações de dados realizadas no *front-end*, para a camada contrato inteligente.
- Criar extensões ou *plug-ins* que permitam ao usuário interagir diretamente com o protótipo dentro da interface BIM, tornando possível, por exemplo, acionar ou consultar o status de pagamentos vinculados a elementos do modelo sem sair do ambiente de modelagem;
- Desenvolver uma funcionalidade que automatize a execução do pagamento imediatamente após a validação dos critérios de controle de qualidade do concreto, eliminando a necessidade de intervenção manual no sistema.
- Integrar ao protótipo uma carteira digital que permita simular transações reais ou simbólicas com criptomoedas ou *tokens*, tornando mais realista a experiência de pagamento automatizado no BIMLedger.

Eixo Experimental

- Avançar para fases de validação em campo (TRL 5 ou superior), por meio de aplicações-piloto em canteiros de obras reais, de modo a avaliar o desempenho do BIMLedger em situações práticas, com variáveis operacionais e técnicas concretas.
- Realizar testes específicos de segurança cibernética e integridade de dados, bem como análises de desempenho para mensurar a escalabilidade e o tempo de execução das transações no ambiente blockchain utilizado.

Eixo Operacional

- Refinar o protótipo para incluir um mecanismo que permita simular, de forma controlada, o ajuste do fator água/cimento, caso o concreto não atenda ao parâmetro do *slump* teste, integrando um fluxo de aprovação técnica por parte do gestor da obra.

Eixo Investigação Ampliada

- Avaliar o impacto da adoção de contratos inteligentes nos indicadores de desempenho do canteiro de obras, como produtividade, tempo de ciclo de pagamentos, confiabilidade na medição e redução de disputas contratuais. Essa investigação contribuiria para quantificar os benefícios reais da automação proposta pelo BIMLedger, em comparação com os métodos tradicionais de gestão de contratos e pagamentos.
- Realizar estudos comparativos entre o BIMLedger e outras tecnologias emergentes, como gêmeos digitais ou sistemas baseados em inteligência artificial, com foco em rastreabilidade, automação de decisões e interoperabilidade em obras. Essa comparação permitiria posicionar o BIMLedger dentro do ecossistema de inovação da construção civil, identificando complementaridades ou possíveis integrações futuras entre essas abordagens.

REFERÊNCIAS

- ABANDA, F. H. et al. A critical analysis of building information modelling systems used in construction projects. **Advances in Engineering Software**, v. 90, p. 183–201, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2015.08.009>
- ABEYRATNE, S. A.; MONFARED, R. P. Blockchain ready manufacturing supply chain using distributed ledger. **International Journal of Research in Engineering and Technology**, Bangalore, v. 5, n. 9, p. 1–10, 2016. Disponível em: https://repository.lboro.ac.uk/articles/journal_contribution/Blockchain_ready_manufacturing_supply_chain_using_distributed_ledger/9566069
- ABGI BRASIL. TRL: **recursos financeiros por níveis de maturidade tecnológica**. [S.I.: s.n.], 2025. Disponível em: <https://abgi-brasil.com/trl-recursos-financeiros-por-niveis-de-maturidade-tecnologica/>. Acesso em: 17 abr. 2025.
- ABPMP – ASSOCIATION OF BUSINESS PROCESS PROFESSIONALS. Guia para o gerenciamento de processos de negócio – corpo comum de conhecimento. **BPM CBOK**, v. 3.0, 2014.
- ADDOR, M. R. A. et al. Colocando o “i” no BIM. **Revista USJT Arquitetura e Urbanismo**, São Paulo, n. 4, p. 104–115, 2010.
- AHMADISHEYKHSARMAST, S.; SONMEZ, R. Smart contracts in construction industry. In: **International Project and Construction Management Conference – IPCMC 2018**, 5., North Cyprus, 2018. Proceedings [...]. North Cyprus: [s.n.], 2018. p. 767–774. Disponível em: <http://pcmc2018.ciu.edu.tr/index.php/ipcmc-2018-proceedings/>.
- ALI, A. et al. Software cost estimation through entity relationship model. **Journal of American Science**, v. 6, n. 11, p. 47–51, 2010.
- ALMEIDA, M. B.; OLIVEIRA, V. N. P.; COELHO, K. C. Estudo exploratório sobre ontologias aplicadas a modelos de sistemas de informação: perspectivas de pesquisa em Ciência da Informação. **Encontros Bibli**, v. 15, n. 30, p. 32–56, 2010.
- AMERICAN INSTITUTE OF ARCHITECTS (AIA). **Integrated project delivery: a guide**. Version 1. AIA California Council, 2007. 62 p.
- ANDRADE, M. L.; RUSCHEL, R. C. Interoperabilidade de aplicativos BIM usados em arquitetura por meio do formato IFC. **Gestão e Tecnologia de Projetos**, São Paulo, v. 4, n. 2, p. 76–111, 2009. DOI: <https://doi.org/10.4237/gtp.v4i2.102>.
- ANDROULAKI, E. et al. Hyperledger Fabric: a distributed operating system for permissioned blockchains. In: EUROSYS CONFERENCE, 13., 2018. **Proceedings** [...]. [S.I.: s.n.], 2018. p. 1–15.
- ANTONOPoulos, A. **Mastering Bitcoin: programming the open blockchain**. 2. ed. Sebastopol: O'Reilly Media, 2017.

AZMAN, M. N. A.; DZULKALNINE, N.; ABD HAMID, Z.; BENG, K. W. Payment issue in Malaysian construction industry: contractors' perspective. **Journal of Technology**, v. 70, n. 1, p. 57–63, 2014. DOI: <https://doi.org/10.11113/jt.v70.2804>.

BAGUI, S.; EARP, R. **Database design using entity-relationship diagrams**. Boca Raton: CRC Press, 1964. 321 p.

BALIGA, A. **Understanding blockchain consensus models**. Persistent Systems, 2020.

BECERIK-GERBER, B.; JAZIZADEH, F.; LI, N.; CALIS, G. Application areas and data requirements for BIM-enabled facilities management. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 138, n. 3, p. 431–442, 2012.

BIMFORUM. **Level of development (LOD) specification part 1 and commentary for building information models and data**. 2019. Disponível em: <https://bimforum.org/wp-content/uploads/2019/04/LOD-Spec-2019-Part-I-and-Guide-2019-04-29.pdf>

BONFANTE, H.; PALMISANO, A. Tendências e desafios na evolução do building information modeling (BIM): análise teórica das dimensões tradicionais aos paradigmas emergentes na construção civil. **REPAE – Revista de Ensino e Pesquisa em Administração e Engenharia**, v. 10, n. 2, p. 64–74, 2024.

BRANDÍN, R.; ABRISHAMI, S. IoT-BIM and blockchain integration for enhanced data traceability in offsite manufacturing. **Automation in Construction**, v. 159, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105266>.

BUILDING AND CONSTRUCTION AUTHORITY. **Singapore BIM guide**. Singapore: Building and Construction Authority, 2012. 74 p.

BUTERIN, V. On public and private blockchains. **Ethereum Blog**, 7 ago. 2015. Disponível em: <https://blog.ethereum.org/2015/08/07/on-public-and-private-blockchains/>. Acesso em: 10 jul. 2025.

CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS. Ledger. In: **Cambridge English Dictionary**. 2019. Disponível em: <https://dictionary.cambridge.org>. Acesso em: 10 jul. 2025.

CARDEIRA, H. Smart contracts and possible application to the construction industry. In: NEW PERSPECTIVES IN CONSTRUCTION LAW CONFERENCE, 2015, Bucharest. **Proceedings** [...]. Bucharest: [s.n.], 2015. p. 35–39. Disponível em: http://rscl.ro/wp-content/uploads/2016/06/06_Helder-Cardeira_red.pdf. Acesso em: 10 jul. 2025.

CAPOCASALE, D. et al. Comparative analysis of permissioned blockchain frameworks for industrial applications. **Blockchain: Research and Applications**, v. 4, n. 1, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bcra.2022.100113>.

CBIM – CÂMARA BRASILEIRA DE BIM; BFB – BIM FÓRUM BRASIL. **Pesquisas BIM e cidades inteligentes nos municípios brasileiros 2024**. São Paulo: BIM Fórum Brasil, 2024. 45 p.

CELIK, Y.; PETRI, I.; REZGUI, Y. Integrating BIM and Blockchain across construction lifecycle and supply chains. **Computers in Industry**, v. 148, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2023.103886>

CHEN, P. P. The entity-relationship model: towards a unified view of data. **ACM Transactions on Database Systems**, v. 1, n. 1, p. 9–36, 1976.

CHICARINO, V. R. L. et al. Uso de blockchain para privacidade e segurança em internet das coisas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO EM SEGURANÇA DA INFORMAÇÃO E DE SISTEMAS COMPUTACIONAIS, 17., 2017, Brasília. **Anais** [...]. Brasília: Sociedade Brasileira de Computação, 2017.

CHYNOWETH, P.; CHRISTENSEN, S.; MCNAMARA, J.; O'SHEA, K. Legal and contracting issues in electronic project administration in the construction industry. **Industry Structure Survey**, v. 25, p. 191–203, 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1108/02630800710772791>.

CIOTTA, V. et al. Integration of blockchains and smart contracts into construction information flows: proof-of-concept. **Automation in Construction**, v. 132, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103925>.

COINBUNDLE TEAM. Consensus algorithms. **Medium**, 21 set. 2018. Disponível em: <https://medium.com/coinbundle/consensus-algorithms-dfa4f355259d>

DANKERS, M.; VAN GEEL, F.; SEGERS, N. M. A web platform to link IFC with external information throughout the entire lifecycle of a building. **Process Environment Science**, v. 22, p. 138–147, 2014.

DANTAS, N. R.; MELO, R. S. S.; ALBERTE, E. P. V. BIM, blockchain e outras tecnologias digitais na fase de construção: análise da produção científica internacional. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 19., 2022, Porto Alegre. **Anais** [...]. Porto Alegre: ANTAC, 2022. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/article/view/1973>. DOI: <https://doi.org/10.46421/entac.v19i1.1973>.

DAS, M.; LUO, H.; CHENG, J. C. P. Securing interim payments in construction projects through a blockchain-based framework. **Automation in Construction**, v. 118, p. 103284, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103284>.

DERVISHAJ, A. et al. Modelling precast concrete for a circular economy in the built environment: level of information need guidelines for digital design and collaboration. In: ECAADE 41. DIGITAL DESIGN RECONSIDERED, v. 2, 2023. **Proceedings** [...]. [S.I.: s.n.], 2023.

DI GIUDA, G. M. et al. The construction contract execution through the integration of blockchain technology. In: **DIGITAL TRANSFORMATION OF THE DESIGN, CONSTRUCTION AND MANAGEMENT PROCESSES OF THE BUILT ENVIRONMENT**. Cham: Springer, 2020. p. 27–36.

DINIZ, E. Emerge uma nova tecnologia disruptiva. **GV Executivo**, v. 16, n. 2, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.12660/gvexec.v16n2.2017.68676>.

DHILLON, V. et al. The Hyperledger project. In: **BLOCKCHAIN ENABLED APPLICATIONS**. Cham: Springer, 2017. p. 139–149.

DRESCH, A.; LACERDA, D. P.; ANTUNES JR., J. A. V. **Design science research: a method for science and technology advancement**. Cham: Springer, 2015.

DURDYEV, S. et al. Barriers to the implementation of building information modelling (BIM) for facility management. **Journal of Building Engineering**, v. 46, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobc.2021.103736>.

ELGHAISH, F. et al. Integrated project delivery with blockchain: an automated financial system. **Automation in Construction**, v. 114, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103182>.

ELGHAISH, F. et al. Financial management of construction projects: Hyperledger Fabric and chaincode solutions. **Automation in Construction**, v. 137, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104185>.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **Building information modelling – level of information need – part 1: concepts and principles** (EN 17412-1:2020). Brussels: CEN, 2020.

FIDIC. **Conditions of contracts for construction**. 2. ed. Geneva: FIDIC, 2017. Disponível em: <https://fidic.org/books/construction-contract-2nd-ed-2017-red-book>

FURLONGER, D.; UZUREAU, C. **The real business of blockchain: how leaders can create value in a new digital age**. Boston: Harvard Business Review Press, 2019. 292 p.

GAUR, N. et al. **Hands-on Blockchain with Hyperledger: Building Decentralized Applications with Hyperledger Fabric and Composer**. Birmingham: Packt Publishing Ltd, 2018. 460 p.

GENONG, Y.; LIPING, D.; ZHANG, B.; WANG, H. Coordination through geospatial web service workflow in the sensor web environment. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 3, p. 433–441, 2010.

GOLEDGER. **GoFabric: plataforma de blockchain para redes autorizadas**. [S.I.: s.n.], 2024. Disponível em: <https://goledger.com.br/gofabric/>. Acesso em: 6 dez. 2024

GREVE, F. G. et al. Blockchain e a revolução do consenso sob demanda. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE REDES DE COMPUTADORES E SISTEMAS DISTRIBUÍDOS (SBRC)**, 2018. Anais [...]. [S.I.]: Sociedade Brasileira de Computação, 2018.

- GROESEN, W.; PAUWELS, P. Tracking prefabricated assets and compliance using quick response (QR) codes, blockchain and smart contract technology. **Automation in Construction**, v. 141, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104420>.
- GROUP, H. A. W. et al. Hyperledger architecture. **Hyperledger.org**, v. 1, p. 15, 2017.
- HAMLEDARI, H.; FISCHER, M. Construction payment automation using blockchain-enabled smart contracts and robotic reality capture technologies. **Automation in Construction**, v. 132, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103926>.
- HAMMI, M. T. et al. Bubbles of trust: a decentralized blockchain-based authentication system for IoT. **Computers and Security**, v. 78, p. 126–142, 2018.
- HEGAZY, T. **Computer based construction project management**. The Grants Register, 2022.
- HEVNER, A. R. et al. Design science in information systems research. **MIS Quarterly**, v. 28, n. 1, p. 75–105, 2004.
- HEVNER, A.; CHATTERJEE, S. Design science research in information systems. In: CHATTERJEE, S.; HEVNER, A. (ed.). **Design research in information systems: theory and practice**. New York: Springer, 2010. p. 9–22.
- HIJAZI, A. A.; PERERA, S.; CALHEIROS, R. N.; ALASHWAL, A. R. Rationale for the integration of BIM and blockchain for the construction supply chain data delivery: a systematic literature review and validation through focus group. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 147, 2021. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0002142](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002142).
- HIJAZI, A. et al. A data model for integrating BIM and blockchain to enable a single source of truth for the construction supply chain data delivery. **Engineering, Construction and Architectural Management**, v. 30, n. 10, p. 4645–4664, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1108/ECAM-03-2022-0209>.
- HILEMAN, G.; RAUCHS, M. **Global blockchain benchmarking study**. Cambridge: Cambridge Centre for Alternative Finance, 2017. 119 p.
- HUNHEVICZ, J. J.; HALL, D. M. Do you need a blockchain in construction? Use case categories and decision framework for DLT design options. **Advanced Engineering Informatics**, v. 45, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101094>.
- HUYNH, T.; DOAN, T. Blockchain-based smart contract system for construction: opportunities and challenges. **Automation in Construction***, v. 144, p. 104604, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104604>.
- HYPERLEDGER FABRIC. **Endorsement policies**. 2023. Disponível em: <https://hyperledger-fabric.readthedocs.io/en/release-2.5/endorsement-policies.html>. Acesso em: 16 ago. 2025

ISIKDAG, U. **Enhanced Building Information Models**. 1. ed. Istanbul: Springer, 2015.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 7817-1:2024 — Building information modelling — Level of information need — Part 1: concepts and principles**. Geneva: ISO, 2024.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 19650-1:2018 — Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 1: concepts and principles**. Geneva: ISO, 2018.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION; INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **ISO/IEC 25010:2023 — Systems and software engineering — Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) — System and software quality models**. Geneva: ISO/IEC, 2023.

JU, Q.; DING, L.; SKIBNIEWSKI, M. J. Optimization strategies to eliminate interface conflicts in complex supply chains of construction projects. **Journal of Civil Engineering and Management**, v. 23, n. 6, p. 712–726, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3846/13923730.2016.1232305>.

KAZI, L. et al. Integration of conceptual data modeling methods: higher education experiences. In: INTERNATIONAL CONVENTION ON INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGY, ELECTRONICS AND MICROELECTRONICS (MIPRO), 37., 2014. **Proceedings** [...]. [S.I.: s.n.], 2014. DOI: <https://doi.org/10.1109/mipro.2014.6859685>.

KAGIOGLOU, M. **Developing a vision of ND-enabled construction**. Construct IT Centre of Excellence, University of Sanford, 2003.

KENT, D. C.; BECERIK-GERBER, B. Understanding construction industry experience and attitudes toward integrated project delivery. ***Journal of Construction Engineering and Management***, v. 136, n. 8, p. 815–825, 2010.

KITCHENHAM, B. **Procedures for performing systematic reviews**. Technical Report TR/SE-0401. Keele: Keele University and NICTA, 2004. 28 p.

LACERDA, D. et al. Design Science Research: método de pesquisa para a engenharia de produção. **Gestão e Produção**, v. 20, p. 741–761, 2013.

LAAKSO, M.; KIVINIEMI, A. The IFC standard: a review of history, development and standardization. **Electronic Journal of Information Technology in Construction**, v. 17, n. 9, p. 134–161, 2012.

LEPOINT, T.; CIOCARLIE, G.; ELDEFRAWY, K. BlockCIS – a blockchain-based cyber insurance system. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON CLOUD

ENGINEERING (IC2E), 2018, Orlando. **Proceedings** [...]. [S.I.]: IEEE, 2018. p. 378–384.

LEITE, R. M. C. **Uso da gamificação para melhoria do planejamento e controle de obras**. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Universidade Federal da Bahia; Universidade Estadual de Feira de Santana, Salvador e Feira de Santana, 2014.

LI, J. et al. A proposed approach integrating DLT, BIM, IoT and smart contracts: demonstration using a simulated installation task. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SMART INFRASTRUCTURE AND CONSTRUCTION (ICSIC), 2019. **Proceedings** [...]. [S.I.: s.n.], 2019. p. 275–282.

LI, J.; GREENWOOD, D.; KASSEM, M. 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.02.005>.

LI, J.; KASSEM, M.; WATSON, A. A blockchain and smart contract-based framework to increase traceability of built assets. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION TECHNOLOGY FOR CONSTRUCTION (CIB W78), 37., 2021, São Paulo. **Proceedings** [...]. São Paulo: CIB, 2021.

LIN, I.-C.; LIAO, T.-C. A survey of blockchain security issues and challenges. **International Journal of Network Security**, v. 19, n. 5, p. 653–659, 2017. DOI: [https://doi.org/10.6633/IJNS.201709.19\(5\).01](https://doi.org/10.6633/IJNS.201709.19(5).01).

LINUX FOUNDATION. **Hyperledger Fabric documentation, release master**. 2018.

LIU, J.; LI, H.; SKITMORE, M.; ZHANG, Y. Experience mining based on case-based reasoning for dispute settlement of international construction projects. **Automation in Construction**, v. 97, p. 181–191, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.11.006>.

LUO, H. et al. Smart contract-based blockchain framework. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON AUTOMATION AND ROBOTICS IN CONSTRUCTION (ISARC), 36., 2019, Banff. **Proceedings** [...]. [S.I.]: ISARC, 2019. p. 1254–1260. DOI: <https://doi.org/10.22260/ISARC2019/0168>.

MAIA, R. M. C.; ALVARENGA, L. Teoria da classificação facetada e contribuições para o modelo entidade relacionamento. **Revista Prisma**, v. 25, p. 91–125, 2014.

MANIKINS, C. **Technology readiness levels: a white paper**. Advanced Concepts Office, Office of Space Access and Technology. NASA, 1995. Edição revisada em 2004.

MANU, E.; ANKRAH, N.; CHINYIO, E.; PROVERBS, D. Trust influencing factors in main contractor and subcontractor relationships during projects. **International Journal of**

Project Management, v. 33, n. 7, p. 1495–1508, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2015.06.006>.

MANZIONE, L. Proposição de uma estrutura conceitual de gestão do processo de projeto colaborativo com o uso do BIM. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil) – Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo, 2013. 325 p.

MARTINS, M. et al. BIM e blockchain: lacunas da literatura e regras de modelagem de dados para contrato inteligente. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO (ENTAC), 20., 2024, Maceió. **Anais** [...]. Maceió: ANTAC, 2024.

MASON, J. Intelligent contracts and the construction industry. **Journal of Legal Affairs and Dispute Resolution in Engineering and Construction**, v. 9, n. 3, p. 04517012, 2017. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)LA.1943-4170.0000233](https://doi.org/10.1061/(ASCE)LA.1943-4170.0000233).

MATAN, T.; ISAAC, S. Fully integrated construction planning. **Automation in Construction**, v. 154, p. 105027, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105027>.

MATHEWS, M.; ROBLES, D.; BOWE, B. BIM + blockchain: a solution to the trust problem in collaboration? In: CITA BIM GATHERING, 2017, Dublin. **Proceedings** [...]. Dublin: CITA, 2017.

MATOS, H. G. **Uma avaliação sobre os métodos para modelagem conceitual de banco de dados**. 2016. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016. 118 f.

MIERS, C. et al. Análise de mecanismos para consenso distribuído aplicados a blockchain. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SEGURANÇA DA INFORMAÇÃO E DE SISTEMAS COMPUTACIONAIS (SBSEG), 19., 2019, São Paulo. **Anais** [...]. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2019. p. 109–139. Disponível em: <https://sbseg2019.ime.usp.br/minicursos.pdf>. Acesso em: 22 set. 2025.

MOHER, D. et al. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. **PLoS Medicine**, v. 6, n. 7, e1000097, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>.

MORAES, L. C. **Representação de variabilidade estrutural de dados por meio de famílias de esquemas de banco de dados**. 2015. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015. 47 f.

MOSLEY, M.; BRACKETT, M. H.; EARLEY, S.; HENDERSON, D. **Guide to the data management body of knowledge**. Vancouver: Technics Publications, 2010.

MOTAWA, I.; ALMARSHAD, A. A knowledge-based BIM system for building maintenance. **Automation in Construction**, v. 29, p. 173–182, 2013.

MURRAY, M.; GUIMARÃES, M. Animated courseware support for teaching database design. **Issues in Informing Science and Information Technology**, v. 6, p. 201–211, 2009.

MUSLAH, E.; GHOUL, S. Requirements variability specification for data-intensive software. **International Journal of Software Engineering and Applications**, v. 10, n. 2, p. 1–12, 2019.

NAKAMOTO, S. Bitcoin: a peer-to-peer electronic cash system. **Decentralized Business Review**, p. 21260, 2008.

NAVATHE, S. B.; ELMASRI, R. **Sistemas de banco de dados**. Boston: Addison Wesley Longman, 2011.

NAWARI, N.; RAVINDRAN, S. Blockchain technology and BIM process: review and potential applications. **Journal of Information Technology in Construction**, v. 24, p. 209–238, 2019.

OH, M. et al. Integrated system for collaborative design based on BIM. **Automation in Construction**, v. 58, p. 196–206, 2015.

OLANREWAJU, O. I.; KINEBER, A. F.; CHILESHE, N.; EDWARDS, D. J. Modelling the relationship between Building Information Modelling (BIM) implementation barriers, usage and awareness on building project lifecycle. **Building and Environment**, v. 207, p. 108556, 2022.

OLIVEIRA JUNIOR, M. A. S. **Implantação da tecnologia blockchain para elevar a confiança dos fluxos de informações na indústria da construção civil**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2021. 114 f.

OLMO, J. F. Ataque del 51%: golpe a la democracia digital. **Scientia Omnibus Portus**, v. 7, n. 4, 2024. Disponível em: <https://iescelia.org/ojs>. Acesso em: 22 set. 2025.

OLSON, K. et al. Sawtooth: an introduction. 2018. Disponível em: https://www.hyperledger.org/wp-content/uploads/2018/01/Hyperledger_Sawtooth_WhitePaper.pdf. Acesso em: 22 set. 2025.

OPITZ, F.; WINDISCH, R.; SCHERER, R. J. Integration of document- and model-based construction information for project management. **Procedia Engineering**, v. 85, p. 403–411, 2014.

ORAEI, M. et al. Collaboration barriers in BIM-based construction networks: a conceptual model. **International Journal of Project Management**, v. 37, n. 6, p. 839–854, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2019.05.004>.

OYUGA, J. O.; GWAYA, A.; NJUGUNA, M. B. Investigation of the current usage of BIM capabilities by large-sized building contractors in Kenya based on theory of innovation diffusion. **Construction Innovation**, v. 23, p. 155–177, 2023.

PANIGASSI, R. **Método para especificação e modelagem de processos de fábrica de software usando RM-DOP e BPM**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. 152 f.

PEQUENO, P. et al. ConceptER: uma ferramenta para criação e manutenção do modelo entidade-relacionamento e geração automática de instruções SQL para banco de dados. In: ENCONTRO NACIONAL DE COMPUTAÇÃO DOS INSTITUTOS FEDERAIS (ENCOMPIF), 6., 2019, Belém. **Anais** [...]. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5753/encompif.2019.7199>.

PERBOLI, G.; CAPOCASALE, V.; GOTTA, D. Blockchain-based transaction management in smart logistics: a sawtooth framework. In: IEEE ANNUAL COMPUTERS, SOFTWARE, AND APPLICATIONS CONFERENCE (COMPSAC), 44., 2020. **Proceedings** [...]. Los Alamitos: IEEE, 2020. p. 1713–1718. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMPSAC48688.2020.000-8>.

PERERA, S.; NANAYAKKARA, S.; RODRIGO, M.; WEERASURIYA, G. T.; HIJAZI, A. A methodology for selection of a blockchain platform to develop an enterprise system. **Journal of Industrial and Information Integration**, v. 23, p. 100215, 2021.

PETERS, G. W.; PANAYI, E. Understanding modern banking records through blockchain technologies: future of transaction processing and smart contracts in the internet of money. In: BANCA, M.; PANAYI, E. (org.). **Banking beyond banks and money**. Cham: Springer, 2016. p. 239–278. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-42448-4>.

PETERS, G.; PANAYI, E.; CHAPELLE, A. Trends in cryptocurrencies and blockchain technologies: a monetary theory and regulation perspective. **Journal of Financial Perspectives**, v. 3, n. 3, 2021. Disponível em: <https://ssrn.com/abstract=3084011>.

PICCOLI, L. et al. Proposta de automatização de pagamento do concreto de paredes moldadas in loco integrando BIM e blockchain. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO (SBTIC), 4., 2023. **Anais** [...]. [S.I.]: ANTAC, 2023. p. 1–12.

QING, L.; YU-LIU, C. **Modeling and analysis of enterprise and information systems**. Beijing: Higher Education Press, 2009.

QURESHI, A. H. et al. Factors affecting the implementation of automated progress monitoring of rebar using vision-based technologies. **Construction Innovation**, v. 22, p. 547–563, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1108/CI-09-2021-0177>.

RAMACHANDRA, T.; ROTIMI, J. O. B. Mitigating payment problems in the construction industry through analysis of construction payment disputes. **Journal of Legal Affairs and Dispute Resolution in Engineering and Construction**, v. 7, n. 1, p. A4514005, 2014. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)LA.1943-4170.0000156](https://doi.org/10.1061/(ASCE)LA.1943-4170.0000156).

RAMACHANDRA, T.; ROTIMI, J. O. B. The nature of payment problems in the New Zealand construction industry. **Journal of Construction Economics and Building**, v. 11, n. 2, p. 22–33, 2011. DOI: <https://doi.org/10.5130/ajceb.v11i2.2171>.

RASKIN, M. **The law and legality of smart contracts**. Georgetown Law Technology Review, v. 1, 2017. Disponível em: <https://perma.cc/673G-3ANE>.

RIBEIRO, C. D. **Um gerador de transações voltado para o modelo entidade-relacionamento**. 1992. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas e Computação) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1992. 119 f.

SAMBASIVAN, M.; SOON, Y. W. Causes and effects of delays in Malaysian construction industry. **International Journal of Project Management**, v. 25, n. 5, p. 517–526, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2006.11.007>.

SANTOS, P. H. **Diagrama ER é uma ferramenta voltada ao ensino de modelagem de dados**. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciências da Computação) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017. 44 f.

SAWHNEY, A.; ODEH, I. S. **Digital ecosystems in the construction industry – current state and future trends**. In: SAWHNEY, A.; RILEY, M.; IRIZARRY, J. (ed.). Construction 4.0: an innovation platform for the built environment. New York: Routledge – Taylor & Francis Group, 2020. p. 23–47.

SCREMIN, A. M. **Sistemas de redes peer to peer**. [S.l.: s.n.], 2007. v. 1, p. 1–19.

SHEMOV, G.; GARCIA DE SOTO, B.; ALKHZAIMI, H. Blockchain applied to the construction supply chain: a case study with threat model. **Frontiers of Engineering Management**, v. 7, p. 547–563, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/S4252A-020-0129-X>.

SHI, M. et al. Using blockchain technology to implement peer-to-peer network in construction industry. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTING IN CIVIL AND BUILDING ENGINEERING (ICCCBE), 18., 2020. **Proceedings** [...]. Cham: Springer, 2021. p. 839–849. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-51295-8_58.

SHOJAEI, A. et al. Enabling a circular economy in the built environment sector through blockchain technology. **Journal of Cleaner Production**, v. 294, art. 126352, 2021.

SIGALOV, K. et al. Automated payment and contract management in the construction industry by integrating building information modeling and blockchain-based smart contracts. **Applied Sciences**, v. 11, n. 16, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11167653>.

SONMEZ, R.; AHMADISHEYKSARMAST, S.; GÜNGÖR, AA. Contrato inteligente integrado ao BIM para administração de pagamentos de progresso em projetos de construção. **Automation in Construction**, v. 139, 2022. Disponível em:<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580522001674>. Acesso em: 11 mar. 2025. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104294.

TURK, Ž.; KLINC, R. Potential of blockchain technology for construction management. **Procedia Engineering**, v. 196, p. 638–645, 2017. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.08.052.

ULRICH, F. **Bitcoin: a moeda na era digital**. São Paulo: Instituto Ludwig von Mises Brasil, 2014.

VAN AKEN, J. E.; ROMME, G. Reinventing the future: adding design science to the repertoire of organization and management studies. **Organization Management Journal**, v. 6, p. 5–12, 2009.

VACANAS, Y. et al. The combined use of building information modelling (BIM) and unmanned aerial vehicle (UAV) technologies for the 3D illustration of the progress of works in infrastructure construction projects. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON REMOTE SENSING AND GEOINFORMATION OF THE ENVIRONMENT, 4., 2016. **Proceedings** [...]. [S.I.: s.n.], 2016. DOI: <https://doi.org/10.11117/12.2252605>.

VIEIRA, E. **Cartilha do fornecedor: fornecedor entenda o fluxo da sua nota fiscal**. Belo Horizonte: MRV, 2017.

WANG, J. et al. The outlook of blockchain technology for construction engineering management. **Frontiers of Engineering Management**, v. 4, p. 67–75, 2017. DOI: <https://doi.org/10.15302/J-FEM-2017006>.

WANG, Z.; WANG, T.; HU, H. Blockchain-based framework for improving supply chain traceability and information sharing in precast construction. **Automation in Construction**, v. 111, p. 103063, 2020.

WU, L. et al. Linking permissioned blockchain to Internet of Things (IoT)-BIM platform for off-site production management in modular construction. **Computers in Industry**, v. 135, p. 103573, 2022.

XU, X.; WEBER, I.; STAPLES, M. **Architecture for blockchain applications**. Berlin: Springer International Publishing, 2019.

XUE, F. et al. Linking radio-frequency identification to building information modeling: status quo, development trajectory and guidelines for practitioners. **Automation in Construction**, v. 93, p. 241–251, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.023>.

XUE, F.; WU, L.; LU, W. Semantic enrichment of building and city information models: a ten-year review. **Advanced Engineering Informatics**, v. 47, p. 101245, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101245>.

YAGA, D.; MELL, P.; ROBY, N.; SCARFONE, K. **Blockchain technology overview**. NIST Technical Report NIST IR 8202. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2018.

YANG, R. et al. Public and private blockchain in construction business process and information integration. **Automation in Construction**, v. 118, p. 103276, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103276>.

YE, X.; KONIG, M. Framework for automated billing in the construction industry using BIM and smart contracts. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTING IN CIVIL AND BUILDING ENGINEERING (ICCCBE), 2021. **Proceedings** [...]. Cham: Springer, 2021. p. 824–838. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-51295-8_57.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

ZHANG, L.; LI, F. Risk/reward compensation model for integrated project delivery. **Engineering Economics**, v. 25, n. 5, p. 558–567, 2014. DOI: <https://doi.org/10.5755/j01.ee.25.5.3733>.

ZHENG, Z. et al. Blockchain challenges and opportunities: a survey. **International Journal of Web and Grid Services**, v. 14, p. 352–375, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJWGS.2018.095647>.

ZHENG, Z. et al. An overview of blockchain technology: architecture, consensus, and future trends. In: IEEE INTERNATIONAL CONGRESS ON BIG DATA (BIGDATA CONGRESS), 2017. **Proceedings** [...]. [S.l.: s.n.], 2017. p. 557–564.

Apêndice A – Formulário para avaliação do fluxo de pagamento

Perfil do entrevistado

Cargo/ Função na empresa:

Tempo de experiência no cargo atual:

Formação:

Perfil da empresa:

Maturidade digital

1. A empresa utiliza o BIM?

2. Em qual fase da construção?

Recebimento do concreto

3. Qual o procedimento que a empresa adota para o recebimento do concreto?

4. Fluxo (se sim e se não)

5. Quais pessoas são envolvidas no processo?

6. Quais são os documentos relacionados ao recebimento do concreto?

7. Há uso de Tecnologias? Quais?

8. Quais são os principais desafios no processo atual de recebimento do concreto?

9. O que acontece quando o concreto não atende o que foi contratado?

Pagamento do concreto

10. Como é realizado o pagamento do concreto?

11. Como é realizado o pagamento do terceirizado que aplica o concreto?

12. Quais são os principais desafios?

13. Quais são os principais problemas que ocorrem que geram atraso no pagamento?

14. Quais são os documentos relacionados ao pagamento do concreto?

15. Qual o procedimento quando o serviço não é ocorrido como esperado?

16. É verificada a qualidade do serviço?

Rastreamento do concreto

17. Quais são os documentos relacionados ao rastreamento do concreto?

18. Existe um procedimento para rastreamento do concreto depois que foi utilizado?

Apêndice B – Formulário da avaliação do protótipo

Avaliação do protótipo BIMLedger

O objetivo deste questionário é avaliar o artefato desenvolvido em pesquisa de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal da Bahia. Com sua participação na pesquisa, você estará exposto a riscos mínimos e seu anonimato fica assegurado. Sua participação é voluntária e você terá a liberdade de se recusar a responder quaisquer perguntas que lhe ocasionem constrangimento de alguma natureza.

Você também poderá desistir da pesquisa a qualquer momento, sem que a recusa ou a desistência lhe acarrete qualquer prejuízo, bem como, terá livre acesso aos resultados do estudo e garantido esclarecimento antes, durante e após a pesquisa.

Pesquisador Responsável: Matheus Gomes Martins

E-mail: matheus.engmartins@gmail.com

O tempo estimado para o preenchimento do questionário é de 5 minutos

Serão garantidos o anonimato e o sigilo das informações, além da utilização dos resultados exclusivamente para fins científicos.

Perfil do Participante da entrevista

1. Qual é o seu nome completo? *

2. Qual a sua formação acadêmica? *

a)

b) Engenharia Civil

c) Arquitetura e

Urbanismo

d) Administração

Outro:

3. Qual é o cargo que você ocupa atualmente? * Gerente de contratos; Engenheiro (a) de Obra, etc.

4. Há quanto tempo atua no seu cargo atual? *

- a) Menos de 5 anos.
- b) Entre 5 e 10 anos.
- c) Entre 10 e 15 anos
- d) Mais de 15 anos

Termo BIM

5. Você tem familiaridade com o termo BIM? *

Sim (Passe para a seção 7)

Não (Passe para a próxima seção)

Explicação BIM

Os termos usados com maior frequência para o BIM são Modelo da Informação da Construção e Modelagem da Informação da Construção (Eastman *et al.*, 2011). BIM é um termo empregado para se referir a uma série de tecnologias e trabalhos associados utilizados para descrever e gerenciar informações utilizadas e produzidas para o processo de projeto, construção e operação de obras. O BIM tornou-se um mecanismo que permite a todas as partes interessadas gerar, compartilhar, trocar, e gerenciar informações ao longo do ciclo de vida do projeto, remodelando o cenário da construção desde o projeto até a manutenção. Ao otimizar a infraestrutura técnica existente o BIM capacita às equipes de construção e projeto (Motawa; Almarshad, 2013).

6. Após a explicação do termo, você consegue entender o contexto do BIM? *

Sim

Não

Termo Blockchain

7. Você tem familiaridade com o termo Blockchain? *

Sim (Passe para a seção 9)

Não (Passe para a próxima seção)

Explicação Blockchain

Blockchain é uma tecnologia que representa um livro razão distribuído, possuindo diversos benefícios no que diz respeito à segurança de dados, como autonomia, transparência, imutabilidade, auditabilidade e eficiência na gestão (Brandín; Abrishami, 2021). Pode aumentar efetivamente a confiabilidade dos dados e automação de diversos processos, como pagamentos e gerenciamento de informações. A tecnologia Blockchain funciona através da criação de contratos inteligentes, acordos digitais auto executáveis que podem verificar e aprovar transações quando protocolos específicos são atendidos (Brandín; Abrishami, 2021).

8. Após a explicação do termo, você consegue entender o conceito de Blockchain? *

Sim

Não

Critérios de Avaliação do BIMLedger

Indique, segundo a sua percepção, o nível de concordância com as seguintes afirmações sobre o protótipo proposto.

Utilidade

Visa avaliar se a solução proposta funciona ou proporciona uma melhoria

9. A relação custo benefício do BIMLedger é satisfatória. *

Concordo totalmente

Concordo

Neutro

Discordo

Discorda totalmente

10. É necessário a integração do BIMLedger com outros sistemas da empresa. *

Concordo totalmente

Concordo

Neutro

Discordo

Discorda totalmente

11. O BIMLedger é adequado às necessidades da empresa referente ao pagamento do sistema de parede de concreto*.

Concordo totalmente

Concordo

Neutro

Discordo

Discorda totalmente

12. O BIMLedger auxilia positivamente no rastreamento do concreto. *

Concordo totalmente

Concordo

Neutro

Discordo

Discorda totalmente

13. O BIMLedger auxilia positivamente no rastreamento e pagamento de notas fiscais dentro da empresa. *

Concordo totalmente

Concordo

Neutro

Discordo

Discorda totalmente

14. O BIMLedger tem o potencial de reduzir o tempo do processo de pagamento do sistema de parede de concreto. *

Concordo totalmente

Concordo

Neutro

Discordo

Discordo totalmente

Usabilidade

Veja a facilidade de uso em relação ao layout do protótipo

15. A interface do BIMLedger é amigável. *

Concordo totalmente

Concordo

Neutro

Discordo

Discorda totalmente

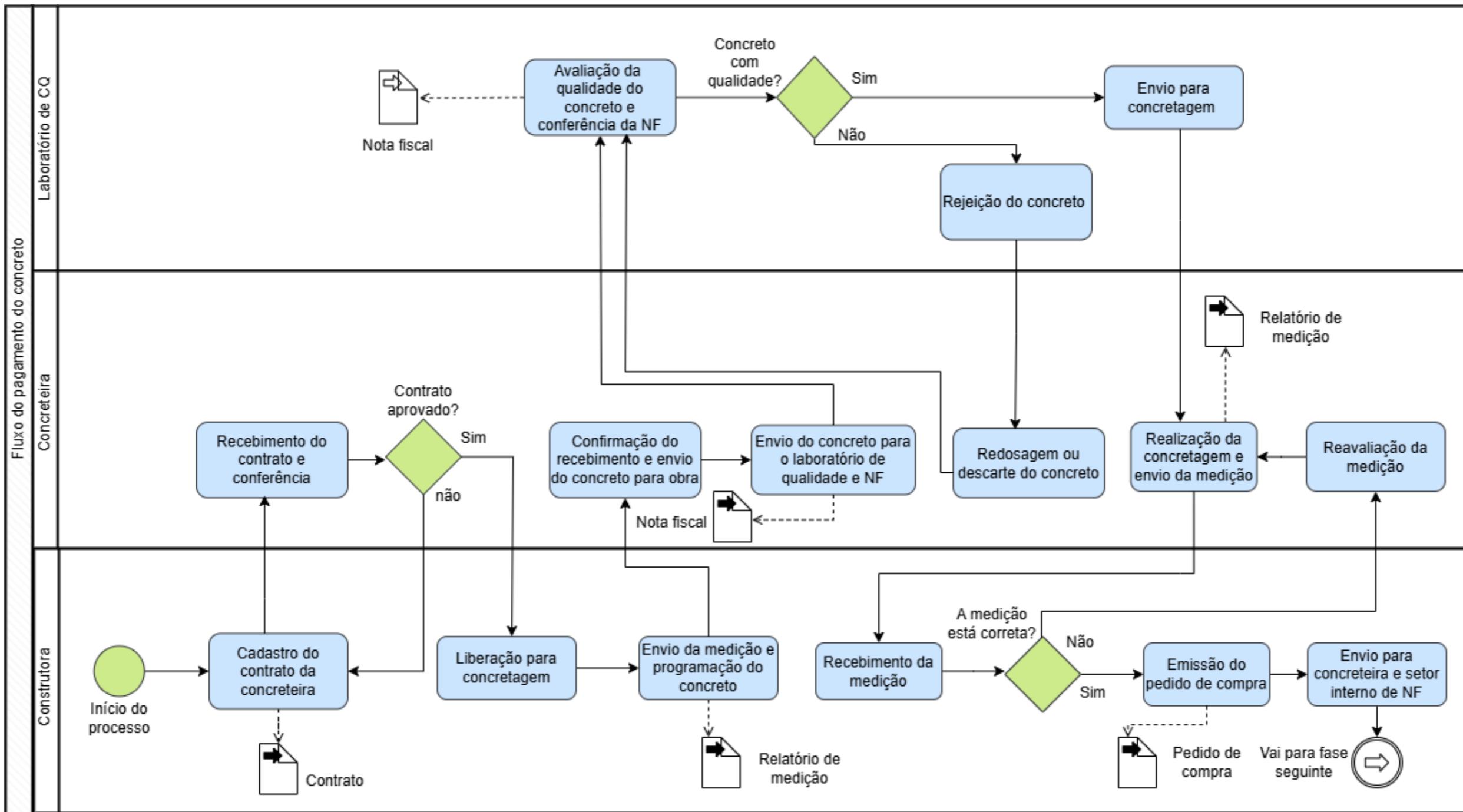
Manifestação Livre

16. Aponte as principais limitações que você enxerga do protótipo *

Para enviar suas respostas e concluir o questionário, por favor, clique no botão "Submit".

Apêndice C – Fluxo de pagamento do concreto

Figura 47 – Diagrama BPMN (AS-IS) atualizado do fluxo de pagamento de concreto



Adaptado de Piccoli et al., (2023)

Apêndice D – Criação dos parâmetros de identidade

Para inserir os parâmetros de identidade no modelo BIM utilizando o Autodesk Revit 2025 foram seguidos os procedimentos descritos a seguir:

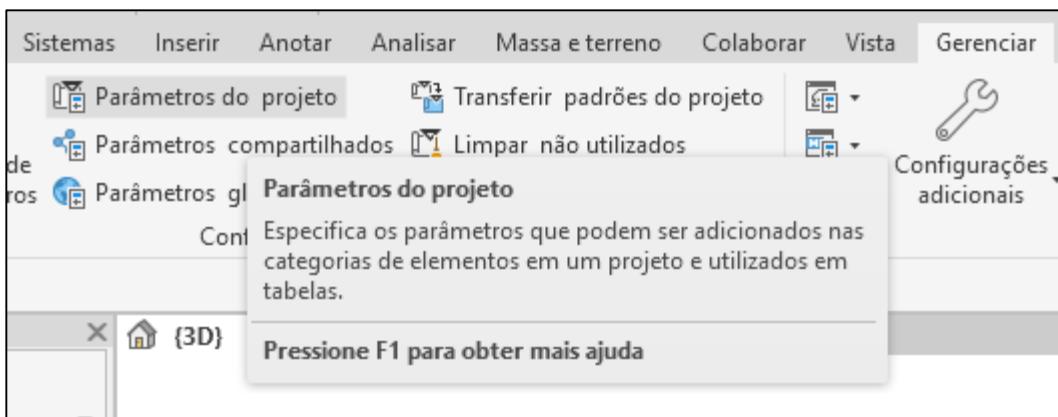
Acesso à aba “Gerenciar”

Acessa-se a aba "Gerenciar" no menu superior do Revit.

Clica-se na opção "Parâmetros do projeto" conforme ilustrado na Figura 48.

Essa funcionalidade permite a criação de parâmetros personalizados que podem ser atribuídos a categorias específicas de elementos no modelo.

Figura 48 – Aba Gerenciar no Revit



Fonte: O autor (2025).

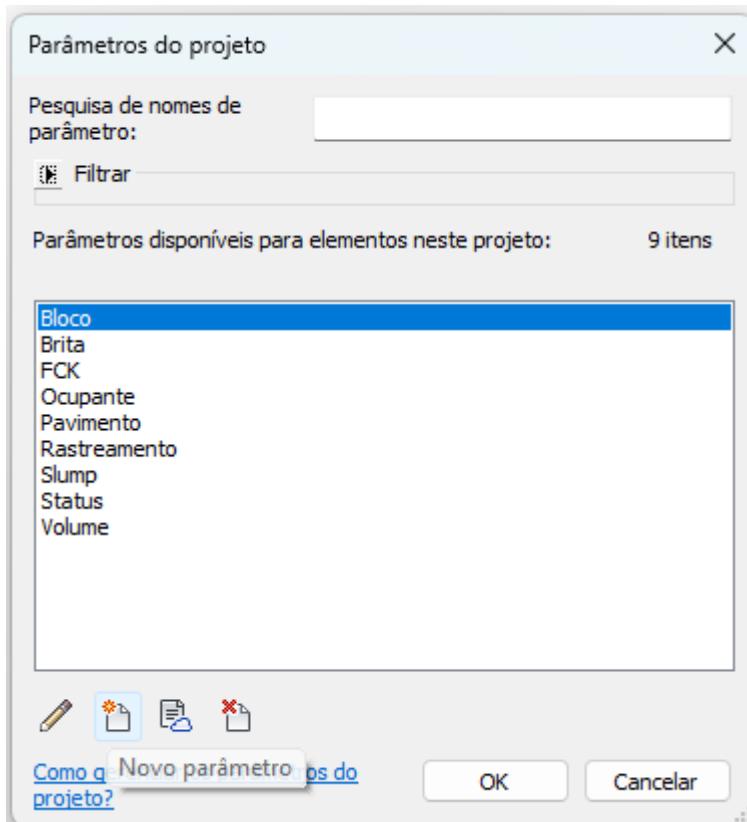
Visualização dos parâmetros existentes

Logo em seguida abre-se a janela "Parâmetros do projeto" como ilustrado na Figura 49.

Nessa janela, estão listados os parâmetros já inseridos no projeto, como: número do bloco e pavimento, tipo de brita, fck, Status entre outros.

Para adicionar um novo parâmetro, clica-se no ícone de nova folha com uma estrela (canto inferior esquerdo da janela).

Figura 49 – Janela de Parâmetros do projeto



Fonte: O autor (2025).

Configuração do novo parâmetro

A janela "Propriedades de parâmetros" é exibida como ilustra a Figura 50.

Tipo de parâmetro: Seleciona-se "Parâmetro de projeto".

Nome: Foi definido o nome do parâmetro (exemplo: "Rastreamento", "Status", etc.).

Disciplina: Foi selecionada a disciplina (geralmente "Comum").

Tipo de dados: Foi selecionado o tipo de dado adequado, como "Texto", "Sim/Não", "Número inteiro", etc.

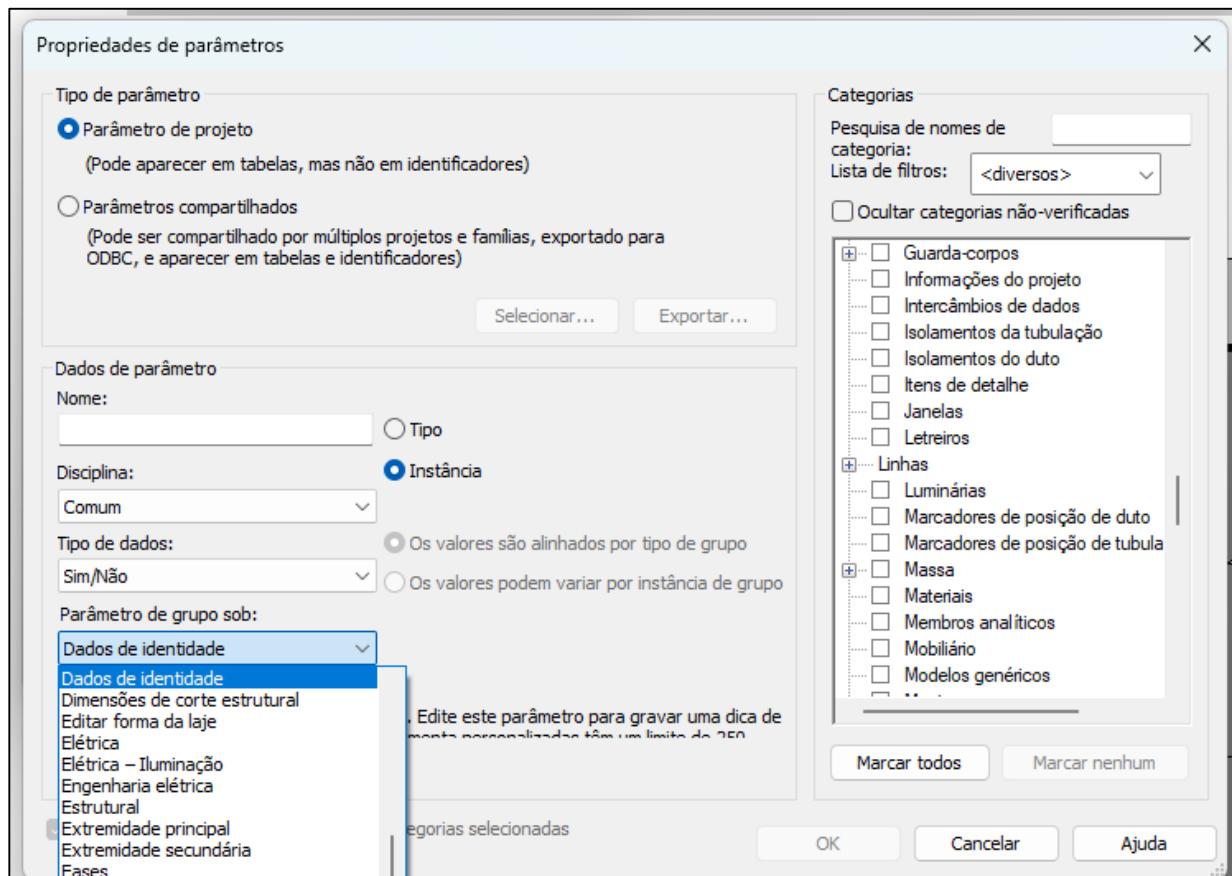
Instância ou Tipo: Foi marcada a opção "Instância" se quiser que o valor seja diferente para cada elemento.

Parâmetro de grupo sob: Foi selecionada "Dados de identidade", agrupando os parâmetros para facilitar a organização.

Categorias: Foram marcadas as categorias de elementos do projeto às quais o parâmetro se aplicará (por exemplo, Paredes, Portas, etc.).

Foi selecionado o OK para confirmar a criação do parâmetro.

Figura 50 – Janela de propriedades de parâmetros



Fonte: O autor (2025).

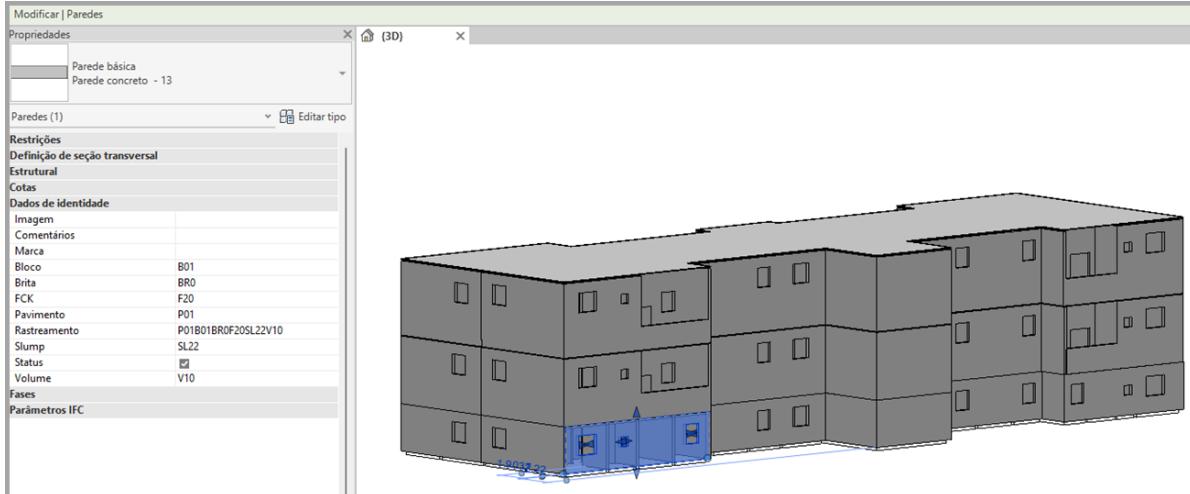
Atribuição dos parâmetros aos elementos

Com os parâmetros criados e aplicados às categorias desejadas, seleciona-se um elemento do modelo como ilustra a Figura 51. No Painel de Propriedades, na seção "Dados de identidade", foram inseridos os valores correspondentes a cada parâmetro criado. Exemplo:

- Bloco: B01
- Brita: BR0
- FCK: F20
- Slump: SL22
- Volume: V10

- Status: Marcado (✓)
- Rastreamento: P01B01BR0F20SL22V10

Figura 51 – Parâmetros inseridos no elemento do modelo BIM



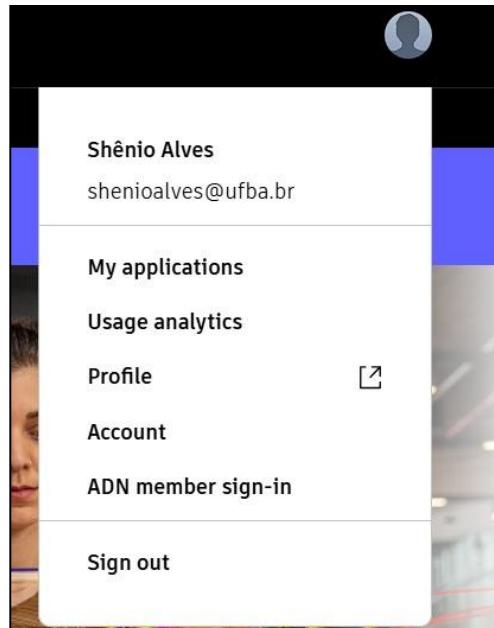
Fonte: O autor (2025).

Apêndice E – Criação do modelo BIM derivado

Criar aplicação na Autodesk Platform Services

1. Acessa-se o portal do APS e selecionar a opção “*My Applications*” conforme ilustrado na Figura 52;
2. Clique em “*Create application*” como ilustrado na Figura 53;
3. Nomeie a aplicação (exemplo: bim-ledger).

Figura 52 – Opção *My Applications* no portal da APS



Fonte: O autor (2025).

Figura 53 – Janela de criação da aplicação.

My applications		
Name	Owner	Created On
bim-ledger	Shênio Alves (you)	Mar 10, 2025
bom	Shênio Alves (you)	Mar 28, 2025

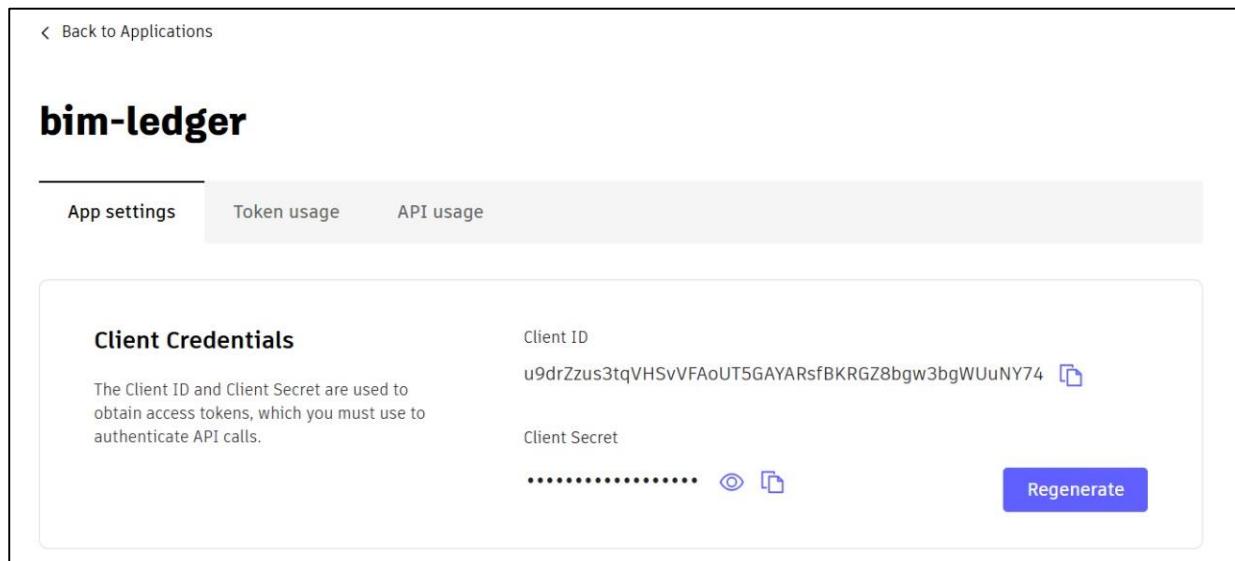
Create application

Fonte: O autor (2025).

Obter as credenciais (*Client ID* e *Secret*)

1. Acessa-se a aplicação criada;
2. Seleciona-se a aba *App settings*. Copia-se o *Client ID* e *Client Secret*, é importante salvar em um local seguro, pois serão usados para autenticação nas chamadas de API conforme ilustrado na Figura 54.

Figura 54 – Janela de configurações da aplicação



Fonte: O autor (2025).

Clonar repositório do visualizador

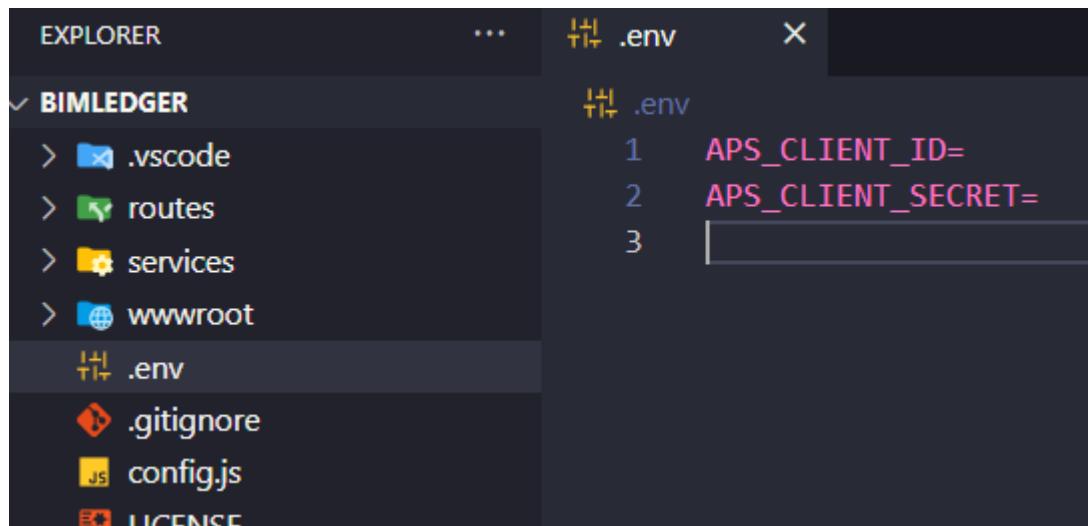
1. Deve-se clonar a API oficial do visualizador simples da APS no GitHub usando o seguinte comando: `git clone https://github.com/autodesk-platform-services/aps-simple-viewer-nodejs`.

Criar o arquivo de credenciais (.env)

1. Crie um arquivo chamado `.env` como ilustrado na Figura 55 na raiz do projeto. Dentro dele, inserem-se suas credenciais, substituindo os espaços reservados, como no exemplo abaixo:
 - `APS_CLIENT_ID=<seu-client-id>`

- `APS_CLIENT_SECRET=<seu-client-secret>`

Figura 55 – Comando .env



Fonte: O autor (2025).

Executar o projeto localmente

1. No terminal, navega-se até a pasta do projeto clonado;
2. Executa-se o comando “`npm start`” e abre-se no navegador o seguinte link “`http://localhost:8080`” e já poderá ver o sistema funcionando;
3. O servidor será iniciado na porta (8080) como ilustrado na Figura 56.

Figura 56 – Execução do comando `npm start`

```

PROBLEMS   OUTPUT   DEBUG CONSOLE   TERMINAL   PORTS
PS C:\Users\sheni\Documents\Projects\BIMLedger\bimledger> npm start
> aps-simple-viewer-nodejs@1.0.0 start
> node server.js

Server listening on port 8080...

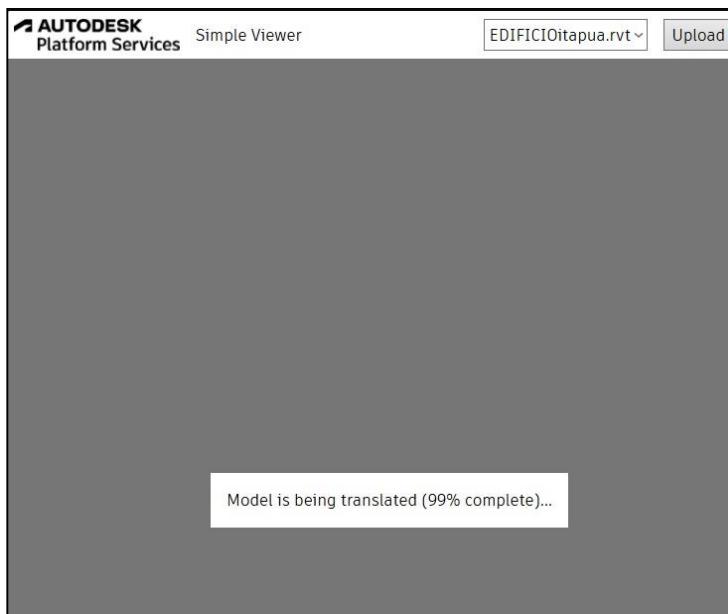
```

Fonte: O autor (2025).

Fazer upload do modelo BIM no Revit

1. Acessa-se o navegador e dirige-se até “<http://localhost:8080>.”
2. Utiliza-se o botão **Upload** no canto superior direito para enviar o arquivo (rvt) do Revit conforme ilustrado na Figura 57.
3. O modelo será convertido automaticamente (tradução de dados para visualização 3D).

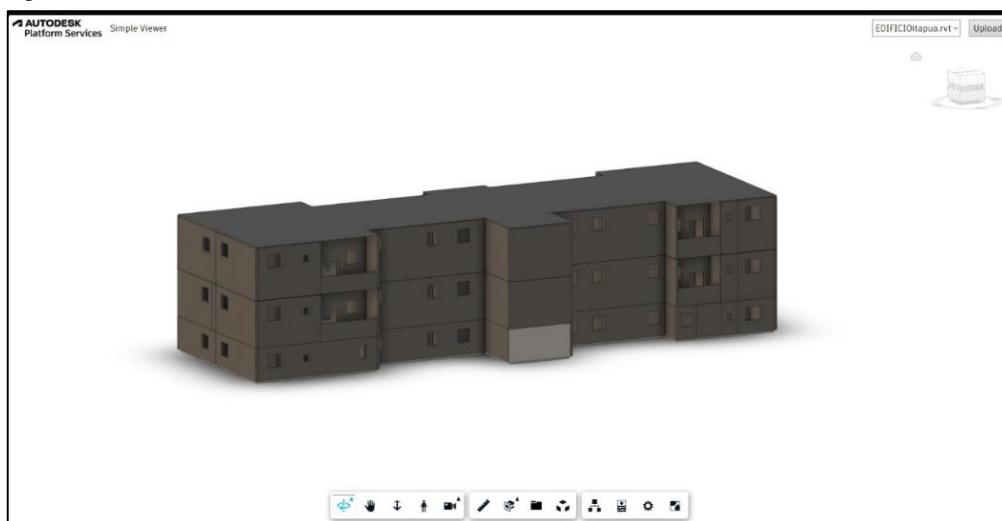
Figura 57 – Janela de apresentação da tradução do modelo BIM



Fonte: O autor (2025).

4. O resultado da tradução é o modelo BIM derivado conforme ilustrado na Figura 58.

Figura 58 – Modelo BIM derivado



Fonte: O autor (2025).

Foram utilizadas quatro APIs da Autodesk Platform Service no presente estudo, conforme é descrito em seguida:

- **Autenticação:** o Autodesk Platform Service utiliza o protocolo Oauth2. Esta API foi empregada nos processos de autenticação entre o cliente (aplicação) e o servidor.

- **Gerenciamento de Dados:** esta API é responsável por armazenar e gerenciar os arquivos do aplicativo no Autodesk Platform Service através de contêineres (arquivos recipientes que contém outros arquivos) denominados na plataforma como "*Buckets*", que estão associados à Nuvem da Autodesk. A criação de um novo *Bucket* foi à primeira ação necessária para fazer o *upload* do arquivo com extensão RVT.

- **Derivação do Modelo:** esta API é utilizada para traduzir o formato RVT para o formato SVF, que é o formato final do modelo derivado. O processo inclui a extração dos metadados originais e mantém a hierarquia de objetos e propriedades provenientes do Revit como, por exemplo, materiais, densidade, volume e os parâmetros de rastreamento e status inseridos.

- **Visualizador:** esta API é uma biblioteca Java Script baseada em WebGL para renderizar modelos 2D e 3D, conectada diretamente à API de Derivação do Modelo. Ela é utilizada para a efetiva visualização gráfica do modelo derivado e de suas informações associadas. Ela também foi utilizada no desenvolvimento de extensões e funções para customizar a visualização conforme as demandas deste estudo. Para habilitar a Visualização é preciso utilizar o identificador único do modelo, que é o URN.

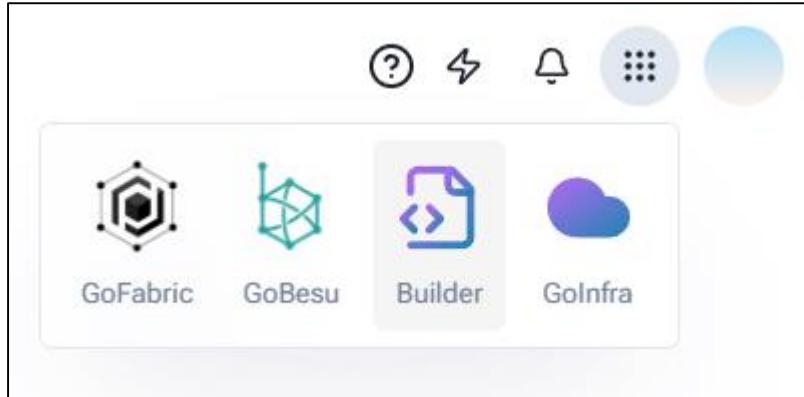
Dessa maneira, o modelo RVT foi carregado na Nuvem da Autodesk e passou a ser gerenciado por meio da API de Gerenciamento de Dados. Em seguida, utilizando uma API de Derivação do Modelo, o arquivo foi convertido para o formato SVF, necessário para o processo de renderização do Visualizador, que opera exclusivamente com esse tipo de arquivo. O Visualizador, componente final do Autodesk Platform Service, permite acessar visualizações em 2D e 3D, tanto localmente quanto na web, além de consultar as informações extraídas pela API de Derivação do Modelo.

Apêndice F – Criação do contrato inteligente

Processo de compilação e preparação (*builder*) do contrato inteligente (*chaincode*).

Na plataforma GoFabric foi selecionado a opção *Builder* como ilustrado na Figura 59

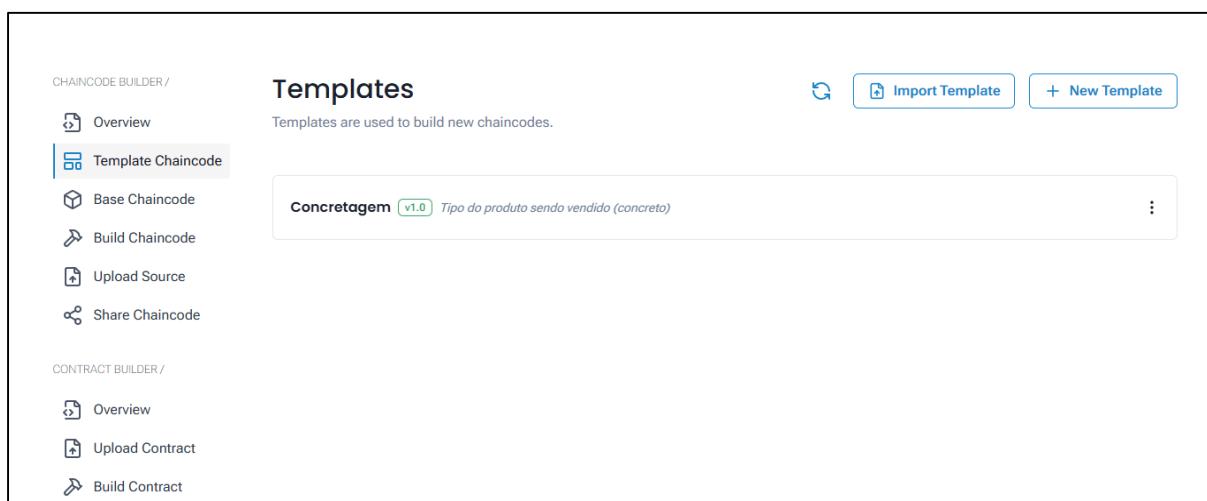
Figura 59 – Opção Builder



Fonte: O auto, (2025).

Em “*Template chaincode*” foi selecionado “*New Template*” como ilustrado na Figura 60.

Figura 60 – Opção *New Template*



Fonte: O autor (2025).

Foi atribuído o nome do *Template*, versão e uma descrição a Figura 61 ilustra as opções a serem inseridas.

Figura 61 – Opções do *Template*

The screenshot shows a web-based application for creating a chaincode template. At the top, there's a header with the title 'Build Template Chaincode' and a sub-instruction 'Create a new template to use when building chaincodes.' Below the header, there are two main sections: 'Template Details' (step 1) and 'Add Assets' (step 2). Step 1 is currently active, indicated by a red circle around the number 1. Step 2 is indicated by a red circle around the number 2. The 'Template Details' section contains fields for 'Name *' (with placeholder 'Name') and 'Version *' (with placeholder 'e.g. 1.0'). It also has a 'Description *' field with placeholder 'Description...'. A 'Next →' button is located at the bottom right of this section.

Fonte: O autor (2025).

Como adicionar um novo Asset:

Na seção "Assets" à esquerda, foi selecionado o botão verde com o símbolo de mais (+) para adicionar um novo Asset à lista.

Preencher os Detalhes do Asset

No formulário principal "Asset Details", foi preenchido os campos obrigatórios como ilustrado na Figura 62:

- **Label:** Foi dado um nome ao seu Asset.
- **Tag:** Foi atribuído uma tag para identificação.
- **Description:** Foi escrita uma breve descrição sobre o Asset.

Adicionar Propriedades ao Asset:

Foi selecionado o ícone de mais (+) ao lado de "Asset Properties" para adicionar uma nova propriedade.

Para cada propriedade, foi realizada as seguintes configurações:

- **Label e Tag:** Nome e tag da propriedade.
- **Data Type:** Selecione o tipo de dado (exemplo: texto, número, data).
- **Constraints:** Foram marcadas as caixas de seleção conforme necessário para definir regras como "Is Key" (É Chave), "Read only" (Apenas Leitura) ou "Is Required" (É Obrigatório).

Figura 62 – Preenchimento das informações dos Assets

The screenshot shows the configuration interface for a template. At the top left is a 'Template Details' section with a checkmark icon and a 'Name your template and describe it' input field. To its right is an 'Add Assets' section with a 'Add assets to your template' input field. Below these are two main sections: 'Assets' and 'Asset Details'.

Assets: This section displays a single asset named 'Untitled Asset' with the note 'No description'. It includes a 'Description' input field containing 'Description' and a green '+' button for adding more assets.

Asset Details: This section is titled 'Describe your asset and add Properties to it'. It contains fields for 'Label *' (labeled 'Label') and 'Tag *' (labeled 'Tag'). Below these are 'Description *' fields for 'Description' and 'Notes'. A 'Description' input field is also present.

Asset Properties: This section is titled 'Add properties to your asset. You can add as many properties as you need.' It includes a 'Label *' field ('label...'), a 'Tag *' field ('tag...'), and a 'Constraints' section with three checkboxes: 'Is Key', 'Read only', and 'Is Required'. There is also a 'Data Type *' section with a 'Select Data Type' dropdown and an 'Is Array?' toggle switch. A green 'Add Property' button is located at the bottom of this section.

Fonte: O autor (2025).

Neste caso foram criados os Assets necessários para funcionamento do contrato como ilustra a Figura 63.

Figura 63 – Assets criados

The screenshot shows a software interface for managing assets. On the left, there is a list of assets:

- Concreto** (concreto) - Tipo do produto: 2
- Solicitação** (solicitac...) - Serviço: 11
- Concreteira** (concret...) - Empresa: 1
- Construtora** (construt...) - Empresa: 1
- Laboratório** (laborato...) - Empresa: 1
- ValidarQualidade** (validarQ...) - Laboratorio validar qualidade do...: 6
- SolicitarPagamento** (pagame...) - Após serviço de concretagem...: 3

On the right, three asset definitions are displayed in a grid:

Asset Definition	Label *	Tag *	Constraints
Concreto	ID	id	<input checked="" type="checkbox"/> Is Key <input type="checkbox"/> Read only <input checked="" type="checkbox"/> Is Required
Concretoira	Concreto	concreto	<input type="checkbox"/> Is Key <input type="checkbox"/> Read only <input checked="" type="checkbox"/> Is Required
Volume	Volume	volume	<input type="checkbox"/> Is Key <input type="checkbox"/> Read only <input checked="" type="checkbox"/> Is Required

Each row contains fields for Label, Tag, Data Type, and Constraints. The Data Type for each asset is set to "String" and "Is Array?".

Fonte: O autor (2025).

Os Assets criados também podem ser usados como “Data Type” tipo de dado em outro Asset como em “ValidarQualidade” como ilustrado na Figura 64.

Figura 64 – Propriedade do Asset ValidarQualidade

The screenshot shows the 'Assets' section on the left and the 'Asset Properties' configuration on the right.

- NotaFiscal:**
 - Label:** NotaFiscal
 - Tag:** notaFiscal
 - Constraints:** Is Key
 - Data Type:** String
 - Is Array?**:
- Solicitação:**
 - Label:** Solicitação
 - Tag:** solicitacao
 - Constraints:** Is Key
 - Data Type:** [Solicitação](#)
 - Is Array?**:
- Validado:**
 - Label:** Validado
 - Tag:** valido
 - Constraints:** Is Key
 - Data Type:** [Validado](#)
 - Is Array?**:

Fonte: O autor (2025).

Definição das permissões

Após definir os Assets, o próximo passo é definir as funções das organizações. Isso é realizado através da configuração de permissões de acesso para cada organização participante da rede.

As Figura 65,66 e 67 ilustram a configuração das permissões na GoFabric. Ao acessa a opção "Permissions", é especificado qual organização possui permissão para leitura e escrita (criação/alteração) dos dados associados.

Figura 65 – Configuração de permissões ativo concreto

The screenshot shows the 'Permissions' configuration screen for a chaincode named 'teste v1.0'. It displays two asset definitions:

- Asset / Asset**: 'Concreto' (concreto). It has a 'Private data' toggle switch set to off. Under 'Readers', there is a dropdown menu labeled 'Select Organizations...'. Under 'Properties /', there are two sections: 'ID id' and 'Nome nome', both with 'Writers' set to 'All enabled' and a list containing 'concretora'.
- Asset / Asset**: 'Solicitação' (solicitacao). It has a 'Private data' toggle switch set to off. Under 'Readers', there is a dropdown menu labeled 'Select Organizations...'. Under 'Properties /', there are several sections: 'ID id' (Writers: 'All enabled', 'construtora'), 'Concreto' (Writers: 'All enabled', 'construtora'), 'Volume' (Writers: 'All enabled', 'construtora'), 'Brita' (Writers: 'All enabled', 'construtora'), 'FCK' (Writers: 'All enabled', 'construtora'), 'Contratante' (Writers: 'All enabled', 'construtora'), 'Contratado' (Writers: 'All enabled', 'construtora'), and 'Data' (Writers: 'All enabled', 'construtora').

Fonte: O autor (2025).

Figura 66 – Configuração de permissões concreteira, construtora e laboratório

Asset	Nome Empresa	Writers	Private Data
Concreteira	concreteira	concreteira	<input checked="" type="checkbox"/>
Construtora	construtora	construtora	<input checked="" type="checkbox"/>
Laboratório	laboratorio	laboratorio	<input checked="" type="checkbox"/>
ValidarQualidade	validarQualidade	laboratorio	<input checked="" type="checkbox"/>

Properties /

NotaFiscal notaFiscal

Solicitação solicitacao

Validado validado

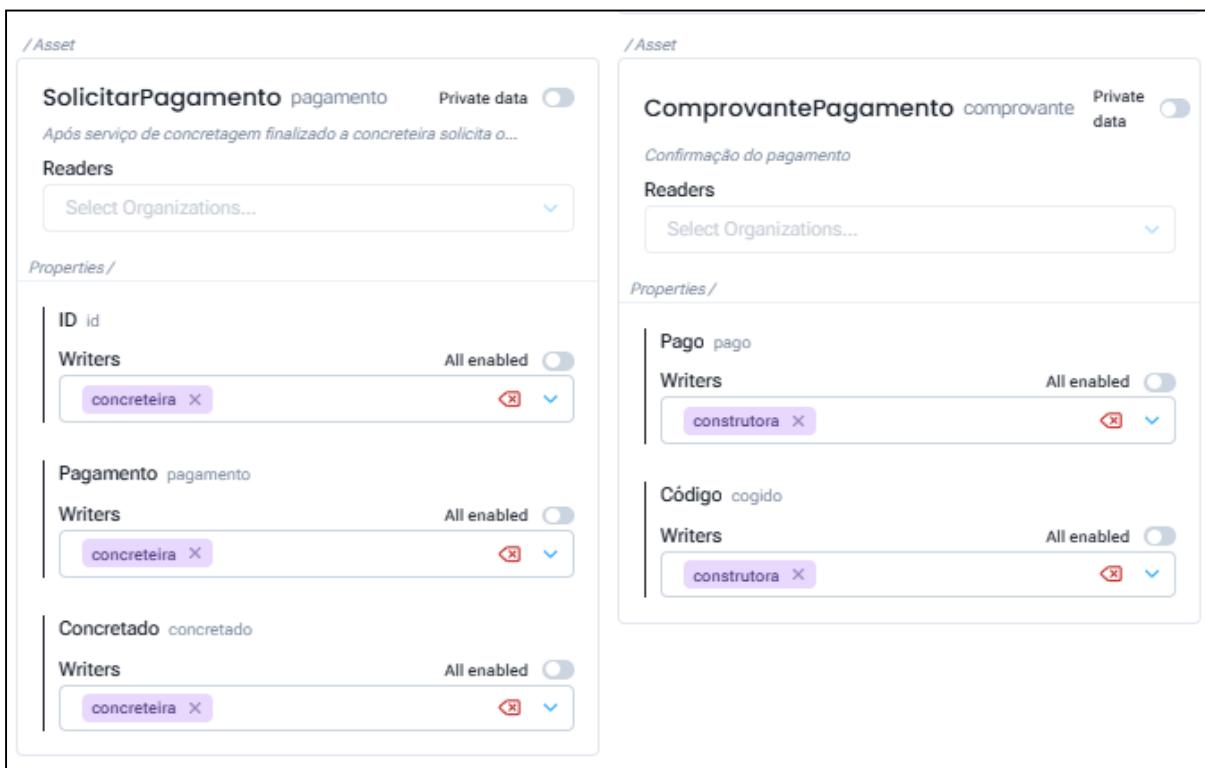
Slump slump

Data data

PlacaCaminhão placa

Fonte: O autor (2025).

Figura 67 – Configuração de permissões ativos de pagamento



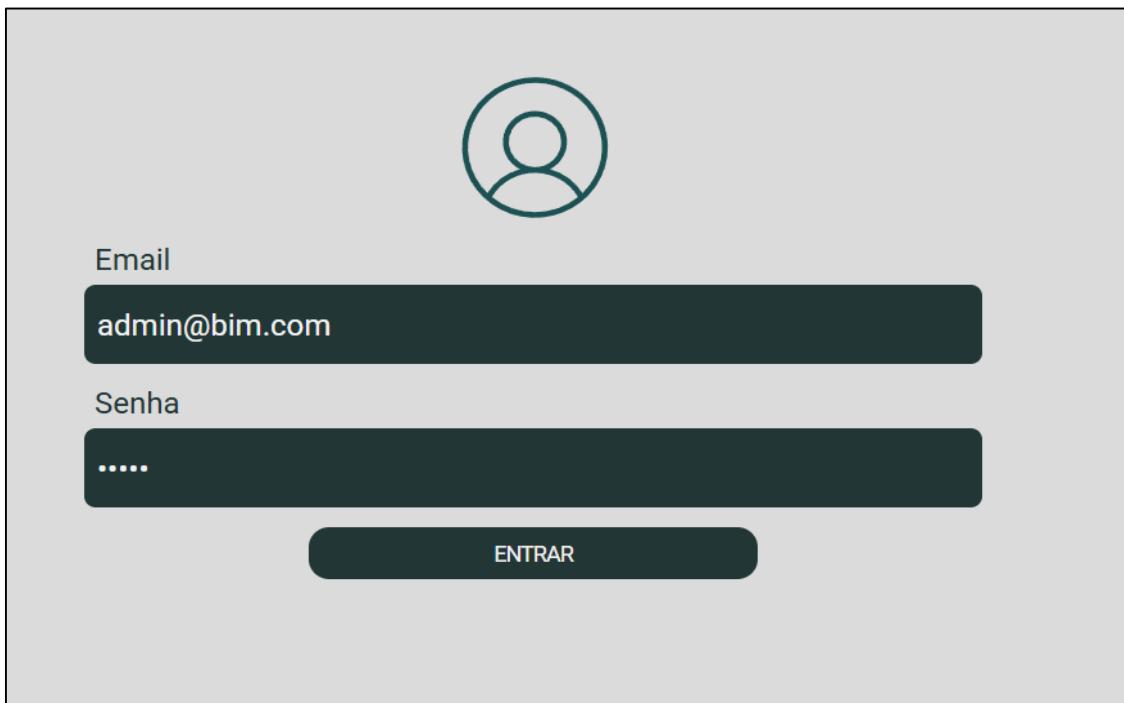
Fonte: O autor (2025).

Apêndice G – Procedimentos de uso do BIMLedger

Acesso ao sistema

Por meio do link <https://bimledger-project.vercel.app/> é possível acessar a página na web que se encontra o BIMLedger, como ilustrado na Figura 68. São utilizados as credencias de *login* e senha para ter acesso ao contrato. O *login* é realizado automaticamente dentro do perfil de usuário da construtora que é administradora do sistema.

Figura 68 – Tela de acesso do usuário



Fonte: O autor (2025).

Entidades

O BIMLedger possui as entidades: Solicitação, Construtora, Comprovante, Pagamento, Concreteira, Especificações do concreto, Laboratório e Validação da qualidade do concreto. Essas entidades representam os principais atores e objetos de informação envolvidos no processo de pagamento e validação do sistema de paredes de concreto moldadas *in loco*.

Cada entidade exerce um papel funcional específico no fluxo de dados e validações, garantindo transparência, rastreabilidade e confiabilidade no processo.

Permissões

No sistema há dois tipos de permissão, que definem o que cada agente pode fazer:

Gerenciamento

- a) Permissão para criar, editar, deletar e ler entidades

2. Leitura

- b) Permissão para ler entidades

Agentes

Antes de iniciar o uso do sistema, é importante salientar que ele é estruturado sobre três agentes:

1. Construtora

Responsável por gerenciar Solicitações, Construtoras e Comprovantes.

2. Concreteira

Responsável por gerenciar Pagamentos, Concreteira e Especificações do Concreto.

3. Laboratório

Responsável por gerenciar Laboratórios e Validações de Qualidade.

Todos os agentes possuem permissão de leitura para todos as entidades.

Alternância entre agentes

Ao clicar no menu localizado no canto superior direito da tela, encontra-se essas três barras horizontais como ilustrado na Figura 69.

Figura 69 – Menu para seleção de agentes do BIMLedger



Fonte: O autor (2025).

Logo em seguida, abre-se o menu “Mudar Agente” e com isso, é possível selecionar o agente desejado como ilustrado na Figura 70.

Figura 70 – Menu mudar agente com opções



Fonte: O autor (2025).

Agente Construtora

Primeiramente se faz necessário cadastrar uma construtora dentro do BIMLedger para simular uma solicitação de concreto junto à uma concreteira como ilustra a Figura 71.

Figura 71 – Criação de uma construtora

Fonte: O autor (2025).

Para criar uma solicitação, verifica-se se está no agente “Construtora” e após isso, clica-se na opção solicitação, logo após clica-se em “CRIAR” como ilustrado na Figura 72.

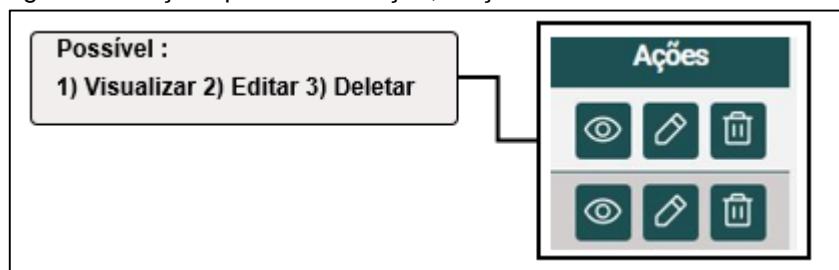
Figura 72 – Botões para criação de uma solicitação de concreto pela construtora



Fonte: O autor (2025).

É possível também realizar a leitura, edição e exclusão de cada solicitação criada na coluna de “ações” como ilustrada na Figura 73.

Figura 73 – Ações para visualização, edição e exclusão de cada solicitação



Fonte: O autor (2025).

Após selecionar o botão de “CRIAR” solicitação abre-se a aba para preenchimento dos requisitos da solicitação do concreto como ilustrado na Figura 74.

Figura 74 – Tela de solicitação do concreto no BIMLedger

The screenshot shows a user interface titled 'CONSTRUTORA' at the top. Below it, a section titled 'Criação - Solicitação' contains various input fields. On the left side, there are four input fields: 'Código' (with a redacted value), 'Volume' (with a redacted value), 'Brita' (with a redacted value), and 'Bloco' (with a redacted value). On the right side, there are three input fields: 'Especificações do Concreto' (with a dropdown menu showing 'Especificações do Concreto'), 'Slump' (with a redacted value), 'FCK' (with a redacted value), and 'Pavimento' (with a redacted value). Below these, there are two dropdown menus: 'Contratante' (with 'Contratante' selected) and 'Contratado' (with 'Contratado' selected). At the bottom, there is a date and time input field labeled 'Data e Hora' with the placeholder 'dd/mm/aaaa :-:' and a 'CRIAR' button.

Fonte: O autor (2025).

Não é possível editar uma construtora, pois seu nome é utilizado como identificador único. Para deletar uma construtora, verifica-se está no agente “Construtora” e clica-se no botão de deletar apresentado anteriormente. Confere-se o nome e confirma a ação.

Agente Concreteira

Logo após da criação de uma construtora, também é necessário cadastrar no sistema um agente concreteira. Para criar uma concreteira, verifica-se se está no agente “Concreteira”. Preenche-se o nome e clica-se novamente em “CRIAR” como ilustrado na Figura 75.

Figura 75 – Criação da concreteira no BIMLedger



Fonte: O autor (2025).

Da mesma forma que a construtora, não é possível editar uma concreteira, pois seu nome é utilizado como identificador único. Para deletar uma concreteira, verifica-se se está no agente “Construtora” e clica-se no botão de deletar apresentado anteriormente. Confere-se o nome e confirma-se a ação.

Criação da Entrega do lote do Concreto

Para criar um lote de concreto que será enviado à construtora, verifique se está no agente “Concreteira” e clique no botão “CRIAR”. Preenche-se os dados e clique em “CRIAR” na segunda tela aberta como ilustrado na Figura 76.

Figura 76 – Criação de um lote para entrega do concreto



Fonte: O autor (2025).

Agente Laboratório

Para simular a avaliação do concreto que ocorre em campo, tem-se a opção de “Criar Validação de Qualidade” pelo Laboratório. No agente Laboratório clica-se no botão “CRIAR” como ilustrado na Figura 77.

Figura 77 – Criação da validação da qualidade do concreto

Gerenciamento - Validar Qualidade						
<input type="text"/> Buscar...						CRIAR
Solicitação	Validado	Slump	Placa	Nota Fiscal	Data	Ações
Criação - Validação de Qualidade						
Solicitação Associada						
SOL50						
Slump da Solicitação: 22						
Validado	Sim	Slump	26			
Placa		Nota Fiscal				
Data e Hora	dd/mm/aaaa --:-					
CRIAR						

Fonte: O autor (2025).

Os dados dados de uma Validação de Qualidade:

- Nome da Solicitação;
- Validado (Sim ou Não);
- Valor do teste de *Slump*;
- Placa do caminhão betoneira;
- Número da Nota Fiscal.

O campo validado diz respeito ao valor do *slump* teste, que para ser validado deve estar em um intervalo de 22 centímetros mais ou menos 3 centímetros. Este valor é utilizado pela Empresa X para análise do concreto em relação ao valor do *slump* da solicitação. Caso valor do *slump* não atenda o intervalo padronizado, a validação do concreto é reprovada e o pagamento não é efetuado.

Solicitação e geração do pagamento

O sistema se encarrega de gerar pagamentos automaticamente quando:

- Há no modelo BIM o pavimento Z;
- Existe uma solicitação X cujo pavimento é Z;
- Esta solicitação X possui uma validação de qualidade Y associada;
- A validação de qualidade Y está com o campo “validado” como “Sim”.

A concreteira realiza uma solicitação de pagamento para a construtora, na aba gerenciamento clica-se no botão referente à solicitação de pagamento e uma solicitação é criada após o preenchimento dos campos como ilustrado na Figura 78.

Figura 78 – Criação da solicitação de pagamento

ID	Nota Fiscal	Concretado	Ações
CR1234	IDH12345	Não	
CR123	IDH1234	Sim	

Anterior Página 1 de 1 Próximo

Criação - Solicitação de Pagamento

Código
[Redacted]

Validação de Qualidade
[Dropdown menu]

Concretado
[Dropdown menu]

Criar

Fonte: O autor (2025).

Para efetuar o pagamento seleciona-se o agente construtora, e clica-se no botão “ATUALIZAR” e daí então é gerado um pagamento via PIX é realizada. Ao clicar em Gerar comprovante, um comprovante é gerado automaticamente em formato PDF com os dados da negociação como ilustrado na Figura 79. O modelo de comprovante de pagamento se encontra no Apêndice I.

Figura 79 – Tela de simulação de pagamento com a geração do comprovante

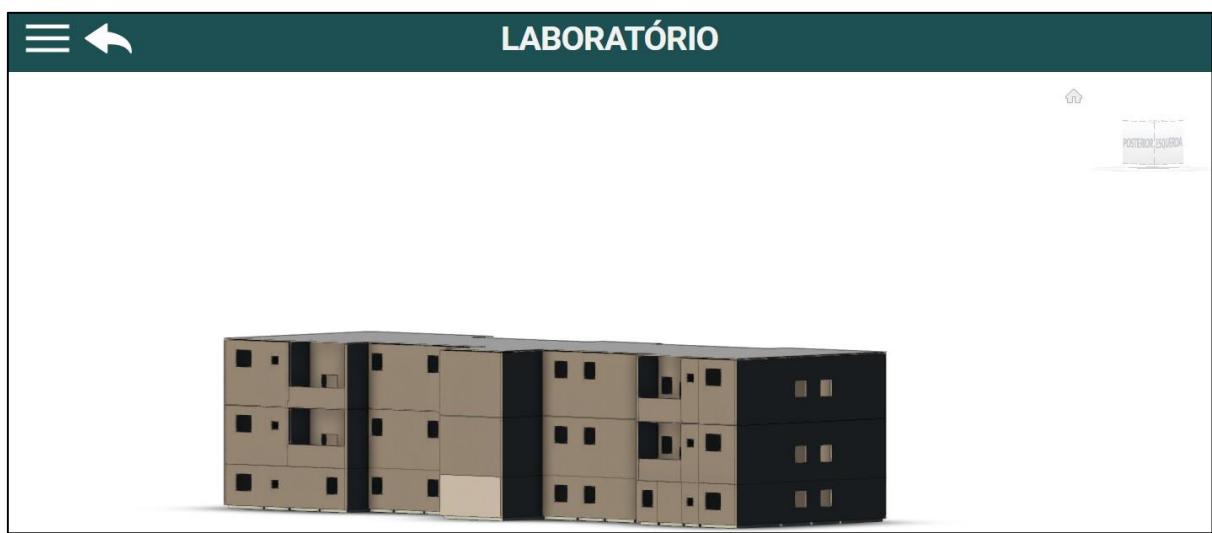


Fonte: O autor (2025).

Visualização do modelo BIM

Esse sistema conta com a visualização do modelo BIM. Para visualizar, acessa-se o menu no canto superior direito e clica-se em “Visualizar Modelo BIM”. Após isso, será possível visualizar e interagir com o modelo como ilustrado na Figura 80. Os agentes têm a permissão de visualizar o modelo dentro do BIMLedger para mostrar a rastreabilidade e transparência das informações.

Figura 80 – Visualização do modelo BIM



Fonte: O autor (2025).

Apêndice H – Criação do *front-end*

Dependências

O projeto conta com bibliotecas que auxiliam no desenvolvimento:

- **Axios:** Utilizado para realizar requisições HTTP, permitindo realizar POSTS, GETS, PUTS e DELETES na API feita na GoFabric
- **React Toastify:** Para exibir notificações *toast* de maneira simples e personalizável.
- **Formik:** Usado para gerenciamento de formulários, simplificando o processo de validação e manipulação dos dados.
- **Yup:** Biblioteca de validação de dados utilizada em conjunto com o Formik para garantir que os dados dos formulários atendam aos requisitos definidos.
- **jsPDF:** Permite a geração de documentos PDF diretamente no navegador, útil para exportar relatórios e outros documentos.
- **PrimeReact:** Biblioteca de componentes UI rica em recursos, que oferece diversos elementos prontos como tabelas, botões, calendários e modais com design moderno.
- **PrimeIcons:** Conjunto de ícones utilizado em conjunto com o PrimeReact para enriquecer visualmente os componentes da interface.
- **React Router DOM:** Responsável pelo roteamento da aplicação, possibilitando a navegação entre diferentes páginas de forma dinâmica e baseada em URL.
- **React Responsive:** Usado para construir interfaces responsivas, adaptando o layout da aplicação com base no tamanho da tela ou tipo de dispositivo.
- **Dotenv:** Permite o carregamento de variáveis de ambiente a partir de um arquivo. env, facilitando a configuração e o gerenciamento de credenciais e *endpoints* sem expô-los diretamente no código.

Estruturas essenciais

Nesta seção, são apresentadas as principais estruturas de código desenvolvidas no front-end, essenciais para o funcionamento do sistema. Dentre os componentes programados, destaca-se o módulo de autenticação, responsável por garantir o acesso seguro à plataforma.

Esse módulo foi desenvolvido para dar suporte ao gerenciamento de agentes, permitindo identificar e controlar os diferentes perfis de usuários cadastrados no sistema. Além disso, a aplicação contempla diferentes tipos de *login*, desenvolvidos para distinguir o perfil de acesso conforme o tipo de agente (Construtora, Concreteira e Laboratório), conforme ilustrado na Figura 81.

Figura 81 – Código para realização do *login*

```
export function loginType(){
    const token = localStorage.getItem("token");
    if (token === `${MOCK_ENV_TOKEN}co`) {
        return "CONCRETEIRA";
    } else if (token === `${MOCK_ENV_TOKEN}la`) {
        return "LABORATÓRIO";
    }else if (token === `${MOCK_ENV_TOKEN}ca`) {
        return "CONSTRUTORA";
    }
    return "BIMLEDGER";
}
```

Fonte: O autor (2025).

Nesse caso, é verificada a *String* armazenada no cookie do usuário, e a partir da resposta, define-se qual é seu agente.

Mudança de Agente

A depender do tipo recebido como parâmetro, o agente é definido. Esse parâmetro é originado a partir da chamada de um dos botões na interface "Mudar Agente". O trecho de código correspondente está ilustrado na Figura 82.

Figura 82 – Código para mudança de agente

```
export function changeType(type){
    type = type.toUpperCase();
    if(type == "CONSTRUTORA"){
        localStorage.setItem("token", `${MOCK_ENV_TOKEN}ca`);
    }else if(type == "LABORATÓRIO"){
        localStorage.setItem("token", `${MOCK_ENV_TOKEN}la`);
    }else if(type == "CONCRETEIRIA"){
        localStorage.setItem("token", `${MOCK_ENV_TOKEN}co`);
    }
}
```

Fonte: O autor (2025).

Login e Verificação de Usuário Logado

A Figura 83 ilustra o código responsável por gerenciar o usuário logado. Caso não exista um *token*, a variável de expiração esteja ausente ou o tempo limite de 24 horas tenha sido excedido, o *token* é invalidado e o usuário é automaticamente desconectado do sistema.

Figura 83 – Código responsável por gerenciar o usuário logado

```
export function isAuthenticated() {
    const token = localStorage.getItem("token");
    const expiration = localStorage.getItem("token_expiration");

    if (
        !token ||
        !expiration ||
        Date.now() > expiration ||
        (token !== `${MOCK_ENV_TOKEN}co` &&
         token !== `${MOCK_ENV_TOKEN}la` &&
         token !== `${MOCK_ENV_TOKEN}ca`)
    ) {
        logout(); // vai expirar o token se necessário
        return false;
    }
    return true;
}
```

Fonte: O autor (2025).

Tabela de Leitura

Foi construída uma tabela de leitura utilizando um componente reutilizável como ilustra a Figura 84, o qual recebe dado e parâmetros que definem os elementos a serem renderizados. Esse componente foi projetado para adaptar a visualização conforme o asset selecionado. Na página de cada asset, é possível verificar quais campos serão exibidos na tabela e quem possui permissão para gerenciar aquele asset.

Figura 84 – Etapa de renderização na tabela de leitura

```
export default function ProofPage() {
  let fields = ["Item Pago", "Código", "Comprovante"];
  let accessArray = ["CONSTRUTORA"];
```

Fonte: O autor (2025).

Foi necessário definir previamente os campos que compõem a tabela. Em seguida, realiza-se uma requisição ao back-end da aplicação para obter os dados essenciais correspondentes àquele conjunto de campos como ilustrado na Figura 85.

Figura 85 – Código para requisição ao back-end

```
let data = {
  query: {
    selector: {
      "@assetType": "comprovante",
    },
    bookmark: "",
  },
  resolve: true,
};

const response = await BaseRequest({
  method: "POST",
  url: "/api/query/search",
  data: data,
  setIsLoading,
});
```

Fonte: O autor (2025).

Com a definição de todos os parâmetros necessários, o componente pode ser chamado para renderizar à tabela de forma dinâmica, conforme as configurações previamente estabelecidas como ilustrado a Figura 86.

Figura 86 – Código para chamado de renderização da

```
<ReadTable
    title={"Comprovante"}
    fields={fields}
    data={data}
    accessArray={accessArray}
    hasActions={true}
    urlNavigate={"/comprovante/criar"}
    isLoading={isLoading}
    params={params}
    functionParam={fetchPayments}
/>
```

Fonte: O autor (2025).

No componente de Leitura de Páginas, são processados os campos e os dados do asset em questão como ilustra a Figura 87. A renderização é realizada de forma condicional, considerando que os campos podem conter diferentes tipos de dados, exigindo tratamentos específicos conforme suas características.

Figura 87 – Trecho do código de processamento dos campos e dados dos Assets

```
{newFields.map((field, index) =>
  <th key={index}>{field ?? "Não Informado"}</th>
)}
</tr>
</thead>
<tbody>
{paginatedData.map((row, rowIndex) =>
  <tr key={rowIndex}>
    {newFields.map((field, colIndex) => (
      <td key={colIndex}>
        {field === "Ações" && access ? (
          <div className={s.buttonsDiv}>
            <button onClick={() => OpenModal(row, "read")}>
              <img src={readIcon} />
            </button>
            <button onClick={() => editFunction(row)}>
              <img src={editIcon}>/</img>
            </button>
            <button onClick={() => OpenModal(row, "delete")}>
              <img src={deleteIcon} />
            </button>
          </div>
        ) : field === "Comprovante" ? (
          <button className={"paymentButtonReadTable"} onClick={() => OpenProof(row)}>Gerar Comprovante</button>
        ) : Array.isArray(row[field]) ? (
          <button className={s.buttonAsset}><a href={`/${assetType(field.toLowerCase())}/criar?id=${row[field][0]??''}`}>{row[field]}

```

Fonte: O autor (2025).

Requisições e cadastro de Assets

Foi utilizado um formulário construído com a biblioteca Formik, com validação aplicada por meio do esquema definido com Yup. A Figura 88 ilustra o esquema de validação utilizado em uma solicitação.

Figura 88 – Trecho de código de validação de uma solicitação

```
const validationSchema = yup.object({
  codigo: yup.string()
    .matches(/^[a-zA-Z0-9]*$/, "Apenas caracteres alfanuméricos")
    .min(3, "Mínimo de 3 caracteres")
    .max(25, "Máximo de 25 caracteres")
    .required("Campo obrigatório"),
  tipoProduto: yup.mixed().required("Campo obrigatório"),
  volume: yup.number()
    .min(1, "Valor mínimo é 1")
    .max(8, "Valor máximo é 8")
    .required("Campo obrigatório"),
  brita: yup.number()
    .oneOf([0], "Brita deve ser 0")
    .required("Campo obrigatório"),
  fck: yup.number()
    .oneOf([20], "FCK deve ser 20")
    .required("Campo obrigatório"),
  bloco: yup.string().required("Campo obrigatório"),
  slump: yup.string().required("Campo obrigatório"),
  pavimento: yup.string().required("Campo obrigatório"),
  contratante: yup.mixed().required("Campo obrigatório"),
  contratado: yup.mixed().required("Campo obrigatório"),
  date: yup.date()
    .max(new Date(), "Data não pode ser futura")
    .required("Campo obrigatório"),
});
```

Fonte: O autor (2025).

Com os parâmetros validados, o próximo passo foi criar um objeto de requisição, que consiste em um conjunto estruturado de informações como ilustrado na Figura 89. Esse objeto deve seguir o formato definido na documentação do contrato inteligente, para que os dados sejam corretamente interpretados e processados pelo servidor.

Figura 89 – Código do objeto de requisição



```
postData = {
    asset: [
        {
            "@assetType": "solicitacao",
            "id": values.codigo,
            "concreto": {
                "id": values.tipoProduto.id,
                "@key": values.tipoProduto.key,
            },
            "volume": values.volume,
            "brita": values.brita.toString(),
            "fck": values.fck.toString(),
            "bloco": values.bloco,
            "slump": values.slump,
            "pavimento": values.pavimento,
            "contratante": {
                "nome": values.contratante.id,
                "@key": values.contratante.key,
            },
            "contratado": {
                "nome": values.contratado.id,
                "@key": values.contratado.key,
            },
            "data": new Date(values.date).toISOString(),
        }
    ]
}
```

Fonte: O autor (2025).

Deletar e Editar Assets

Foi utilizada uma lógica parecida com a do cadastro de *Assets*, no qual, é criado um objeto para requisição identificando qual é o *Asset* que deseja-se editar ou deletar conforme ilustra a Figura 90.

Figura 90 – Código para editar e deletar o Asset

```
if(typeModal == "delete"){
    async function deleteData(){
        let data = {
            key: {
                "@assetType": assetType == "validarqualidade" ? "validarQualidade" : assetType,
                [dataModal["ID"] ? "id" : dataModal["Código"] ? "codigo" : dataModal["Nome"]]
            }
        };
        const response = await BaseRequest({
            method: "DELETE",
            url: `/api/invoke/deleteAsset`,
            data: data,
            setIsLoading,
        })
    }
}
```

Fonte: O autor (2025).

Integrações (Renderização do Modelo BIM)

Para realizar a integração com o modelo BIM foram utilizados o script e a API fornecidas pela APS conforme ilustrado na Figura 91.

Figura 91 – Códigos do script e API

```
<meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1.0" />
<link href="https://fonts.googleapis.com/css2?family=Roboto:wght@400;700&display=swap" rel="stylesheet" />
<script src="https://developer.api.autodesk.com/modelderivative/v2/viewers/7.*/viewer3D.min.js"></script>
<title>BIM Ledger</title>
</head>

const options = {
    env: "AutodeskProduction",
    accessToken: accessToken
};
const viewerDiv = document.getElementById("viewer");

Autodesk.Viewing.Initializer(options, function () {
    const config = {
        extensions: ["Autodesk.DocumentBrowser"]
    };
    
```

Fonte: O autor (2025).

Após a configuração do setup básico, o próximo passo foi configurar o *viewer* da APS com as informações do projeto como ilustrado na Figura 92. Essa configuração inclui:

1. Definir a URN do objeto na APS;
2. Carregar o documento;
3. Ajustar a posição da luz.

Figura 92 – Código de configuração do *viewer* da APS

```
Autodesk.Viewing.Initializer(options, function () {
  const config = {
    extensions: ["Autodesk.DocumentBrowser"]
  };
  viewer = new Autodesk.Viewing.GuiViewer3D(viewerDiv, config);
  const documentId = "urn:dXJu0mFkc2sub2JqZWN0czpvcy5vYmplY3Q6N3B3bW41ZTV
  Autodesk.Viewing.Document.load(
    documentId,
    (doc) => {
      const defaultViewable = doc.getRoot().getDefaultGeometry();

      viewer.loadDocumentNode(doc, defaultViewable).then(() => {
        setIsModel(true)
      });
    },
    (error) => console.error("Erro ao carregar o documento", error)
  );

  viewer.start();
  viewer.setLightPreset(0);
  viewer.setTheme("light-theme");
  setLoading(false);
});
```

Fonte: O autor (2025).

Gerar Pagamentos

Para viabilizar a geração semiautomática de pagamentos, foi necessário desenvolver um script no *back-end* da aplicação capaz de percorrer todos os pavimentos presentes no modelo. Conforme ilustrado na Figura 93, esse script agrupa os status de execução de cada pavimento e, em seguida, verifica se todos os status associados a um mesmo pavimento estão definidos como "Yes". Somente após essa verificação, o pavimento é considerado concluído e, portanto, apto para a liberação do pagamento.

Figura 93 – Código para processamento do pagamento

```
function processPavimentoStatus(data) {
    const pavimentosMap = {};

    // Agrupar os status por pavimento
    data.forEach(({ pavimento, status }) => {
        if (pavimento && pavimento.startsWith("P")) {
            if (!pavimentosMap[pavimento]) {
                pavimentosMap[pavimento] = [];
            }
            pavimentosMap[pavimento].push(status);
        }
    });

    // Verificar se todos os status são "Yes" para cada pavimento
    const resultado = Object.entries(pavimentosMap).map(([pavimento, statuses]) => {
        return {
            pavimento,
            status: statuses.every(status => status === "Yes")
        };
    });

    return resultado;
}
```

Fonte: O autor (2025).

A partir dessa estrutura integrada, torna-se possível automatizar o controle de cada etapa. Como ilustrado na Figura 94, o sistema percorre as validações de qualidade e, para cada uma delas, verifica se já existe um pagamento associado. Caso positivo, o pagamento é atualizado conforme necessário. Caso contrário, um novo pagamento é criado com base nas informações da qualidade vinculada, garantindo a rastreabilidade e consistência dos dados registrados.

Figura 94 – Código para mapeamento dos objetos para realizar o pagamento

```

if (!pavements || !requests || requestedPavements.length > 0) return;
let requestsPavements = pavements
  .map((pavement) => {
    let matchedRequest = requests.find(
      (request) => request.pavimento === pavement.pavimento
    );
    if (matchedRequest) {
      return {
        ...matchedRequest,
        status: pavement.status,
      };
    }
    return null;
  })
  .filter((request) => request);
setRequestedPavements(requestsPavements);
requestedPavements.forEach((request) => {
  const requestId = request["@key"];
  if (requestId) {
    responseQuality.data.result.forEach((quality) => {
      if (quality.solicitacao["@key"] == requestId) {
        qualities.push({
          "@key": quality["@key"],
          notaFiscal: quality.notaFiscal,
          status: request.status,
          pavimento: request.pavimento,
        });
      }
    });
  }
});
}
);

```

Fonte: O autor (2025).

Depois de identificar quais pavimentos ainda não possuem um pagamento registrado ou que necessitam de atualização, foram criados os registros correspondentes de pagamento. Conforme ilustrado na Figura 95, o sistema percorre as solicitações com validação de qualidade e verifica se já existe um pagamento associado. Caso exista, os dados são atualizados por meio de uma função específica.

Caso contrário, é gerado um novo identificador único (uniqueHash) e construído um objeto com os dados necessários, incluindo a nota fiscal, o status de concretagem e a referência da validação de qualidade. Esse objeto é então enviado ao contrato por meio de uma requisição POST, criando um novo ativo do tipo "pagamento" na base de dados.

Figura 95 – Código para percorrer as solicitações para realização do pagamento

```

for (const quality of requestsWithQuality) {
    // search for the payment in the database
    const existingPayment = data.find(
        (payment) => payment["Validar Qualidade"][1] === quality["@key"]
    );
    if (existingPayment) {
        // if the payment already exists
        const updatedPayment = {
            id: existingPayment.ID,
            ...quality,
        };
        // inside this function i will see if it is necessary to update the payment or not
        UpdatePaymentIfNecessary(updatedPayment);
        continue;
    }
    const uniqueHash = `${Date.now().toString(36)}${Math.random().toString(36).slice(2, 6)}`;
    const postData = {
        asset: [
            {
                "@assetType": "pagamento",
                id: uniqueHash,
                pagamento: {
                    quality: quality.notaFiscal,
                    "@key": quality["@key"],
                },
                concretado: quality.status,
            },
        ],
    };
    promises.push(
        BaseRequest({
            method: "POST",
            url: "/api/invoke/createAsset",
            data: postData,
            setIsLoading,
        })
    );
}

```

Fonte: O autor (2025).

Apêndice I – Comprovante de pagamento

Figura 96 – Modelo de comprovante de pagamento de uma transação

	Comprovante de Pagamento
<hr/>	
Data do Pagamento: 30 de abril de 2025 às 12:20	
Valor: Não Informado	
Dados do Pagamento	
ID: SOLPA002	
Nota Fiscal: NOTA01293	
Concreto e Concretado: Concreto TIPO-002, Sim	
Pavimento e Bloco: P01, B01	
Dados do Destinatário (Contratado)	
Nome: Concreteira	
CNPJ: **.**.125/0001-**	
Dados do Pagador (Contratante)	
Nome: Construtora	
CNPJ: **.**.278/0001-**	

Fonte: O autor (2025).