



Indústria 5.0: Oportunidades e Desafios
para Arquitetura e Construção

13º Simpósio Brasileiro de Gestão e
Economia da Construção e 4º Simpósio
Brasileiro de Tecnologia da Informação
e Comunicação na Construção

ARACAJU-SE | 08 a 10 de Novembro

1 INDÚSTRIA 4.0 NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO: UMA DISCUSSÃO SOBRE AS DIMENSÕES PARA UM MODELO DE MATURIDADE

Industry 4.0 in the construction industry: a discussion
about the dimensions for a maturity model

Priscilla Vanessa P. dos Santos

UFRGS | Porto Alegre, RS | priscilla.vanessa@ufrgs.br

Tarcisio Abreu Saurin

UFRGS | Porto Alegre, RS | saurin@ufrgs.br

Néstor Fabian Ayala

UFRGS | Porto Alegre, RS | nestorf.ayala@gmail.com

RESUMO

Na busca pela competitividade, empresas de construção passaram a incorporar tecnologias associadas à indústria 4.0. Para implementar essas tecnologias, é importante que a empresa seja capaz de identificar onde ela se encontra no caminho da digitalização. Diante disso, este estudo tem como objetivo propor um delineamento de um modelo de maturidade que relacione as tecnologias da Indústria 4.0, distribuídas em níveis de maturidade, para dimensões de excelência operacional baseadas em indicadores-chave. Realizou-se uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) para analisar os principais modelos de maturidade da Indústria 4.0 para a construção. Os resultados da RSL apontam para modelos de maturidade que não relacionam tecnologias da Indústria 4.0 a níveis de maturidade numa jornada de transformação digital, e indica para lacunas importantes onde pouca ênfase tem sido dedicada às áreas que refletem custos e entrega em modelos de maturidade para Indústria 4.0. Os resultados da RSL foram assimilados para propor um modelo de maturidade baseado nas dimensões de excelência operacional. Para trabalhos futuros, é sugerido o aprimoramento e validação do modelo proposto com especialistas.

Palavras-chave: Indústria 4.0; Transformação digital; Excelência operacional; Tecnologias; Revisão sistemática.

ABSTRACT

In the search for competitiveness, construction companies have started to incorporate technologies associated with Industry 4.0. To implement these technologies, it is important for the company to be able to identify where it is on the path to digitalization. Given this, this study aims to propose an outline of a maturity model that relates Industry 4.0 technologies, distributed in maturity levels, to dimensions of operational excellence based on key indicators. A Systematic Literature Review (RSL) was conducted to analyze the main Industry 4.0 maturity models for construction. The results of the RSL point to maturity models that do not link Industry 4.0 technologies to maturity levels in a digital transformation journey, and indicates to important gaps where little emphasis has been devoted to areas that reflect cost and delivery in maturity models for Industry 4.0. The RSL results were assimilated to propose a maturity model based on the dimensions of operational excellence. For future work, it is suggested to improve and validate the proposed model with experts.

Keywords: Industry 4.0; Digital transformation; Operational excellence; Technologies; Systematic review.

1 INTRODUÇÃO

Como uma estratégia de relativo sucesso, as boas práticas relacionadas ao conceito de Indústria 4.0 da manufatura começaram a influenciar de forma lenta, mas forte, o setor da construção (DALLASEGA; RAUCH; LINDER, 2018). O conceito de Indústria 4.0 pode ajudar a construção civil a se transformar em uma indústria impulsionada pela inovação e tecnologia, e assim acompanhar outros setores produtivos em termos de melhoria de desempenho, produtividade, eficiência e segurança (ARIPIN; ZAWAWI; ISMAIL, 2019).

O constante avanço tecnológico, a transformação digital sugerida pelo conceito da Indústria 4.0 pode ser vista como uma estratégia que permite alcançar vantagens competitivas através de melhorias de performance operacional, como maiores níveis de produtividade, melhoria da qualidade, redução de custos, maior satisfação do cliente, menor tempo de entrega e maior segurança (BEGIĆ; GALIĆ; DOLAČEK-ALDUK, 2021; TORTORELLA *et al.*, 2022), potencialmente ajudando a alcançar um patamar de excelência operacional.

¹SANTOS, P. V. P.; SAURIN, T. A.; AYALA, N. F. Indústria 4.0 na indústria da construção: uma discussão sobre as dimensões para um modelo de maturidade. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GESTÃO E ECONOMIA DA CONSTRUÇÃO, 4., 2023, Aracaju. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2023.

A excelência operacional pode ser entendida como uma estratégia utilizada por empresas que buscam alcançar maiores níveis de competitividade (TORTORELLA *et al.*, 2022). Isso pode ser obtido através de um conjunto de recursos que permitem a melhoria em todas as áreas de desempenho (NĂFTĂNĂILĂ; RADU; CIOANĂ, 2013). Nesse sentido, Sharma, Singh e Rastogi (2018) consideram como principais indicadores-chave de desempenho para medir o sucesso de projetos a produtividade, qualidade, custo, entrega e segurança. Desta forma, é razoável que estes indicadores-chave sejam utilizados como áreas base para a avaliação da maturidade digital de uma empresa em sua jornada para a Indústria 4.0.

No entanto, a transformação da Indústria 4.0 carece de direcionamento sistemático, como estruturas de avaliação e modelos de maturidade para empreendimentos de construção (DAS *et al.* 2022). Os modelos de maturidade provam ser uma ferramenta útil devido à sua capacidade de identificar padrões de evolução e mudança de um estado inicial até a maturidade (PÖPPELBUß; RÖGLINGER, 2011).

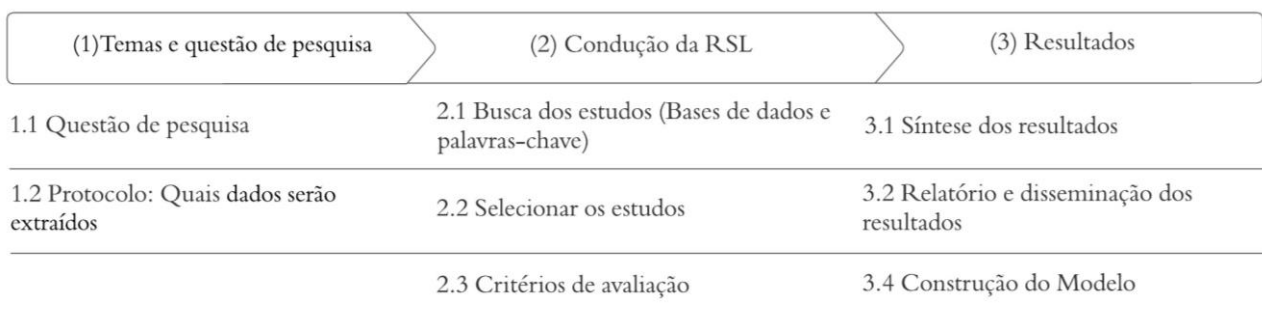
Becker, Knackstedt, Pöppelbuß (2009), definem um modelo de maturidade como uma sequência de níveis de maturidade para organizações ou processos, que representa um caminho de evolução moldados como estágios. Portanto, o modelo de maturidade, segundo os mesmos autores, serve de escala para a avaliação da posição na trajetória de evolução, fornecendo critérios e características que precisam ser cumpridos para atingir um determinado nível de maturidade.

Na literatura alguns estudos podem ser encontrados relacionando níveis de maturidade para Indústria 4.0 com o contexto da construção civil. Wernicke *et al.* (2021) utilizaram uma estrutura de modelos de maturidade digital para canteiro de obras. Das *et al.* (2023) apresentam modelos conceituais de maturidade voltados para áreas de processo. Jazzar *et al.* (2021) utilizam camadas de implementação para Indústria 4.0. Sezer, Thunberg e Wernicke (2021) propõem um modelo para avaliar o grau de digitalização. Lin *et al.* (2022) discutem sobre 4 níveis de maturidade para gerenciamento inteligente da construção. No entanto, nenhum modelo apresentado na literatura relaciona as tecnologias da Indústria 4.0 para a construção ao longo dos níveis de maturidade considerando dimensões de excelência operacional. Portanto, este estudo tem o objetivo de propor o delineamento de um modelo de maturidade, capaz de apresentar como para uma empresa do setor de construção está situada em relação ao uso de tecnologias da Indústria 4.0, nas cinco dimensões de excelência operacional.

2 MÉTODO

Realizou-se um estudo exploratório da literatura, focando na área de Indústria 4.0 para Construção, com o objetivo de obter definições, tipos de tecnologias, usos e funcionalidades. Nesta fase foram identificados 5 artigos de relevância sobre modelo de maturidade na base de dados *Web of Science*. Em seguida se fez uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL), com o objetivo de identificar os modelos de maturidade existentes na literatura, referentes a Indústria 4.0 na construção. Na Figura 1 se encontra o delineamento desta pesquisa, a qual foi dividido em três fases, seguindo uma sugestão do método apresentado por Khan *et al.* (2003) para condução de revisões sistemáticas.

Figura 1: Delineamento das etapas de pesquisa



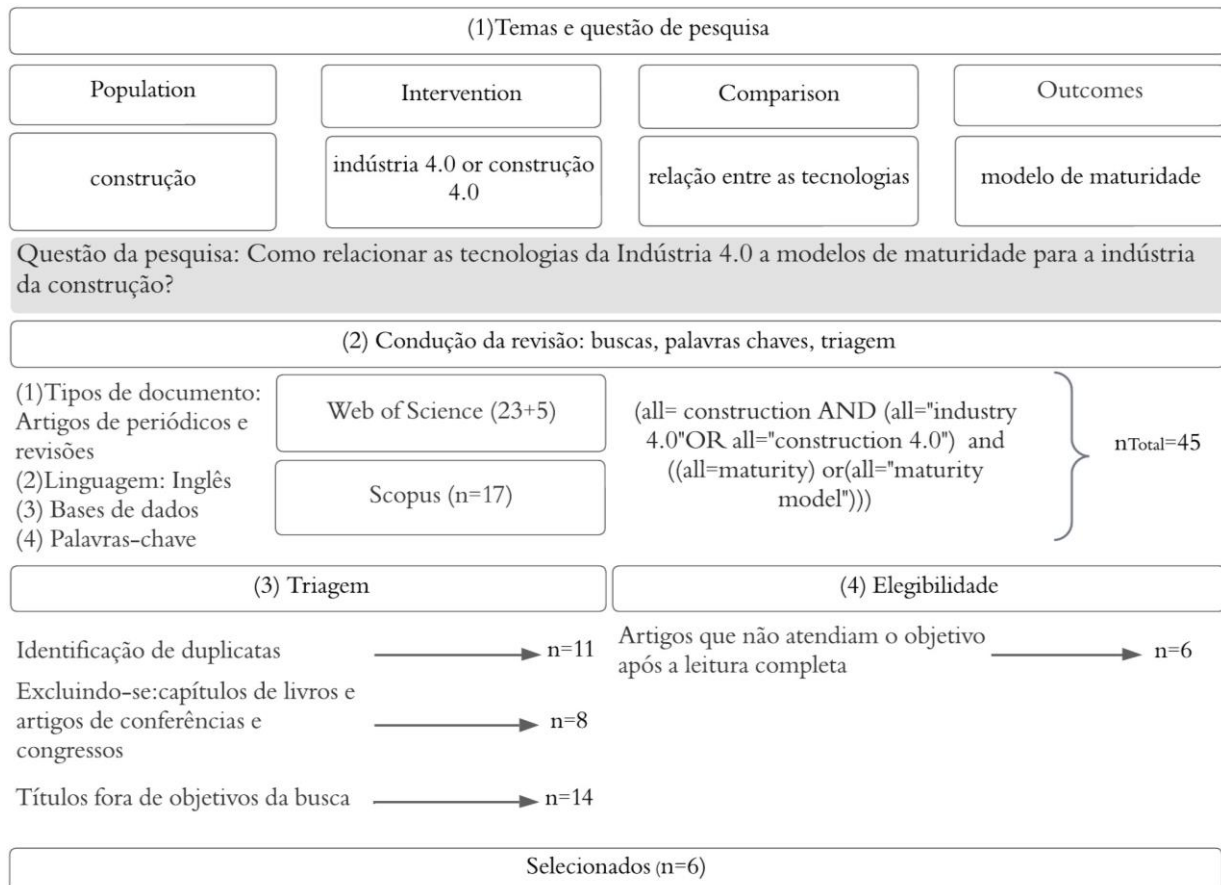
Fonte: Autor (2023).

A Figura 2 apresenta a condução da RSL, seguindo um método adaptado do apresentado por Ransolin *et al.* (2022). Na primeira etapa, a questão de pesquisa foi estruturada segundo o método PICO (*Population, Intervention, Comparasion e Outcomes*), resultando na questão: “Como relacionar as tecnologias da Indústria

4.0 a modelos de maturidade para a indústria da construção?”. Na segunda etapa, foram consultados os bancos de dados da *Scopus* e *Web of Science*, escolhidas pela relevância e representatividade na área da construção civil, totalizando 45 artigos triados. Na etapa de triagem, foram excluídas as duplicatas, os capítulos de livro e artigos de congresso e os títulos de artigos que não atendiam ao objetivo da busca e foram incluídos os artigos de relevância da fase exploratória.

Na etapa de elegibilidade, realizou-se a leitura completa de 12 artigos, onde se observou os critérios de avaliação para inclusão dos artigos: (i) método utilizado; (ii) uso de modelos de maturidade; (iii) quantidade de níveis utilizados nos modelos; (iv) dimensões ou critérios; (v) relação das tecnologias dentro dos modelos de maturidade. Desta forma, foram selecionados 6 artigos alinhados com o objetivo deste trabalho.

Figura 2: Delineamento das etapas da RSL



Fonte: Autor (2023).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 SÍNTESE DA RSL E APRESENTAÇÃO DO MODELO

A importância de um modelo de maturidade surge no momento em que profissionais e usuário de tecnologias podem traçar suas estratégias baseadas em uma noção real de seu posicionamento em relação a maturidade digital de sua empresa, evitando assim altas expectativas, pois segundo Kegermam (2013) a Indústria 4.0 é um projeto de longo prazo e processual.

Ainda em relação aos modelos da literatura, Sezer, Thunberg e Wernicke (2021) propõem um modelo para avaliar o grau de digitalização em projetos da construção baseadas em atividades capazes de serem digitalizadas, este estudo difere do modelo apresentado pelos autores porque também não aponta para quais tecnologias podem ser empregadas.

Os modelos apresentados por Das *et al.* (2022) e Das *et al.* (2023) apresentam modelos conceituais de maturidade, aplicando a digitalização diretamente ao que considera áreas chave de processo, em oposição a dimensões gerais de operação, como apresentado neste artigo. Lin *et al.* (2022) discute sobre 4 níveis de maturidade, e formas de avaliar empresas do setor da construção em relação a gerenciamento inteligente da construção, porém não é apresentado um modelo que relacione esses níveis a tecnologias possíveis de serem utilizadas. O Quadro 1 apresenta a síntese dos principais resultados da RSL.

Quadro 2: Síntese dos resultados da RSL

AUTORES	MÉTODO	NÍVEIS DE MATURIDADE	DIMENSÕES
WERNICKE <i>et al.</i> , 2021	Revisão da literatura, entrevistas, um estudo de caso	4 níveis (0) Inicial; (1) Digitalização central IT; (2) Digitalização projeto; (3) Transformação Digital	5 critérios baseados em 11 dimensões: (1) Indivíduos; (2) Tecnologias; (3) Infraestrutura organizacional (4) Metas; (5) Ambientes
JAZZAR <i>et al.</i> , 2021	Revisão da Literatura e um estudo de caso	Sem níveis de maturidade	4 dimensões (1) Tecnologias da Indústria 4.0; (2) Ciclo de vida da construção 4.0 e maturidade tecnológica; (3) Níveis de integração para implementar Construção 4.0; (4) Conjunto de requisitos
SEZER; THUNBERG; WERNICKE, 2021	Revisão da literatura, workshop com 11 participantes, questionário estruturados (113 participantes)	3 níveis de digitalização	4 dimensões: (1) Aquisição de dados; (2) Entrada de dado; (3) Análise; (4) Comunicação dos dados
DAS <i>et al.</i> , 2022	2 Revisões Sistemáticas da Literatura	Sem níveis de maturidade	7 dimensões: (1) Pessoas e cultura; (2) Gestão de dados; (3) Gestão de mudanças; (4) Inovação; (5) Automação; (6) Colaboração e comunicação (7) Liderança e estratégia
LIN <i>et al.</i> , 2022	Revisões de literatura, questionários, discussões de especialistas e dois estudos de caso	5 níveis de maturidade baseados em intervalos de pontuação	5 dimensões: (1) Estrutura organizacional e processo de trabalho; (2) Coleta e monitoramento de informações; (3) Transmissão e agregação de informações; (4) Tomada de decisão apoiada pela visualização; (5) Análise e dedução inteligentes
DAS <i>et al.</i> , 2023	Revisão crítica da literatura e análise qualitativa, especialistas para validação	5 níveis: (1) Ad-hoc; (2) Impulsionamento; (3) Transformação; (4) Integração; (5) Inovação	35 áreas chave de processos

Fonte: Autor (2023).

No modelo proposto neste artigo, os níveis de maturidade podem servir como passos ou até mesmo estágios de progressão, pois, conforme argumentado por Wernicke *et al.* (2021), os níveis de maturidade indicam a progressão em direção ao aumento das capacidades para avaliar e implementar tecnologias. Observou-se que na literatura avaliada, alguns autores, como Jazzar *et al.* (2021) e Das *et al.* (2022) optaram por não utilizar níveis de maturidade.

O modelo apresentado neste artigo difere da literatura em relação a como as tecnologias podem ser relacionadas com os níveis de maturidade. Wernicke *et al.* (2021) apresentam 11 dimensões resumidas em 5 critérios para um framework para avaliar a maturidade digital em canteiros de obras, mas, no entanto, não apresentam quais tecnologias podem ser relacionadas ao longo dos níveis de maturidade.

A proposta da Figura 3 está estruturada em dois eixos: um horizontal, com cinco níveis de maturidade; um vertical, com cinco dimensões. Para o par nível de maturidade e dimensão apresenta-se uma descrição da prática e a tecnologia empregada. No eixo vertical, foram propostas 5 dimensões relacionadas a excelência

operacional: produtividade, qualidade, entrega, custo e segurança. Tais dimensões foram selecionadas porque representam alguns dos principais desafios da indústria da construção na busca pela competitividade.

Figura 3: Modelo de maturidade

	Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4	Nível 5
Dimensões de Excelência Operacional					
Produtividade	A produtividade é controlada através de planilhas manuais baseadas no papel.	A produtividade é controlada com auxílio de planilhas online, dispositivos móveis, envolvendo conectividade e informatização	A produtividade é controlada através de status e informações em tempo real, fazendo uso de tecnologias digitais para auxiliar a coleta	A produtividade é controlada por sistemas que possuem grande quantidade de dados, que são tratados e retroalimentados. A visualização e o compartilhamento auxiliam a colaboração e comunicação.	A produtividade é controlada por sistemas que possuem grandes quantidades de dados, onde o histórico de dados possibilita a aprendizagem e a predição de incertezas.
Tecnologias	Planilhas manuais	Excel, Cloud, Aplicativos móveis, BIM, Câmeras	RFID, IoT, VANT, Robôs	BIM, Dashboards e DW, BDA, Visão Computacional	BDA, IA, Machine Learning, Dispositivos Vestíveis, Digital Twins
Qualidade	A gestão da qualidade é efetuada a partir de planilhas manuais, medições periódicas, sem compartilhamento de informações entre equipes.	A gestão da qualidade é realizada com uso de inspeções remotas, planilhas online, gerando comunicação e compartilhamento de informações entre equipes.	A gestão da qualidade é acompanhada através de indicadores com uso de sensores, em tempo real, compartilhados e visualizados por equipes (Ex.: qualidade de materiais rejeitados, não conformidades, aceitos, custos, falhas)	A gestão da qualidade utiliza o histórico de dados de indicadores através de análises automatizadas, para melhorar processos para ter baixa variabilidade.	A gestão da qualidade antecipa problemas de qualidade partir do histórico de dados de indicadores, e o aprendizado a partir de dados pode ser alcançado.
Tecnologias	Planilhas manuais	Excel, Aplicativos móveis, Cloud	RFID, IoT, VANT, RA	Simulações, BDA, DL	BDA, IA, Machine Learning
Entrega	O processo de entrega é feito manualmente e de forma intuitiva e planejado por uma única pessoa.	Abordagens intuitivas, com uso de tecnologias baseadas em informatização e conectividade para programações de atividade e entregas de serviços	Os pacotes de trabalho e as atividades do planejamento podem ser monitoradas com status e informações em tempo real.	Os pacotes de trabalho e as atividades do planejamento podem ser simuladas com base nos dados coletados do canteiro	O processo de entrega pode ser baseado no aprendizado de dados, propostas de planejamento podem ser geradas automaticamente, e decisões otimizadas de planejamento e entrega.
Tecnologias	Planilhas manuais	Excel, Aplicativos móveis, BIM, Cloud	RFID, IoT, VANT, BIM	Simulações, BIM, BDA	BIM, BDA, IA, Machine Learning
Segurança	As condições de segurança são inspecionadas localmente, por pessoas e com certa periodicidade. Dados são coletados manualmente.	Dados de segurança são coletados através de tecnologias, existe a verificação da condição insegura, e identificação de área de risco.	Dados mais avançados são coletados, visualizados e prevenção de ações inseguras pode ser alcançada (Ex.: falta de uso de EPI, violação de regras de segurança)	Tratamento de possibilidades de incidente, alerta para os trabalhadores sobre os procedimentos de segurança (treinamento), gestão de indicadores de segurança (Ex.: área de riscos, atividades relacionadas com andAIMs, indicadores de acidentes)	Existe um suporte de tecnologias na prevenção de acidentes em tempo real. O histórico de dados (Ex.: colisão, choque, queda de altura) é utilizado na aprendizagem e dados de saúde do operador
Tecnologias	Planilhas manuais	Excel, Cloud, Aplicativos móveis, BIM, Câmeras	RFID, IoT, VANT, Robôs	Dashboards e DW, BDA, DL, RA, RV, Visão Computacional	Dispositivos Vestíveis, BDA, IA, Machine Learning, Digital Twins
Custo	A análise de custo é feita manualmente sem apoio de planilhas eletrônicas e sem compartilhamento.	Abordagens intuitivas, com cálculos básicos de tempo e custo, com uso de tecnologias baseadas em informatização e conectividade.	O uso de sensores em tempo real são capazes coletar e gerar informações para comparação de custo real x custo estimado.	A simulação de custos com maior precisão pode ser realizada a partir dos dados coletados. Economias de custos podem ser alcanças e visualizadas.	Uso de métodos matemáticos preditivos com apoio das tecnologias para tomadas de decisão, e aprendizagem a partir de dados.
Tecnologias	Planilhas manuais	Excel, Aplicativos móveis, BIM, Cloud	RFID, BIM, IoT, VANT	Simulações, BIM, BDA	BIM, BDA, IA, Machine Learning

Fonte: Autor (2023).

Historicamente, estes desafios são associados a indústria da construção, que apresenta baixos índices de produtividade (RIVERA *et al.*, 2019), qualidade comprometida com altas taxas de retrabalho e defeitos (IBARRA, 2016), problemas de controle de custos (ROSENFELD, 2014), entregas atrasadas e inconsistentes (RIVERA *et al.*, 2019), e ocorrência de acidentes e medidas reativas na área da segurança (LOUSHINE *et al.*, 2006).

Os níveis representam a progressão da empresa em direção a uma transformação digital. No nível 1, as práticas estão associadas a procedimentos e processos que são realizados de forma manual, sem apoio de tecnologias digitais. O nível 2 representa o momento em que a empresa introduz informatização e conectividade às suas práticas, de forma a aumentar a eficiência na difusão e armazenamento de dados. O nível 3 envolve tecnologias que facilitam a coleta de dados, esse nível tem sua devida importância no avanço tecnológico, pois tecnologias em níveis superiores necessitam de grandes quantidades de dados. O nível 4 apresenta tecnologias que favorecem a visibilidade e análise dos dados. No último nível, o nível 5, estão alocadas algumas tecnologias que permitem o aprendizado a partir do histórico de dados, facilitando tomadas de decisão. Na próxima subseção detalham-se os aspectos relacionados à tecnologia.

3.2 ASPECTOS TECNOLÓGICOS

As tecnologias relacionadas no Modelo da Figura 3 foram divididas em quatro grupos principais, a partir de uma adaptação de Chen *et al.* (2021) e Sezer, Thunberg, Wernicke (2021): tecnologias para entrada de dados; tecnologias para aquisição de dados; tecnologias para processamento e visualização; e tecnologias de análise e tomadas de decisão. É importante notar que uma tecnologia pode envolver múltiplas funções dentro da Indústria 4.0, podendo, portanto, estar posicionada em diferentes níveis de maturidade que não estão necessariamente ligados a função de seu grupo principal.

No primeiro grupo, estão relacionadas tecnologias de entradas de dados, que fazem interfaces para digitalização, onde pessoas podem inserir dados para serem armazenados e distribuídos de forma digital (SEZER; THUNBERG; WERNICKE, 2021).

O segundo grupo são de tecnologias digitais para aquisição de dados, em oposição aos métodos manuais de coleta de dados, que são caracterizados por baixa precisão e atrasos de tempo na coleta (CHEN *et al.*, 2021). Neste grupo se encontram tecnologias como *Internet of Things* (IoT) e sensores permitindo a comunicação e troca de dados entre operações, *Radio Frequency Identification* (RFID) e *Building Information Modeling* BIM, os quais permitem um rastreamento de informações e ativos de forma eficiente. Visão computacional e os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) realizam coleta de dados, e tem sido fortemente utilizado para levantamentos, acompanhamentos de progresso, inspeções de qualidade e de segurança (ARIPIN; ZAWAWI; ISMAIL, 2019).

Observa-se que muitas tecnologias da indústria 4.0 oportunizam o desenvolvimento de outras, como é o caso da *IoT*. Na indústria da construção a *IoT* é utilizada para conectar modelos BIM digitais com dispositivos físicos, permitindo o monitoramento de progresso de tarefas rastreamento de materiais e equipamentos (RIVERA *et al.*, 2020).

Os métodos baseados no reconhecimento de visão, tais como visão computacional, que utiliza imagens digitais e vídeos para entender o mundo visual (FANG *et al.*, 2019), ou até mesmo o uso de VANTS com a captura de imagens tem muito a oferecer na coleta de dados. Uma vez combinadas com algoritmos de *Deep Learning* (DL), várias tarefas baseadas em imagens visuais, como classificação de imagens, detecção de objetos, rastreamento de objetos, estimativa de pose e reconhecimento de atividades, podem ser resolvidas por meio de algoritmos DL como parte integrante desses aplicativos (PAL; HSIEH, 2021).

O uso de BIM é amplamente discutido na literatura em várias etapas da construção. Nesse sentido se justifica como uma tecnologia que pode ser a base para o desenvolvimento de outras tecnologias, tais como monitoramento da construção a partir de nuvens de pontos (RAO *et al.*, 2021), interação da realidade aumentada ou realidade virtual no canteiro de obras facilitando a coordenação e tirando dúvidas (RIVERA *et al.*, 2019), e até mesmo para a criação do gêmeo digital a ser utilizado em tecnologias de *Digital Twins* (DT) (SACKS *et al.*, 2020).

No terceiro grupo, contendo tecnologias para processamento e visualização, estão as tecnologias voltadas tratamento de dados e ao fornecimento de interfaces interativas para os usuários. A *Virtual Reality* (VR) e *Augmented Reality* (AR) cumprem funções de fornecer ambientes virtuais e semi-virtuais imersivos e

interativos para aprendizado e auxílio em tarefas (RIVERA *et al.*, 2020). Ainda em relação a tecnologias de visualização e interação, o uso de *Digital Whiteboards* (DW), foi estudado por Pedó *et al.* (2022), e foi evidenciado como uma abordagem benéfica para comunicação e transferência de informações e ideias, auxiliando tomadas de decisão. Enquanto as tecnologias vestíveis (RAO *et al.*, 2021), ou Realidade Aumentada podem ser utilizadas para treinamentos de segurança, monitoramento de dados do operador (TEIZER; CHENG, 2015).

No quarto grupo, com tecnologias para análise de dados e tomada de decisão, o foco está na análise rápida e profunda dos dados coletados pelo primeiro grupo, permitindo uma tomada de decisão informatizada, ou até mesmo automática. Neste sentido, o *Big Data Analytics* (BDA) aparece no modelo em dois níveis de maturidade, nível 4 e 5, e oferece o meio de processar o grande volume de dados coletados, enquanto a Inteligência Artificial (IA) e o *Machine Learning* (ML) permitem a criação de modelos preditivos e algoritmos de tomada de decisão (RIVERA *et al.*, 2020).

É importante considerar que a Indústria 4.0 já está presente na construção civil há algum tempo, porém, as tecnologias estão em diferentes estágios de aplicação (OESTERREICH; TEUTEBERG, 2016.) Tecnologias como BIM, Computação em Nuvem e Modularização se desenvolveram um pouco mais, enquanto outras tecnologias como Realidade Aumentada, Virtual e Mista ainda estão sendo aprimoradas (ALALOUL *et al.*, 2020). Dessa forma, é possível observar no modelo de maturidade proposto neste trabalho que é comum que tecnologias pouco exploradas na construção apareçam em níveis mais altos de maturidade. Isso, por sua vez, oportuniza lacunas de conhecimento para serem exploradas.

3.3 DIMENSÕES DE EXCELÊNCIA OPERACIONAL

No modelo proposto neste artigo, são utilizadas 5 dimensões de excelência operacional, com o objetivo de guiar a transformação digital da indústria da construção através de dimensões que sejam relevantes para empresas do setor, possibilitando o alcance de maior competitividade dentro do mercado.

No modelo apresentado, o avanço na maturidade está relacionado com o amadurecimento no avanço tecnológico, o uso de tecnologias digitais implementadas, por exemplo, ao acessar dados e obter informações em tempo real, possibilita a participação de vários indivíduos e permite evoluir em níveis de maturidade dentro da dimensão de produtividade.

A progressão digital na dimensão da qualidade proposta no modelo ocorre com a melhoria dos métodos de inspeção e com a capacidade de visualizar com mais facilidade dados de qualidade, aplicando as informações coletadas na melhoria de processos para ter baixa variabilidade. Desta forma, a gestão da qualidade busca antecipar problemas de qualidade partir do histórico de dados dos indicadores, e o aprendizado a partir de dados pode ser alcançado. A área da qualidade é considerada na literatura como uma em que a Indústria 4.0 pode afetar positivamente (MASKURIY *et al.*, 2019). Porém, nos modelos analisados, apenas o modelo de Wernicke *et al.* (2021) utiliza explicitamente a qualidade como uma dimensão dentro do modelo de maturidade.

A dimensão de entrega apresentada no modelo, se refere a permitir que um produto seja entregue no prazo para o cliente, minimizando atrasos e perdas (SHARMA; SINGH; RASTOGI, 2018). Nesse sentido, algumas tecnologias dispostas dentro do modelo podem agregar informações em relação a atividade de entregas de serviços, fornecendo dados em tempo real para monitoramento e controle do progresso (SEZER; THUNBERG; WERNICKE, 2021).

A dimensão de segurança, traz a importância de zonas livres de acidentes, garantindo a segurança do trabalho em relação a máquinas, materiais e pessoas (SHARMA; SINGH; RASTOGI, 2018). Neste modelo, a relação da dimensão da segurança com as tecnologias da Indústria 4.0 traz a percepção da tecnologia como um suporte na prevenção de acidentes, identificando ações inseguras, analisando possibilidades de incidente e áreas de risco (WERNICKE *et al.*, 2021).

Na última dimensão apresentada, o custo desempenha um papel importante em vários projetos da construção (LIN *et al.*, 2022). O problema relacionado a custos é frequentemente encontrado na literatura como um dos problemas crônicos da construção (ROSENFELD, 2014). No modelo apresentado, a progressão com uso de tecnologias está associada a obter dados que possam ser utilizados para visualizar economias de custo e precisão de orçamentos.

De uma forma geral, nos modelos de maturidade de Indústria 4.0 para a construção observados da literatura, pouca ênfase tem sido dedicada às áreas que refletem custos e entrega, assim indicando lacunas que podem ser exploradas com maior profundidade.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste estudo foi propor um delineamento de modelo de maturidade que relacionasse níveis de excelência operacional com tecnologias da indústria 4.0. A contribuição prática deste artigo é uma referência conceitual que mostra dimensões a serem desenvolvidas por gestores de obras que precisam traçar estratégias de desenvolvimento tecnológico. Como contribuição teórica, este modelo fornece forma complementar aos modelos atuais da literatura, fornecendo meios de avaliar o nível ou a maturidade de implementação de tecnologias da Indústria 4.0, considerando dimensões de excelência operacional.

Algumas ressalvas e limitações podem ser consideradas sobre o modelo proposto. Primeiro, igualmente ao apontado por Oesterreich e Teuteberg (2016), ainda há uma incerteza considerável sobre a Indústria 4.0, especialmente em relação aos requisitos de tecnologia e benefícios potenciais. Segundo o modelo proposto não traz referências sobre informações de suporte técnico para implementação de tecnologias que de acordo com Liu *et al.* (2016), é importante para que tecnologias inteligentes sejam bem aproveitadas.

Para este modelo é sugerido validações e aprofundamento do modelo, de forma a evidenciar maiores desafios a serem enfrentados na jornada de transformação digital a partir de modelos de maturidade da Indústria 4.0 para a construção.

A proposta apresentada traz oportunidades para estudos futuros, como: avaliar os potenciais desafios a serem enfrentados na adoção desse modelo de maturidade, propor diretrizes que orientem o uso e aplicabilidade do modelo, e ainda, apontar estratégias que permitam a empresa avaliada avançar em níveis de maturidade.

REFERÊNCIAS

- ARIPIN, I. D. MOHD.; ZAWAWI, E. M. A.; ISMAIL, Z. Factors Influencing the Implementation of Technologies Behind Industry 4.0 in the Malaysian Construction Industry. **MATEC Web of Conferences**. Johor, v. 266, 2019. In: International Conference on Built Environment and Engineering 2018. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201926601006>. Disponível em: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2019/15/mateconf_iconbee2019_01006/mateconf_iconbee2019_01006.html. Acesso em: 20 abr. 2023.
- BECKER, J.; KNACKSTEDT, R.; PÖPPELBUSS, J. Developing Maturity Models for IT Management. **Business & Information Systems Engineering**, v. 1, n. 3, p. 213–222, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12599-009-0044-5>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12599-009-0044-5>. Acesso em: 20 abr. 2023.
- BEGIĆ, H.; GALIĆ, M. A systematic review of construction 4.0 in the context of the BIM 4.0 premise. **Buildings**, v. 11, n. 8, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings11080337>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-5309/11/8/337>. Acesso em: 20 abr. 2023.
- CHEN, Xichen *et al.* Implementation of technologies in the construction industry: a systematic review. **Engineering, Construction and Architectural Management**, v. 29, n. 8, p. 3181–3209, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1108/ECAM-02-2021-0172>. Disponível em: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/ECAM-02-2021-0172/full/html>. Acesso em: 11 jun. 2023.
- DALLASEGA, P.; RAUCH, E.; LINDER, C. Industry 4.0 as an enabler of proximity for construction supply chains: A systematic literature review. **Computers in Industry**, v. 99, n. August 2017, p. 205–225, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.03.039>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361517305043>. Acesso em: 20 abr. 2023.
- DAS, P. *et al.* Paving the way for industry 4.0 maturity of construction enterprises: a state of the art review. **Engineering, Construction and Architectural Management**, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1108/ECAM-11-2021-1001>. Disponível em: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/ECAM-11-2021-1001/full/html>. Acesso em: 20 abr. 2023.
- DAS, Priyadarshini *et al.* A smart modern construction enterprise maturity model for business scenarios leading to Industry 4.0. **Smart and Sustainable Built Environment**, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1108/SASBE-09-2022-0205>. Disponível em: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/SASBE-09-2022-0205/full/html>. Acesso em 11 jun. 2023.
- FANG, W. *et al.* A deep learning-based approach for mitigating falls from height with computer vision: Convolutional neural network. **Advanced Engineering Informatics**, v. 39, n. December 2018, p. 170–177, 2019. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.aei.2018.12.005>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474034618305275>. Acesso em: 20 abr. 2023.

IBARRA, José Fernando Villamayor. **Integração de Modelos de Processo e Produto na Fase de Construção para o Controle da Produção e da Qualidade com o Apoio de BIM**. 2016. 181 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/149814>. Acesso em: 11 jun. 2023.

JAZZAR, Mahmoud *et al.* Integrating Construction 4.0 Technologies: A Four-Layer Implementation Plan. **Frontiers in Built Environment**, v. 7, n. November, p. 1–14, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbuil.2021.671408> Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbuil.2021.671408/full>. Acesso em: 11 jun. 2023.

KAGERMANN, H., WAHLSTER, W., HELBIG, J., 2013. **Recommendations for Implementing the Strategic Initiative Industrie 4.0: Securing the Future of German Manufacturing Industry**. Final Report of the Industry 4.0 Working Group. Acatech, Forschungsunion. 2013. 85 p. Disponível em: <https://en.acatech.de/publication/recommendations-for-implementing-the-strategic-initiative-industrie-4-0-final-report-of-the-industrie-4-0-working-group/>. Acesso em: 16 jun. 2023.

KHAN, Khalid S. *et al.* Five steps to conducting a systematic review. **Journal of the Royal Society of Medicine**, v. 96, n. 3, p. 118–121, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1177/014107680309600304>. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12612111/>. Acesso em: 11 jun. 2023.

LIN, Chao *et al.* Maturity Assessment of Intelligent Construction Management. **Buildings**, v. 12, n. 10, p. 1–21, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1258%2Fjrm.96.3.118>. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC539417/>. Acesso em: 11 jun. 2023.

LIU, T. *et al.* Smart cloud-based platform for construction sites. *In: International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics (SOLI)*, 2016, Beijing. **Proceedings** [...]. Beijing: IEEE, 2016, p. 168–173. DOI: <https://doi.org/10.1109/SOLI.2016.7551681>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7551681> Acesso em: 20 abr. 2023.

LOUSHINE, Todd W. *et al.* Quality and safety management in construction. **Total Quality Management and Business Excellence**, v. 17, n. 9, p. 1171–1212, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1080/14783360600750469>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/14783360600750469>. Acesso em: 11 jun. 2023.

MASKURIY, R. *et al.* Industry 4.0 for the construction industry: Review of management perspective. **Economies**, v. 7, n. 3, p. 0–14, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/economies7030068>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2227-7099/7/3/68>. Acesso em: 20 abr. 2023.

NAFTANAILA, I., RADU, C., & CIOANA, G. Studies in Business and Economics OPERATIONAL EXCELLENCE – A KEY TO WORLD- CLASS BUSINESS PERFORMANCE. **Studies in Business & Economics**, v. 8, n. 3, p. 133–141, 2013. Disponível em: https://econpapers.repec.org/article/blgjournl/v_3a8_3ay_3a2013_3ai_3a3_3ap_3a133-140.htm. Acesso em: 11 jun. 2023.

OESTERREICH, T. D.; TEUTEBERG, F. Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry. **Computers in Industry**, v. 83, p. 121–139, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2016.09.006>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361516301944>. Acesso em: 20 abr. 2023.

PAL, A.; HSIEH, S. H. Deep-learning-based visual data analytics for smart construction management. **Automation in Construction**, v. 131, n. August, p. 103892, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103892>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580521003435>. Acesso em: 20 abr. 2023.

PEDÓ, B. *et al.* Visual Management (VM) supporting collaborative practices in infrastructure engineering design. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 1101, n. 5, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/1101/5/052012>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/366070470_Visual_Management_VM_supporting_collaborative_practices_in_infrastructure_engineering_design. Acesso em: 20 abr. 2023.

PÖPPELBUSS, J.; RÖGLINGER, M. What makes a useful maturity model? A framework of general design principles for maturity models and its demonstration in business process management. *In: European Conference on Information Systems (ICIS)*, 28, 2011, Helsinki, **Proceedings** [...]. Helsinki, 2011. Disponível em: <https://aisel.aisnet.org/ecis2011/28/> Acesso em: 20 abr. 2023.

RANSOLIN, Natália *et al.* The Built Environment Influence on Resilient Healthcare: A Systematic Literature Review of Design Knowledge. **Health Environments Research and Design Journal**, v. 15, n. 3, p. 329–350, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1177/19375867221077469>. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/19375867221077469?journalCode=hera>. Acesso em: 11 jun. 2023.

- RAO, A. S. *et al.* Real-time monitoring of construction sites: Sensors, methods, and applications. **Automation in Construction**, v. 136, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104099>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580521005501>. Acesso em: 20 abr. 2023.
- RIVERA, F. *et al.* Methodological-Technological Framework for Construction 4.0. **Archives of Computational Methods in Engineering**, v. 28, n. 2, p. 689–711, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11831-020-09455-9>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11831-020-09455-9>. Acesso em: 11 jun. 2023.
- SACKS, R. *et al.* Construction with digital twin information systems. **Data-Centric Engineering**, v. 1, n. 6, 27 nov. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1017/dce.2020.16>. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/journals/data-centric-engineering/article/construction-with-digital-twin-information-systems/C88A0AE68BBA09517D7534B9DBE24FEF>. Acesso em: 20 abr. 2023.
- SEZER, Ahmet Anil; THUNBERG, Micael; WERNICKE, Brian. Digitalization Index: Developing a Model for Assessing the Degree of Digitalization of Construction Projects. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 147, n. 10, p. 1–9, 2021. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0002145](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002145). Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29CO.1943-7862.0002145?af=R>. Acesso em: 11 jun. 2023.
- SHARMA, Richa; SINGH, Jagtar; RASTOGI, Vikas. The impact of total productive maintenance on key performance indicators (PQCDSM): A case study of automobile manufacturing sector. **International Journal of Productivity and Quality Management**, v. 24, n. 2, p. 267–283, 2018. DOI: <https://dx.doi.org/10.1504/IJPM.2018.091794>. Disponível em: <https://www.inderscience.com/info/inarticle.php?artid=91794>. Acesso em: 11 jun. 2023.
- TEIZER, J.; CHENG, T. Proximity hazard indicator for workers-on-foot near miss interactions with construction equipment and geo-referenced hazard areas. **Automation in Construction**, v. 60, p. 58–73, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.09.003>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092658051500196X>. Acesso em: 20 abr. 2023.
- TORTORELLA, Guilherme *et al.* What does operational excellence mean in the Fourth Industrial Revolution era? **International Journal of Production Research**, v. 60, n. 9, p. 2901–2917, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1905903>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00207543.2021.1905903>. Acesso em: 11 jun. 2023.
- WERNICKE, Brian *et al.* Introduction of a digital maturity assessment framework for construction site operations. **International Journal of Construction Management**, v. 23, n. 5, p. 898–908, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15623599.2021.1943629>. DOI: Disponível em: Acesso em: 11 jun. 2023.