



PLANEJAMENTO PARA O IMPREVISTO EM PROJETOS DE CONSTRUÇÃO: UMA REVISÃO

PLANNING FOR THE UNEXPECTED IN CONSTRUCTION PROJECTS: A REVIEW

PLANIFICACIÓN DE IMPREVISTOS EN PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN: UNA REVISIÓN

Cristiano Saad Travassos do Carmo ¹ & Elisa Dominguez Sotelino ²

^{1,2} Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Meio Ambiente

^{1*} csaad@puc-rio.br ² sotelino@puc-rio.br

ARTIGO INFO.

Recebido: 30.08.2023

Aprovado: 09.10.2023

Disponibilizado: 30.10.2023

PALAVRAS-CHAVE: métodos de planejamento de obras; revisão sistemática da literatura; incertezas, eventos aleatórios.

KEYWORDS: construction planning methods; systematic literature review; uncertainties; random events.

PALABRAS CLAVE: métodos de planificación de la construcción; revisión sistemática de la literatura; incertidumbres, sucesos aleatorios.

* Autor Correspondente: Carmo, C. S. T., do.

RESUMO

Crises globais, como pandemias e guerras, evidenciam como os projetos de construção são afetados por eventos inesperados, normalmente ignorados pelas equipes de planejamento. Portanto, o objetivo deste estudo é revisar a literatura para entender como as incertezas são consideradas nos métodos de planejamento de obra e quais são as próximas etapas para enfrentar novas crises. Assim, os autores mapearam as variáveis tradicionais que são incluídas como incertezas nos métodos de planejamento, como tempo e custo do projeto, bem como as variáveis incomuns que não são normalmente incluídas como incertezas nos métodos, como questões de segurança e sustentabilidade. O estado da arte dos métodos de planejamento com incertezas envolveu uma leitura minuciosa de 103 artigos de periódicos encontrados por meio de uma revisão sistemática adaptada da literatura, que incluiu, além dos processos tradicionais, um estudo cienciométrico e uma análise de bola de neve. Como resultado, descobriu-se que as principais incertezas consideradas estão relacionadas a tempo, custo e recursos. Além disso, foi possível observar que não existe uma única técnica consolidada para incorporar incertezas nos métodos de planejamento, mas sim uma combinação de diferentes técnicas, desde as mais tradicionais com análise analítica até as mais contemporâneas com algoritmos de inteligência artificial.

ABSTRACT

Global crises, such as pandemic and wars, bring to light how construction projects can be impacted by unexpected events that are typically overlooked by planning teams. Therefore, the goal of this study is to review the literature

to understand how uncertainties are being considered in construction planning methods and, what are the next steps to face new crises. By doing so, the authors mapped the traditional variables that are included as uncertainties in planning methods, such as project time and cost, as well as the unusual variables that are not typically included as uncertainties in the methods, such as safety and sustainability issues. The state-of-the-art of planning methods with uncertainties entailed a thorough reading of 103 journal articles found through an adapted systematic literature review, which included, in addition to traditional processes, a scientometric study and a snowballing analysis. As a result, it was discovered that the main uncertainties considered are related to time, cost, and resources. Furthermore, it was possible to observe that there is no single consolidated technique for incorporating uncertainties in planning methods, but rather a combination of different techniques, ranging from the most traditional with analytical analysis to the most contemporary with artificial intelligence algorithms.

RESUMEN

Las pandemias y guerras revelan cómo los proyectos de construcción son impactados por eventos inesperados que los planificadores suelen ignorar. Por tanto, el objetivo de este estudio es revisar la bibliografía para comprender cómo se tienen en cuenta las incertidumbres en los métodos de planificación de la construcción y cuáles son los próximos pasos para hacer frente a las nuevas crisis. Para ello, los autores mapearon las variables tradicionales que se incluyen como incertidumbres en los métodos de planificación, como el tiempo y el coste del proyecto, así como las variables inusuales que no suelen incluirse como incertidumbres en los métodos, como las cuestiones de seguridad y sostenibilidad. El estado del arte de los métodos de planificación con incertidumbres supuso una lectura de 103 artículos de revistas encontrados mediante una revisión bibliográfica sistemática, que incluyó, además de los procesos tradicionales, un estudio cienciométrico y un análisis de snowballing. Como resultado, se descubrió que las principales incertidumbres consideradas están relacionadas con el tiempo, el coste y los recursos. Además, se pudo observar que no existe una única técnica consolidada para incorporar las incertidumbres en los métodos de planificación, sino más bien una combinación de diferentes técnicas, que van desde las más tradicionales con análisis analíticos hasta las más contemporáneas con algoritmos de inteligencia artificial.



INTRODUÇÃO

Durante a atual crise global causada pela pandemia de Covid-19 e pela guerra na Ucrânia, a indústria da construção acende as luzes para melhorar a previsibilidade e a contingência de risco nos contratos. As matérias-primas registaram rápidas flutuações de preços, levando os investidores financeiros a transferir as suas carteiras para indústrias de baixo risco. No entanto, como é sabido, a indústria da construção é caracterizada pela aleatoriedade e pela incerteza, aumentando o nível de vulnerabilidade a acontecimentos imprevisíveis, o que não é apelativo para os investidores.

Muitos fatores contribuem para as incertezas inerentes que surgem durante as obras. Por exemplo, Laufer e Cohenca (1990) conduziram uma pesquisa e descobriram que a conclusão da fase de projeto, experiências anteriores, oferta de mão de obra, condições climáticas e subjetividade do planejador são fatores que têm um alto impacto nos resultados do planejamento da construção. Como resultado, é quase obrigatório nos tempos turbulentos de hoje considerar as incertezas nos métodos de planejamento da construção para incluir a variabilidade dessa indústria de forma mais explícita e, assim, atrair mais investimento.

Definir incerteza é uma tarefa difícil. A incerteza é a falta de conhecimento sobre uma situação em que não se entende os valores, os intervalos possíveis ou se o resultado será positivo ou negativo (Zheng & Carvalho, 2016). Ao contrário do risco, que é comumente associado a cenários negativos conhecidos (ameaças), as incertezas ocorrem antes dos riscos (Feng et al., 2018) e podem levar às ameaças ou oportunidades (Zheng & Carvalho, 2016). Em outras palavras, só se conhece os riscos se as incertezas forem compreendidas de antemão. Embora o risco seja equivalente à variabilidade numérica, a incerteza pode estar associada ao caos e sem qualquer controle sobre os eventos probabilísticos (De Meyer et al., 2002).

Observe que existem diferentes níveis de incerteza. De acordo com Walker et al. (2013) esses são cinco: o nível mais baixo (1) refere-se a um modelo de sistema único que orienta em apenas uma direção; e o nível superior (5) ocorre quando não existe um modelo de sistema conhecido ou mesmo resultados conhecidos. Esta última também é conhecida como incerteza profunda, conforme definida por Lempert et al. (2003), e é aquele aplicável ao planejamento de construção de projetos inusitados, como projetos de infraestrutura, conforme (Feng et al., 2022). Isso porque nesses projetos também devem ser considerados outros contextos além das questões técnicas, como questões humanas, políticas, sociais e ambientais, aumentando, assim, a dificuldade na definição de incertezas e na escolha do modelo a ser utilizado.

Então, como os planejadores de construção lidam com as incertezas durante o planejamento? Esta é a questão central do presente estudo, que está dividido em cinco seções. Assim, o objetivo do artigo é fornecer uma visão abrangente do estado da arte em planejamento de construção com incertezas e identificar lacunas de conhecimento. O contexto da pesquisa é apresentado na primeira seção e a fundamentação teórica é apresentada na segunda. A metodologia da pesquisa é explicada na terceira seção, seguida pela quarta seção, que contém as principais discussões sobre incertezas nos métodos de planejamento da construção. A



quinta seção resume então o desenvolvimento do estudo, bem como as principais contribuições e limitações.

FUNDAMENTO TEÓRICO

A indústria da construção e seus desafios com métodos de planejamento

Segundo o relatório McKinsey (Ribeirinho et al., 2020), a indústria da construção responde por 13% do PIB mundial e seguindo o relatório estatístico brasileiro (CBIC, 2023), uma média de 5,3% no Brasil. Por trás destes números estão os efeitos sociais, como a criação de emprego e a geração de rendimentos. Além disso, o negócio da construção foi duramente atingido por crises mundiais, como a epidemia de Covid-19. Segundo o Instituto Brasileiro de Estatística (IBGE, 2023), a Covid-19 causou uma queda de 2% na participação do PIB na construção. Então, conforme indicado nos relatórios globais de construção da McKinsey (Ribeirinho et al., 2020), as implicações dessas ocorrências são tipicamente exigências da indústria por novas tecnologias destinadas principalmente a aumentar a eficiência. Na verdade, como afirmado por Shibani et al. (2020) e Edmundo et al. (2018), durante as piores crises globais da história, novas tecnologias “apareceram” na indústria da construção para aumentar a produtividade e, como resultado, puxar a recuperação econômica.

No entanto, às vezes há um efeito colateral prejudicial na busca incessante por melhor produtividade. De acordo com Enshassi et al. (2009), houve aumento de acidentes de trabalho na indústria da construção nos mesmos períodos. Mesmo que os países em desenvolvimento tenham uma menor representatividade na construção, os efeitos negativos das crises globais podem ser mais fortes nos países em desenvolvimento do que nos países ricos. Como resultado, os planejadores de construção desempenham um papel crítico ao levar em conta essas questões e incertezas nos métodos de planejamento e, portanto, durante a fase de construção.

Um dos primeiros estudos sobre incerteza no planejamento da construção foi conduzido pelo programa Fleet Ballistic Missile na década de 1950, conforme descrito por Touran (1986) e Williams (1999). Nesta iniciativa, o método Program Evaluation and Review Technique (PERT) foi proposto por Malcolm et al. (1959) para introduzir variáveis de entrada probabilísticas no Método do Caminho Crítico (CPM), que é a técnica mais utilizada para planejamento de construção, mas de natureza determinística. Vale ressaltar que o CPM foi idealizado quase ao mesmo tempo por Kelley e Walker (1959), que se inspiraram no gráfico de Gantt proposto por Clark em 1922 e posteriormente adaptado com o conceito de rede antecessor por Fondahl em 1962, mas sempre mantendo sua natureza determinística, conforme afirma Hadipriono (1988). Seguindo o método PERT/CPM, surgiram outras técnicas derivadas para lidar com incertezas, como a Técnica de Avaliação e Revisão Gráfica (GERT) proposta por Moore e Clayton (1976). A rede antecessora nesta abordagem trabalha com nós determinísticos e probabilísticos com operadores adicionais à técnica PERT. Como resultado, Kavanagh (1985) considerou o GERT uma metodologia complexa e refinada, cujo uso é desafiador para planejadores que não têm experiência com análise estatística e tópicos derivados.



Mais tarde, em 1988, Hadipriono propôs um método dedutivo baseado na análise de árvore de falhas para considerar incertezas no planejamento de construção, que é aplicável tanto a análises determinísticas quanto a análises não determinísticas. O método Modified Fault Tree Networking (MFTN) adiciona ao CPM inter-relacionamentos causais entre eventos que podem causar problemas de agendamento. Esta abordagem segue a recomendação feita por Caron et al. (1998) em relação ao fluxo do processo de planejamento, que deve começar pelo final. Por exemplo, você pode primeiro estabelecer os prazos e depois definir as entregas e os processos de aquisição com base nessas datas. Usando esta lógica, Hadipriono (1988) argumenta que o MFTN é um método de planejamento de construção útil para identificar atividades e sequências de construção que têm maior probabilidade de contribuir para atrasos no cronograma.

Muitas técnicas de planejamento de construção foram desenvolvidas durante os períodos mencionados para otimizar os processos de construção repetitiva e para lidar com estimativas de custos e riscos (Russell & Wong, 1993). Ock e Han (2010), por exemplo, propuseram um método baseado em *fuzzy* para calcular os riscos associados às incertezas em outros métodos. A abordagem da Linha de Balanço (LOB) é outra abordagem focada na construção repetitiva que permite que a produtividade e as taxas de produção sejam consideradas juntamente com a abordagem PERT, mas de forma determinística (Kavanagh, 1985). O problema com essa análise determinística é que ela normalmente resulta em estimativas otimistas, porque não incorpora incertezas e variáveis aleatórias no plano de construção (Touran, 1986). Na verdade, segundo Bacon et al. (1996), quando aliado a uma análise de risco inadequada, esse cenário otimista pode tornar inacessíveis grandes projetos de infraestruturas construídos em países em desenvolvimento.

Na verdade, como afirma Lee et al. (2009), em projetos de infraestrutura que envolvem novas tecnologias, os gestores de projetos normalmente aplicam uma grande margem em comparação com projetos de construção para cobrir muitas incertezas que os métodos tradicionais de planejamento não levam em conta. Como resultado, para esse âmbito de projeto, a estimativa de contingência é crítica (Tseng et al., 2009), e simulações computacionais são normalmente utilizadas para superar as desvantagens dos métodos de planejamento tradicionais. Neste contexto, é importante mencionar a simulação de Monte Carlo (MC), que segundo Woolery e Crandall (1983) é uma técnica aceitável para realizar análises estocásticas em modelos de redes de projetos grandes e complexos, e, portanto, aplicável para atividades de construção. No entanto, Manik et al. (2008) enfatizaram que as simulações MC necessitam de uma quantidade significativa de tempo e poder computacional, e Lee (2005) afirmou que essas simulações são um complemento útil aos métodos de planejamento tradicionais. Da mesma forma, alguns métodos estocásticos baseiam-se em métodos determinísticos (por exemplo, CPM), conforme demonstrado pelo trabalho de Kokkaew e Chiara (2010). Os autores propuseram o Método do Caminho Crítico Estocástico (SCPM) naquele estudo, que combina o caminho crítico com simulações MC e análise envolvente. Ao fazer isso, os autores argumentam que é possível explicar o subjetivismo do



gestor na estimativa do cronograma. De acordo com Tseng et al. (2009), outra característica da simulação MC é a exigência de melhor histórico e manutenção dos dados, que pode incluir técnicas de pré-processamento e mineração de dados. Além disso, de acordo com Du et al. (2016), a simulação MC maximiza os benefícios dos modelos de cadeia de Markov, o que explica porque muitos estudos combinam MC com análise estocástica (Hassan et al., 2021; Hosny et al., 2022; Kammouh et al., 2022; Zhong et al., 2022; Zhong et al., 2016).

Deve-se notar que as técnicas de simulação não se limitam ao MC; por exemplo, Halpin (1977) propôs o sistema Cyclone, que é baseado em Simulação de Eventos Discretos (DES), para estudar operações de construção. Na verdade, DES é uma técnica importante que está sendo utilizada por diversos estudos na área de planejamento de construção para integração com modelos de informação de construção (Abbasi et al., 2020), análise *fuzzy* (Szczesny & König, 2015), abordagens probabilísticas (Feng et al., 2020; 2022), entre outros.

Além disso, os métodos de planejamento de construção frequentemente empregam análises probabilísticas para estimar a duração da atividade com base em dados históricos. Naturalmente, existem incertezas inerentes a essa base de dados histórica que podem afetar os resultados da estimativa. Funções de densidade de probabilidade (PDF) são comumente utilizadas neste tipo de abordagem, conforme evidenciado pelos estudos de AbouRizk e Halpin (1992) e Lee (2005). Embora AbouRizk e Halpin (1992) tenham sugerido o uso da distribuição Beta para estimar a duração das atividades de movimento da terra, as PDFs são difíceis de determinar. Além disso, como afirma Touran (1986), os utilizadores gerais normalmente não possuem o conhecimento de análise estatística necessário para incorporar técnicas probabilísticas nos métodos de planejamento.

Na verdade, de acordo com Jaśkowski e Sobotka (2006), tempo e custo são os indicadores de tomada de decisão mais utilizados, o que explica porque essas duas variáveis são frequentemente utilizadas em métodos de planejamento de construção que têm em conta incertezas. Além disso, segundo Ock e Han (2010), o sucesso de um projeto de construção está relacionado a três fatores: tempo, custo e qualidade, mas o “caminho do risco”, como os autores o chamam, pode incluir atividades que não são incluídos no caminho crítico e estão relacionados a outras áreas. No entanto, vários autores (Kavanagh, 1985; Ock & Han, 2010; Ozdemir & Kumral, 2017; Yang & Chang, 2005) criticam os métodos tradicionais por ignorarem os recursos ou acreditarem que os recursos são ilimitados. Na verdade, os recursos são os meios para atingir um fim (Vaziri et al., 2007), que podem ser variáveis de tempo e custo, mas a sua omissão no planejamento da construção resulta em cenários irrealistas. Como resultado, as estimativas de cronograma podem ser excessivamente otimistas (Kavanagh, 1985), causando problemas práticos no local de trabalho, como ajustes contratuais de cronograma. Portanto, CPM, PERT, gráficos de barras e outros métodos tradicionais são insuficientes para resolver o problema de alocação de recursos em canteiros de obras, e o assunto é amplamente discutido em estudos de planejamento de canteiros de obras, que propõem desde programação linear até algoritmos genéticos (Yang & Chang, 2005).



Nessa linha de raciocínio é introduzido o trabalhador ou mão de obra, considerado o tipo de recurso mais crítico por Vaziri et al. (2007), quando comparado a equipamentos e materiais. No entanto, o dimensionamento da mão de obra tem sido tradicionalmente feito com base em experiências passadas, em vez de utilizar ferramentas ou métodos específicos. Com base nessa descoberta, Elhakeem e Hegazy (2005) propuseram o Modelo de Escalonamento Distribuído (DSM), que é um modelo baseado em conceitos de CPM, taxas de progresso e estimativa de equipe de trabalho; e tem como objetivo a otimização da alocação de recursos nas operações de construção e manutenção. Diferentemente do DSM, que emprega cálculos de ábaco e formulações determinísticas, outros autores propõem métodos mais avançados, como o estudo de Zahraie e Tavakolan (2009), que emprega algoritmos genéticos associados à lógica *fuzzy* para otimizar tempo e custo e ao mesmo tempo alocar e colocar mão de obra. Da mesma forma, Tomczak et al. (2019) propuseram um modelo matemático conceitual de otimização multicritério com processos não lineares sob condições determinísticas, com o objetivo de minimizar o tempo de inatividade da equipe e a duração total do projeto.

Ainda mais específica é a questão da segurança no trabalho, que é frequentemente negligenciada pelos métodos de planejamento da construção, mas que pode inegavelmente interferir nos principais indicadores de tempo e custo. O impacto da segurança no trabalho na duração das atividades de construção é investigado no estudo desenvolvido por Francis (2019) e é proposto um método que considera os dois temas concomitantemente para evitar erros na tomada de decisão. Vale ressaltar que a consideração simultânea de variáveis nos métodos de planejamento da construção já foi estudada por diversos autores, entre eles Isidore et al. (2001), que propõem a integração de simulações de tempo e custo para entender a correlação entre eles.

Quando comparada às obras verticais, a preocupação com as questões de segurança e saúde ocupacional é ainda mais importante no âmbito das obras de infraestrutura, pois normalmente envolvem equipamentos mais pesados e maior número de trabalhadores em campo. Segundo Elhakeem e Hegazy (2005), existem três decisões fundamentais neste tipo de construção: o número de equipes disponíveis; o método construtivo utilizado em cada atividade; e a ordem de execução das atividades em cada espaço. Certamente, a priorização de atividades é um estudo que tem despertado o interesse de pesquisadores como Bruni et al. (2011), que propõem novas regras de priorização baseadas em programação heurística e análise estatística, com o objetivo de levar em conta incertezas e restrições de recursos no planejamento da construção. Ao contrário de outros métodos de planejamento com incerteza, o método dos autores foi projetado para ter uma *interface* gráfica fácil de usar e amigável, o que tem auxiliado na difusão dos métodos estocásticos na indústria da construção.

Além disso, a logística e o dimensionamento de equipamentos podem ter um impacto significativo no risco de acidentes no canteiro de obras em projetos de infraestrutura. Com isso, o dimensionamento de frotas é um problema que tem chamado a atenção dos estudiosos de processos estocásticos no planejamento de obras. Ozdemir e Kumral (2017) propuseram o uso de processos estocásticos no método determinístico Match Factor para considerar riscos



ao longo do tempo, bem como simulações de Monte Carlo para entender a disponibilidade dos equipamentos ao longo do tempo. Os autores conseguiram demonstrar através de estudos de caso que os métodos tradicionais geram estimativas exageradas ou pessimistas, enquanto o método estocástico proposto gera cenários mais realistas, mas não necessariamente otimistas.

Resumindo, os planejadores começaram a considerar as incertezas na construção utilizando variações da abordagem CPM e preocuparam-se principalmente com a questão do tempo (duração da construção). O modelo de rede de planejamento foi então aprimorado por métodos lógicos, o que possibilitou a criação de mapas de processos para simular a sequência de construção. Porém, a simulação em si só foi possível devido aos avanços no poder de processamento dos computadores, que possibilitaram modelos de simulação de Monte Carlo e, como resultado, a consideração de múltiplas variáveis além do tempo. Além disso, desafios específicos em projetos de construção, como a construção repetitiva, levaram ao desenvolvimento de novas técnicas que não eram inteiramente baseadas no CPM e estavam mais intimamente relacionadas com a análise estatística. Ao fazê-lo, a base teórica revelou que existem muitos métodos de planejamento de construção que se originaram nas últimas décadas e devido à evolução tecnológica, mas a compreensão dos diferentes níveis de incerteza parece manter esse tópico num nível superficial de implementação.

Abordagens de Revisão de Literatura

Segundo Denyer e Tranfield (2009), a Revisão Sistemática da Literatura (RSL) é uma abordagem para encontrar descobertas e lacunas de pesquisa em áreas científicas de forma imparcial e objetiva. Embora o método SLR busque a objetividade, os parâmetros do pesquisador, como termos de pesquisa e filtros, podem ser tendenciosos devido à perspectiva pessoal, experiência e conhecimento. Como resultado, este artigo propõe a utilização de revisões sistemáticas adaptadas, conforme sugerido por He et al. (2017), incluindo análise de coocorrência de termos para compreender melhor os tópicos cobertos por muitos artigos sem exigir uma leitura aprofundada e uma análise de bola de neve como etapa adicional. Ao fazer isso, é possível compreender melhor se os termos de pesquisa estão corretos e obter respostas preliminares às questões de pesquisa.

Tradicionalmente, segundo Khan et al. (2003), a RSL segue um conjunto de etapas padronizadas: formulação de perguntas; localização do estudo; seleção e avaliação; análise e resumo; e resultados e relatórios. O primeiro passo é descrever adequadamente o tema de pesquisa em questão, o que ajudará a direcionar a busca por artigos relevantes. O passo seguinte é fazer uma pesquisa na base de dados de artigos usando termos e filtros de pesquisa previamente definidos. Como resultado, o pesquisador recebe uma lista de estudos que devem ser selecionados e revisados utilizando critérios de inclusão e exclusão, que podem incluir idioma, escopo do estudo e outros critérios relevantes para a revisão da literatura. A quarta etapa compreende examinar minuciosamente a seleção final dos estudos para resumir cada contribuição, limitações e assuntos relevantes para responder às questões da RSL. Por



fim, a quinta etapa diz respeito aos resultados e relatórios, que incluem gráficos que representam os *insights* e tabelas que resumem os resultados da SLR, entre outros produtos.

A análise bola de neve é outro método para conduzir uma revisão de literatura. Esse método envolve o pesquisador utilizando uma lista de referências ou citações de artigos conhecidos sobre o assunto (Wohlin, 2014). Portanto, é essencialmente um mergulho profundo nas referências de determinados artigos. A segunda e a terceira etapas da análise bola de neve diferem daquelas da SLR. Em vez de uma busca estruturada em bases de dados, a abordagem bola de neve foca nos artigos-chave de um determinado assunto, e com esses artigos-chave, os pesquisadores utilizam critérios de inclusão e exclusão para filtrar a lista de referências, e então iniciam a análise, resumo, resultados e relatórios semelhantes ao SLR. A bola de neve pode ser feita de duas maneiras: para frente ou para trás. As referências nas publicações importantes são utilizadas na pesquisa anterior. A citação dos principais artigos é usada na última pesquisa.

A qualidade da lista final de estudos, entretanto, pode ser influenciada pela experiência do pesquisador, pois ele pode não compreender completamente quais são as publicações significativas em uma área específica. Além disso, segundo Jalali e Wohlin (2012), a análise bola de neve é simples de entender e replicar, ao contrário da SLR, que contém procedimentos mais difíceis para um pesquisador novato. No entanto, como desvantagem, “a falta de representatividade aleatória” no estudo bola de neve pode resultar em conclusões tendenciosas, segundo Geissdoerfer et al. (2017).

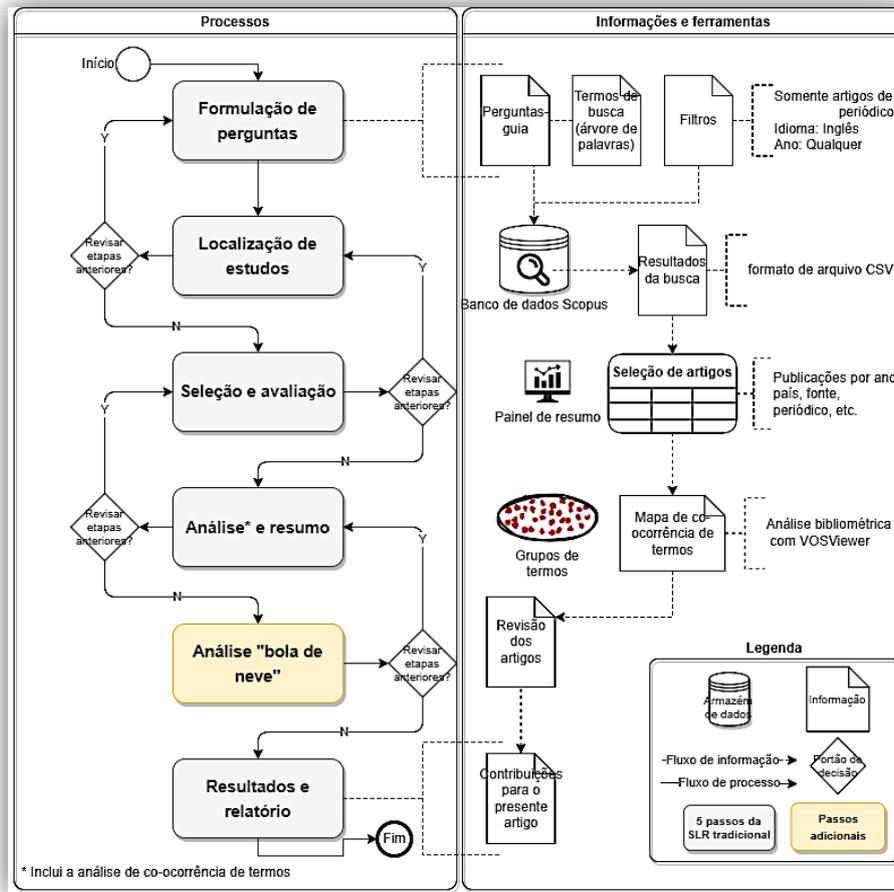
Deve-se notar que a técnica de bola de neve pretende ser um complemento e não um substituto da SLR (Wohlin, 2014).

METODOLOGIA

Nesta seção, é proposta uma revisão sistemática da literatura adaptada, combinando RSL e análise de bola de neve, utilizando os seguintes conjuntos: formulação de perguntas; localização do estudo; seleção e avaliação; análise e resumo; análise de bola de neve; e resultados e relatórios. Todas as etapas e informações utilizadas e extraídas durante os processos SLR adaptados estão resumidas na Figura 1.



Figura 1. Workflow que representa a SLR adaptada utilizada na metodologia.



Fonte: Autores (2023).

As questões SLR neste estudo são:

- Como os métodos de planejamento de construção lidam com as incertezas?
- Que tipos de incertezas são consideradas nos métodos de planejamento de construção?

Em seguida, foi realizada uma ampla pesquisa bibliográfica, na qual foi utilizada a base de dados Scopus para identificar estudos relevantes, utilizando critérios de inclusão e exclusão. Basicamente, o mecanismo de busca foi configurado para encontrar apenas artigos de periódicos escritos em inglês, sem limite de período e com os termos de busca, derivados das questões iniciais, ocorrendo no título, resumo ou palavras-chave. Os termos de pesquisa envolveram palavras relacionadas a métodos de planejamento de construção (por exemplo, "plano de construção*" e "cronograma de construção*") e incertezas (por exemplo, "incerto*" e "risco*").

Assim, foram descobertos 444 estudos utilizando os termos e filtros de busca da base de dados. Vale ressaltar que 67% dos artigos encontrados foram obtidos com o termo de busca "risco*" e 33% com "incerto*". Esta distinção indica que os estudos estão mais preocupados com a variabilidade e cenários controlados do que com cenários completamente desconhecidos. É importante notar também que alguns autores podem não ter o mesmo entendimento das distinções entre risco e incerteza, como sugerido por (Feng et al., 2022). O presente estudo concentrou-se em cenários de incerteza que são considerados nos métodos de planejamento de construção.



“restrição de recursos” estão incluídos no *cluster* identificado para “duração” e podem indicar possíveis técnicas usadas para considerar vários tipos de incertezas no método de planejamento. O terceiro termo mais utilizado é “risco”, que pode ser atribuído a possíveis mal-entendidos sobre a distinção entre incerteza e risco, conforme discutido na seção de introdução. Termos como “risco”, “trabalhador”, “eficiência” e “pesquisa” foram agrupados no mesmo *cluster*. Existe um *cluster* envolvendo os termos “produtividade” e “conclusão de projetos”, quase misturado com o *cluster* anterior, sem conclusão clara. Por outro lado, existe um agrupamento com termos como “recurso”, “otimização” e “algoritmo”, que novamente indica possíveis técnicas e métodos de planejamento de construção que levam em conta as incertezas. O *cluster* final descoberto estava associado a “custo”, “segurança” e “simulação de Monte Carlo”, que está mais intimamente relacionado ao *cluster* de risco do que aos de duração e recursos.

A amostra final foi então lida minuciosamente para responder às questões da RSL. Esta etapa incluiu uma análise de sensibilidade para classificar os estudos com base nos tipos de incertezas consideradas (custo, impacto ambiental, segurança, recursos, *layout* do local, clima, qualidade e outros) e nas técnicas utilizadas (lógica *fuzzy*, aprendizado de máquina, discreto simulação de eventos, análise probabilística, simulação de Monte Carlo, processos estocásticos, modelagem de informações e outros) levando em consideração, mas não se limitando, aos *clusters* sugeridos pela análise bibliométrica.

Em seguida, foi realizada uma análise *forward snowballing* para coletar artigos que não foram encontrados pelo mecanismo SLR, mas foram incluídos nas referências e estavam relacionados ao escopo deste trabalho. Esta abordagem foi aplicada nos principais artigos observados nos resultados da SLR.

Na etapa final da RSL, os autores sintetizaram os achados dos estudos selecionados para identificar discussões e conclusões interessantes relacionadas à formulação da questão. Além disso, os autores também propõem a criação de um quadro resumo resumindo todas as principais sugestões para trabalhos futuros descritas na RSL. Esta etapa é fundamental para a compreensão do cenário geral do tema no contexto das perguntas norteadoras. Pretende-se responder, ainda que parcialmente, às questões da RSL e fornecer material substancial para orientar novos estudos que visem reforçar os principais trabalhos identificados ou preencher lacunas científicas.

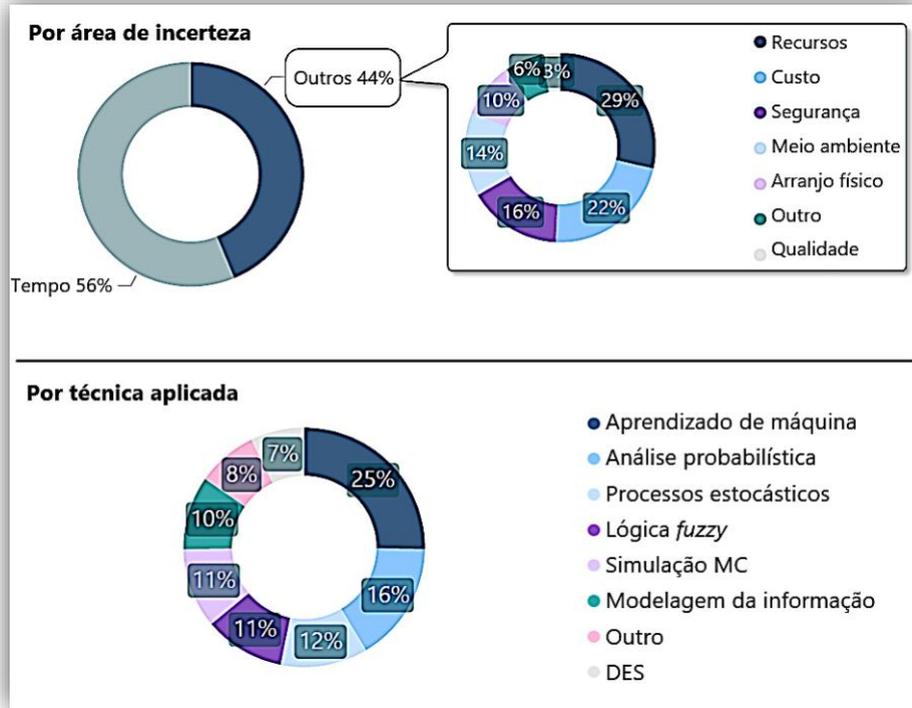
RESULTADOS E DISCUSSÃO

A categorização revelou que a maioria dos artigos (56%) trata de incertezas através de variáveis temporais, o que era esperado visto que os métodos de planejamento de construção normalmente trabalham com prazos e duração das atividades. Quando examinados os artigos que não focam no tempo, quatro áreas principais representam 81% dos demais tópicos estudados como incertezas nos métodos de planejamento de construção: recursos (29%); custo (22%); meio ambiente (14%); e segurança (16%). Vale ressaltar também que muitos trabalhos combinam essas áreas, como o modelo de estimativa de duração de construção proposto por Lee et al. (2009), que considera tanto as condições climáticas (questão



ambiental) quanto os ciclos de trabalho (questão temporal). Esses agrupamentos seguem uma divisão quase idêntica à mostrada na Figura 3, com alta ocorrência para as quatro áreas citadas. Além disso, a Tabela 1 mostra especificamente a incerteza relacionada, o método de solução e o uso ou não de Inteligência Artificial (IA) adotado nos artigos selecionados dos últimos seis anos.

Figura 3. Artigos divididos por área de incerteza e técnica aplicada.



Fonte: Autores (2023).

Tabela 1. Artigos selecionados publicados desde 2018: incertezas relacionadas; soluções adotadas; e uso de IA.

Artigos	Incertezas relacionadas							Métodos de solução							AI Usada?	
	Custo	Ambien.	Fonte	Segura.	Tempo	Qualid.	Outro	BIM	DES	FL	MC	ML	Probab.	Stoch.		Outro
Hu et al. (2023)				•				•				•				•
Zhang et al. (2023)				•												•
Chen et al. (2023)					•						•	•				•
Adedokun et al. (2023)							•					•				•
Wang et al. (2023)					•			•	•			•				•
AlJassmi et al. (2023)					•							•				•
Hosny et al. (2022)							•	•			•			•		
Kammouh et al. (2022)					•											•
Hong et al. (2022)					•											•
Sharma et al. (2022)	•	•	•		•							•				•
Kedir et al. (2022)			•		•							•				•
Kammouh et al. (2022)					•						•		•	•		
Feng et al. (2022)					•			•								•
Milat et al. (2022)					•							•				•
Canca et al. (2022)					•		•							•	•	•
Ramani et al. (2022)				•	•											•
Fitzsimmons et al. (2022)					•						•	•				•
Alhussein et al. (2022)							•									•
Chen et al. (2021)							•				•	•	•			
Sarkar et al. (2021)					•											•



Outro subconjunto comum de incertezas temporais é o *buffer* de tempo, que é essencial para simular cenários otimistas e pessimistas na duração da atividade. Na verdade, Nasir et al. (2003) afirmam que a definição de valores de duração superior e inferior pode ter impacto na gestão de risco. Por esse motivo, Sarkar et al. (2021) propuseram um Gerenciamento de Projetos de Cadeia Crítica melhorando o dimensionamento do *buffer* por meio da integração de múltiplas incertezas que afetam o cronograma de construção, como desastres ambientais e restrições de recursos.

Observe que as incertezas são normalmente tratadas como riscos, especialmente quando estão relacionadas ao tempo. Considere o estudo de Chen et al. (2023), que investigaram a interdependência dos riscos no cronograma de construção de edifícios utilizando redes Bayesianas e simulação MC. Eles sugeriram uma estratégia de planejamento que, quando comparada aos métodos padrão (CPM e PERT), resultou em tempo de construção mais preciso devido à sua capacidade de prever a sequência de riscos. Um aspecto interessante do estudo realizado por Chen et al. (2023) é que sugeriram que a literatura é limitada em abordagens que incluem interdependência de risco, o que poderia ser interpretado como uma falta de compreensão sobre incertezas mais profundas.

Voltando à discussão sobre *buffers* de tempo, Ma et al. (2014) propuseram uma estrutura para dimensionar *buffers* e alocar recursos com base no conceito de cadeia crítica, de forma semelhante ao estudo de Sarkar et al. (2021). Além disso, enfatizaram que melhorar o fluxo de informações pode reduzir as incertezas nas atividades de construção, isso é o que o estudo de Abbasi et al. (2020) trata. Os autores propuseram um método de planejamento de construção que utiliza informações extraídas de um modelo Building Information Modeling (BIM) e o DES busca durações ideais de atividades que representem cenários realistas.

A leitura completa dos artigos selecionados revelou que a modelagem de informações, principalmente relacionadas ao BIM e ao Projeto e Construção Virtual (VDC), é amplamente utilizada em propostas de métodos de planejamento de construção, como o trabalho desenvolvido por H. Li et al. (2009). Os autores investigaram protótipos de construção virtual criados com BIM e VDC para analisar e otimizar o cronograma através da visualização de cenários “*what-if*”. Vale ressaltar que a solução nesse caso é influenciada em parte pelo subjetivismo do planejador em relação ao modelo virtual, trazendo de volta a importância de estudos como Mulholland e Christian (1999) e AbouRizk e Sawhney (1993).

Para resumir, pode-se lançar alguma luz sobre os atuais métodos de planejamento que têm em conta incertezas relacionadas com questões de tempo. Primeiro, a duração da atividade é considerada em diferentes cenários, que vão do pessimista ao otimista. Já é resultado da implementação do PERT e da sua utilização como modelo para novas abordagens. Em segundo lugar, o intervalo de tempo é essencial não só para cobrir incertezas durante a construção, mas também para realizar uma gestão de risco significativa. Terceiro, a visualização do modelo é um recurso que tem sido investigado para auxiliar na busca de melhores soluções e no impacto do subjetivismo no cronograma.



Outro ponto importante de discussão são as restrições de recursos. Os métodos de planejamento de construção têm tradicionalmente assumido que os recursos são ilimitados e, portanto, sempre disponíveis durante a fase de construção, mas esse não é o caso. Para resolver esse problema, muitos estudos estão usando algoritmos de IA. Li et al. (2018), por exemplo, utilizaram algoritmos de otimização multiobjetivo e metaheurísticas, Kim e Ellis (2009) apresentaram um AG híbrido e adaptativo, e Leu et al. (1999b), Leu e Hung (2002) e Leu et al. (1999a), propuseram um AG para encontrar soluções ótimas em problemas de alocação de recursos.

Contudo, devido à sua multidimensionalidade, os recursos podem ser abstratos e difíceis de planejar. O termo “recursos” refere-se aos equipamentos, trabalhadores, materiais e outros produtos auxiliares necessários à execução das atividades de construção. Como resultado, Hosny et al. (2020, 2022) propuseram uma ferramenta para modelar espaços de trabalho e detectar interferências entre eles para obter uma melhor compreensão de algumas incertezas que podem ser avaliadas antes do início da construção. No entanto, outros estudos tratam dos recursos durante o processo construtivo, sugerindo métodos de planejamento “vivos”, como o trabalho de AlJassmi et al. (2023). Seu trabalho consiste em um sistema de planejamento baseado em rede neural que recupera automaticamente o cronograma de construção, coletando e analisando a taxa de produtividade dos trabalhadores regularmente (diariamente ou semanalmente).

Ao analisar estudos que discutem incertezas de custos, foram identificadas duas subáreas: estimativa de custos e fluxo de caixa. Cheng et al. (2013) propuseram um modelo de inferência baseado em Support Vector Machine (SVM) e séries temporais, no qual FL é utilizado para trabalhar com problemas de fluxo de caixa e estimativas de construção. Em relação à estimativa de custos, Chakraborty et al. (2020) destacaram, após comparar múltiplos algoritmos de ML, que é recomendado o uso de um modelo de ML híbrido para lidar com incertezas na questão dos custos, associado a uma abordagem probabilística.

É importante notar que muitos estudos combinam custo com outras categorias de incerteza, como tempo (Hassan et al., 2021), impactos ambientais (Sharma et al., 2021) e assim por diante. Uma dessas categorias, a segurança, é considerada pelos autores como aquela para a qual as incertezas são mais difíceis de estimar, uma vez que está associada a fatores humanos como emoções, saúde e uma infinidade de variáveis aleatórias que vão além de um número ou um conjunto de dados históricos.

Incertezas Relacionadas a Outras Variáveis

Em relação à questão da segurança, devido ao elevado nível de incerteza que envolve, desde um ataque cardíaco até uma explosão que pode resultar num acidente de construção, muitos autores realizam inquéritos por questionário para avaliar as incertezas. Por exemplo, Zolfagharian et al. (2014) propuseram uma ferramenta automática para planejamento de segurança baseada em uma matriz de riscos calibrada com uma pesquisa aplicada a gestores de segurança e de construção.



Modelagens e simulações de informações também são comumente utilizadas em estudos relacionados a incertezas de segurança. Benjaoran e Bhokha (2010) propuseram um sistema integrado baseado em regras que permite ao usuário avaliar e revisar o planejamento da construção por meio da visualização do modelo e, assim, visualizar potenciais acidentes de trabalho. Goh e Askar Ali (2016) apresentaram uma estrutura de simulação híbrida para facilitar a integração de incertezas de segurança e sequência de atividades de construção. Eles usaram DES, dinâmica de sistemas e simulação baseada em agentes para atingir esse objetivo. Às vezes, porém, as incertezas relacionadas à segurança exigem uma análise espaço-temporal. Hu et al. (2023), por exemplo, apresentaram uma estratégia para lidar com acidentes de segurança induzidos por operações de guindastes, com base em uma análise espaço-temporal baseada em um modelo BIM. Eles coletaram dados usando a metodologia BIM, aplicaram algoritmos de IA para realizar análises de caminhos (conectados à posição do guindaste) e visualizaram os resultados usando um mapa térmico de exposição a perigos.

Incertezas relacionadas aos aspectos cognitivos também foram identificadas nos resultados da RSL. Por exemplo, Alhussein et al. (2022) utilizaram métodos baseados em agentes para investigar o comportamento improvisado no planejamento da construção que emerge de incertezas imprevistas. Descobriram que soluções improvisadas são produzidas com mais frequência pelos gestores do que pelos trabalhadores. Deve-se notar que técnicas baseadas em agentes para lidar com incertezas são comuns na literatura recente, com numerosos trabalhos de pesquisa como os de Zhang e Lin (2022), Goh e Askar (2016), Abadi et al. (2021), Kadir et al. (2022).

O clima é outra questão comumente estudada em métodos de planejamento. Por exemplo, Pan (2005) aborda a incerteza da precipitação propondo uma abordagem de planejamento de construção que avalia o impacto da precipitação na duração da construção, utilizando dados históricos de precipitação e conhecimentos especializados.

Outros estudos vão além da categoria específica de incertezas, mas sim sobre inferência de riscos no planejamento de construção de projetos de infraestrutura. Chen et al. (2021) criaram um método que não requer dados observados e pode ser útil nos casos em que os dados históricos não estão disponíveis. Os autores empregaram simulação MC com redes bayesianas para inferir riscos na programação da construção de infraestrutura.

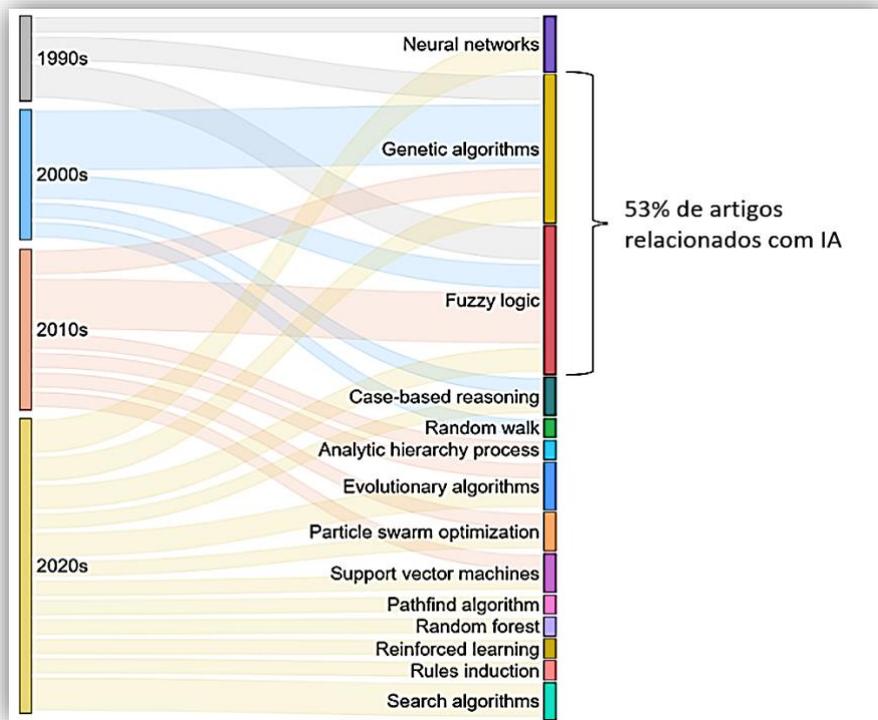
O Crescimento das Técnicas de IA

Além dos tipos de incertezas abrangidas pela presente RSL, são necessárias certas discussões sobre as estratégias utilizadas nesses métodos de planejamento. Historicamente, o SLR indicou que as incertezas eram frequentemente avaliadas usando análise estatística (Touran, 1986), formulações matemáticas (Woolery e Crandall, 1983) e simulação – tipicamente DES (Sawhney et al., 1998) e MC (Sukumaran et al., 2006). Na verdade, a Figura 3 mostra que quase 50% dos métodos de planejamento encontrados na SLR estão relacionados com essas técnicas tradicionais.



No entanto, estudos mais recentes encontrados na SLR revelaram que métodos de IA são comumente utilizados. Alguns métodos de planejamento de construção usam algoritmos evolutivos para lidar com otimização multiobjetivo (Tran & Long, 2018; Milat et al., 2022; Hassan et al., 2021), FL para lidar com dados incertos (Pawan & Lortherapong, 2015 ; Szczesny & König, 2015; Plebankiewicz et al., 2021), redes neurais para previsão de cronogramas em tempo real (AlJassmi et al., 2023), métodos de indução de regras para interpretar e avaliar cenários de construção (Feng et al., 2022), entre outros. A Figura 4 mostra um resumo das técnicas de IA reveladas na SLR. A utilização generalizada de FL e GA (53%) pode indicar que são as metodologias mais promissoras para ter em conta a incerteza nos procedimentos de planejamento de edifícios. No entanto, a outra parte (47%) dos métodos de IA utiliza outras formas que também podem ser vistas como uma promessa para retratar eventos aleatórios no plano de construção.

Figura 4. Técnicas de IA utilizadas ao longo do tempo nos métodos de planejamento de construção.



Fonte: Autores (2023).

Além disso, é importante notar que muitos estudos propõem métodos de planejamento híbridos que combinam técnicas tradicionais e contemporâneas, como o trabalho realizado por Fitzsimmons et al. (2022), que combinaram simulações MC com máquinas de vetores de suporte, uma técnica de IA bem conhecida, para prever atrasos em projetos e ao mesmo tempo levar em conta a incerteza. Além disso, a integração do FL com o GA foi relatada por Moon et al. (2015) e Cheng et al. (2013). O primeiro foi utilizado para considerar as variáveis aleatórias, enquanto o segundo foi utilizado para otimizar os resultados. Com efeito, alguns estudos já avaliaram abordagens de IA aplicadas em determinados temas de planejamento com incertezas, como Chakraborty et al. (2020), que analisaram seis algoritmos de IA para antecipar custos e descobriram que uma solução híbrida produz melhores estimativas.



Perspectivas para Trabalhos Futuros

O presente trabalho sugere que novos estudos possam considerar incertezas incomuns (não apenas de tempo, por exemplo) e soluções híbridas, que combinem métodos tradicionais com algoritmos avançados, no desenvolvimento de novos métodos de planejamento de construção. Mas é importante destacar as recomendações para trabalhos futuros que são fornecidas nos estudos selecionados. Os pesquisadores podem usar essas sugestões para direcionar seus estudos para preencher total ou parcialmente lacunas científicas e, como resultado, melhorar este campo de pesquisa.

No presente trabalho, vinte sugestões dos artigos revisados. Muitos autores sugeriram como trabalhos futuros a expansão de seus métodos para outros países, indústrias e dados mais detalhados, visando validar suas abordagens com diferentes ambientes de testes. Além disso, identificou-se que alguns estudos recomendam abordagens dinâmicas para lidar com dados reais e de campo, para criar uma espécie de “planejamento vivo”. Certamente, para viabilizá-lo, são necessários uma interface amigável e algoritmos avançados, outras duas recomendações dadas por alguns autores. Finalmente, alguns autores propuseram estudos cognitivos para melhor compreender o comportamento humano e as atitudes dos planejadores em relação ao planejamento da construção (Tabela 2).

Tabela 2. Sugestões para trabalhos futuros identificadas na RSL.

#	Sugestões para estudos futuros	Número de estudos relacionados
1	Expansão do contexto (aplicação em outras indústrias ou contextos)	10
2	Aumentando os dados de amostra (aplicação em mais detalhes)	6
3	Melhorias nos algoritmos	6
4	Desenvolvimento de abordagens dinâmicas para lidar com dados em tempo real	6
5	Captura de dados de campo com tecnologias de monitoramento e uso de dados reais	6
6	Expansão geográfica (implementação de métodos em outros países)	4
7	Consideração de múltiplas variáveis	4
8	Interface amigável	4
9	Melhor compreensão de variáveis e parâmetros	3
10	Desenvolvimento de microssimulação e micromodelagem para lidar com mais detalhes	3
11	Automatização de processos	3
12	Mais estudos de caso aplicando métodos existentes	3
13	Melhor desempenho computacional	2
14	Estudos cognitivos para compreender melhor o comportamento e a resiliência das pessoas	2
15	Criação de banco de dados de conhecimento com base em dados de campo e/ou experiências anteriores	2
16	Criação de bases de dados específicas para apoiar estudos semelhantes	2
17	Investigação de simulação híbrida	1
18	Melhorias nas formulações matemáticas	1
19	Consideração de condições de restrição.	1
20	Compreensão mais profunda das incertezas	1

Fonte: Autores (2023).



As respostas às perguntas sobre SLR

- Como os métodos de planejamento de construção lidam com as incertezas?

Existem várias maneiras pelas quais os métodos de planejamento de construção lidam com as incertezas, e algumas estratégias comumente usadas foram identificadas. Primeiro, conforme observado em Hossen et al. (2015), Mulholland e Christian (1999), Nasir et al., 2003, Rozenfeld et al. (2009), os planejadores utilizam técnicas de avaliação de risco para identificar fontes potenciais de incerteza e avaliar a probabilidade e impacto desses riscos durante o projeto de construção. Investigaram métodos para mitigar ou gerir esses riscos, tais como o desenvolvimento de planos de contingência e a aquisição de recursos adicionais. Em segundo lugar, foi descoberto em alguns estudos (Ansari, 2021; Chen et al., 2021; Ford et al., 2002; Tran & Long, 2018) que os métodos de planejamento lidam com incertezas confiando na flexibilidade e adaptabilidade. A flexibilidade permite que ajustes sejam feitos em resposta às mudanças nas circunstâncias causadas por fatores incertos. Construir contingências permite mudanças de escopo, e estar aberto às abordagens alternativas são exemplos disso. Terceiro, muitos dos métodos propostos fazem uso de recursos computacionais e simulações para melhor compreender vários cenários e sequências críticas que podem ocorrer durante a fase de construção. Seguindo os estudos desenvolvidos por Woolery e Crandall (1983) e Zhong et al. (2016), o MC é uma das técnicas mais utilizadas para fins de simulação. Contudo, métodos que utilizam DES, como os de Abbasi et al. (2020), Goh e Askar Ali (2016;) e Szczesny e König (2015), devem ser mencionados como uma abordagem para a compreensão de cenários de construção com incertezas. Finalmente, é apresentada a seguir uma breve discussão sobre o monitoramento da construção e as lições aprendidas. Alguns métodos de planejamento (Bi et al., 2015; Kammouh et al., 2022; Szczesny & König, 2015) estabelecem sistemas de monitorização contínua do projeto para identificar potenciais problemas antecipadamente e fazer os ajustes necessários. Existem também estudos focados na criação de bases de conhecimento, como Pan (2005), que avalia o impacto das chuvas na conclusão de projetos com base em dados históricos e experiências de especialistas. No geral, a chave para lidar com incertezas nos métodos de planejamento de construção envolve a identificação de fontes de incerteza, estratégias para coletar e modelar dados de construção, flexibilidade para trabalhar com muitos cenários possíveis e soluções computacionais, como simulações, para capturar múltiplas soluções e resultados causados por incertezas.

- Que tipos de incertezas são consideradas nos métodos de planejamento de construção?

De acordo com os resultados do SLR, as incertezas relacionadas ao tempo (duração da construção, atraso no projeto, taxas de produtividade, etc.) são as mais utilizadas nos métodos de planejamento da construção, seguidas por questões de recursos e custos. A razão para isso é, provavelmente, porque a gestão da construção tem sido tradicionalmente baseada em três pilares: tempo; custo; e recursos. Porém, após a leitura minuciosa dos artigos selecionados, descobriu-se que muitos métodos lidam com múltiplas variáveis ao mesmo tempo, como o estudo realizado por (Leu et al., 2001) para otimizar tempo e custo na construção, assunto de



trade-off às incertezas. Além disso, os resultados apontam para outras questões que foram investigadas por numerosos estudos, como qualidade, impactos ambientais e segurança. Em termos de questões de segurança, normalmente são utilizadas técnicas de simulação, como o trabalho realizado por (Wang et al., 2016), e bancos de dados históricos apoiam métodos de planejamento, fornecendo conhecimento prévio para desenhar cenários futuros possíveis, como a abordagem CHASTE (Rozenfeld et al., 2009). Da mesma forma, em termos de impactos ambientais, os dados históricos são frequentemente utilizados em métodos de planejamento associados a algoritmos de ML e análises *fuzzy*, como o trabalho desenvolvido por Pan (2005). Além disso, as técnicas mais utilizadas são algoritmos de ML e análise probabilística, com a análise estocástica vindo em terceiro lugar, com alguns estudos relativos a tempo, custo, recursos, impactos ambientais e/ou *layout* do local. Vale destacar também a utilização da simulação MC em conjunto com processos estocásticos, que está presente em pelo menos sete estudos.

CONCLUSÃO

Os autores utilizaram uma SLR adaptada para examinar o estado da arte em métodos de planejamento de construção com incertezas. Os resultados revelaram que a maioria das abordagens considera questões de tempo como uma variável para considerar a incerteza, mas também expuseram que existem muitos métodos que consideram múltiplas variáveis ao mesmo tempo. Além disso, as conclusões mostraram que não existe atualmente um sistema comum em utilização e que está a ser utilizada uma combinação de técnicas tradicionais e algoritmos avançados para estimar as incertezas durante a fase de construção.

Essas descobertas têm implicações importantes para a compreensão desta área de pesquisa, que requer mais estudos, não apenas consolidando métodos existentes, mas também validando novos métodos com dados de *benchmarking*. Como indica o resumo de sugestões para trabalhos futuros, há necessidade de universalização e dinamização dos métodos atuais, estendendo a aplicação a outros contextos de projetos, países, etc., e trazendo dados reais para criar um “planejamento vivo”.

Este artigo incentiva os planejadores de construção a usarem métodos que levem em conta as incertezas e não negligenciem variáveis de planejamento fora do comum que possam ter um impacto significativo no projeto devido a eventos de crise. Da mesma forma, a revisão sugere que novas pesquisas sobre métodos de planejamento de construção devem levar em conta essas incertezas ao explorar diferentes abordagens que já foram discutidas na literatura. Além disso, os autores sugerem que novos estudos possam ser orientados para métodos de planejamento de construção que lidem com maiores níveis de incertezas, sendo capazes de capturar eventos aleatórios incomuns comumente observados em projetos de infraestrutura.

Finalmente, é fundamental enfatizar que não existe uma resposta aproximada para considerar as incertezas nas abordagens de planejamento da construção. Pelo contrário, alguns estudos sugerem que os métodos híbridos podem ser a melhor opção para lidar com alguns tipos de incertezas. Em vez de repetir métodos de planejamento falhos, que não consideram as incertezas durante eventos de crise. Os acadêmicos e profissionais da indústria poderiam mergulhar no crescimento da IA e se esforçar para descobrir incertezas atípicas com estratégias atípicas que podem ajudar a antecipar o futuro do planejamento da construção.



REFERÊNCIAS

- Abbasi, S., Taghizade, K., & Noorzai, E. (2020). BIM-Based Combination of Takt Time and Discrete Event Simulation for Implementing Just in Time in Construction Scheduling under Constraints. *Journal of Construction Engineering and Management*, 146(12).
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001940](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001940)
- AbouRizk, S. M. & Halpin, D. (1992). Statistical properties of construction duration data. *Journal of the Construction Division and Management*, 118(3), 525-544.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9364\(1992\)118:3\(525\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9364(1992)118:3(525))
- AbouRizk, S. M. & Sawhney, A. (1993). Subjective and interactive duration estimation. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 20(3), 457-470.
<https://doi.org/10.1139/I93-060>
- Alhussein, H., Shehab, L., & Hamzeh, F. (2022). Improvisation in Construction Planning: An Agent-Based Simulation Approach. *Buildings*, 12(10):1608.
<https://doi.org/10.3390/buildings12101608>
- AlJassmi, H., Abduljalil, Y., & Philip, B. (2023). Towards Self-Recovering Construction Schedules: A New Method for Periodically Updating Project Plans and Optimizing Recovery Actions. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 22(4), 2335-2347.
<https://doi.org/10.1080/13467581.2022.2153055>
- Ansari, R. (2021). Dynamic Optimization for Analyzing Effects of Multiple Resource Failures on Project Schedule Robustness. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 25(5), 1515-1532.
<https://doi.org/10.1007/s12205-021-0564-1>
- Bacon, R., Besant-Jones, J., & Heidarian, J. (1996). Estimating construction costs and schedules: Experience with power generation projects in developing countries. World Bank Technical Paper No. 325. World Bank Technical Paper. <http://www.osti.gov/scitech/biblio/564865-estimating-construction-costs-schedules-experience-power-generation-projects-developing-countries-world-bank-technical-paper>
- Benjaoran, V. & Bhokha, S. (2010). An integrated safety management with construction management using 4D CAD model. *Safety Science*, 48(3), 395-403.
<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2009.09.009>
- Bi, L., Ren, B., Zhong, D., & Hu, L. (2015). Real-Time Construction Schedule Analysis of Long-Distance Diversion Tunnels Based on Lithological Predictions Using a Markov Process. *Journal of Construction Engineering and Management*, 141(2).
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000935](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000935)
- Boletim Estatístico da Construção Civil. (2023, October 16). CBIC. Retrieved October 17, 2023, from http://www.cbicdados.com.br/media/anexos/Boletim_An_o19n08_ago23.pdf
- Bruni, M. E., Beraldi, P., Guerriero, F., & Pinto, E. (2011). A scheduling methodology for dealing with uncertainty in construction projects. *Engineering Computations*, 28(8), 1064-1078. <https://doi.org/10.1108/02644401111179036>
- Caron, F., Marchet, G., & Perego, A. (1998). Project logistics: integrating the procurement and construction processes. *International Journal of Project Management*, 16(5), 311-319. [https://doi.org/10.1016/s0263-7863\(97\)00029-x](https://doi.org/10.1016/s0263-7863(97)00029-x)
- Chakraborty, D., Elhagazy, H., Elzarka, H., & Gutierrez, L. (2020). A novel construction cost prediction model using hybrid natural and light gradient boosting. *Advanced Engineering Informatics*, 46, 101201.
<https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101201>
- Chen, L., Lu, Q., Li, S., He, W., & Yang, J. (2021). Bayesian Monte Carlo Simulation-Driven Approach for Construction Schedule Risk Inference. *Journal of Management in Engineering*, 37(2).
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000884](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000884)
- Chen, L., Lu, Q., & Han, D. (2023). A Bayesian-driven Monte Carlo Approach for Managing Construction Schedule Risks of Infrastructures under Uncertainty. *Expert Systems with Applications*, 212.
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118810>
- Cheng, M.-Y., Wu, Y.-W., Dan, L. T., & Van Roy, A. F. (2013). Enhanced Time-Dependent Evolutionary Fuzzy Support Vector Machines Inference Model for Cash Flow Prediction and Estimate at Completion. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 12(04), 679-710.
<https://doi.org/10.1142/S0219622013500259>
- Clark, W. (1922). The Gantt Chart, a working tool of management.
- Contas Nacionais Trimestrais: 2o Trimestre de 2023. (2023, September 1). IBGE. Retrieved October 17, 2023, from https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/media/com_media/bge/arquivos/982773d7ba3852e69fb969376436e9ea.pdf
- De Meyer, A., Loch, C. H., & Pich, M. T. (2002). Managing project uncertainty: From variation to chaos. *MIT Sloan Management Review*, 43(2), 60-67.
- Denyer, D., & Tranfield, D. (2009). Producing a systematic review. In *The Sage handbook of organizational research methods*. (671-689). Sage Publications Ltd.
- Du, J., Kim, B. C., & Zhao, D. (2016). Cost performance as a stochastic Process: EAC projection by Markov Chain Simulation. *Journal of the Construction Division and Management*. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0001115](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0001115)
- Edmund, B., Yang, H., & Asa, E. (2018). A General Overview of the Impact of Global Financial Crisis on Construction Industries. *International Conference on Construction and Real Estate Management*.
<https://doi.org/10.1061/9780784481745.004>
- Elhakeem, A. & Hegazy, T. (2005). Graphical approach for manpower planning in infrastructure networks. *Journal of the Construction Division and Management*, 131(2), 168-175.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9364\(2005\)131:2\(168\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9364(2005)131:2(168))
- Enshassi, A., Mohamed, S. A. M., & Abushaban, S. (2009). Factors affecting the performance of construction projects in the Gaza strip. *Journal of Civil Engineering and Management*, 15(3), 269-280.
<https://doi.org/10.3846/1392-3730.2009.15.269-280>
- Feng, K., Lu, W., Olofsson, T., Chen, S., Yan, H., & Wang, Y. (2018). A Predictive Environmental Assessment Method for Construction Operations: Application to a Northeast China Case Study. *Sustainability*, 10(11), 3868.
<https://doi.org/10.3390/su10113868>
- Feng, K., Wang, S., Lu, W., Liu, C., & Wang, Y. (2022). Planning Construction Projects in Deep Uncertainty: A Data-Driven Uncertainty Analysis Approach. *Journal of Construction Engineering and Management*, 148(8).



- [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0002315](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002315)
Fitzsimmons, J. P., Lu, R., Hong, Y., & Brilakis, I. (2022). Construction schedule risk analysis – a hybrid machine learning approach. *Journal of Information Technology in Construction*, 27, 70–93.
<https://doi.org/10.36680/j.itcon.2022.004>
- Fondahl, J. W. (1962). A Non-Computer Approach to the Critical Path Method for the Construction Industry, Technical Report #9. Department of Civil Engineering, Stanford University, Stanford, CA.
- Ford, D. N., Lander, D. M., & Voyer, J. J. (2002). A real options approach to valuing strategic flexibility in uncertain construction projects. *Construction Management and Economics*, 20(4), 343–351.
<https://doi.org/10.1080/01446190210125572>
- Francis, A. (2019). Chronographical spatiotemporal scheduling optimization for building projects. *Frontiers in Built Environment*, 5.
<https://doi.org/10.3389/fbuil.2019.00036>
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- Goh, Y. M. & Askar Ali, M. J. (2016). A hybrid simulation approach for integrating safety behavior into construction planning: An earthmoving case study. *Accident Analysis & Prevention*, 93, 310–318.
<https://doi.org/10.1016/j.aap.2015.09.015>
- Hadipriono, F. C. (1988). Fault tree network analysis for construction. *Civil Engineering Systems*, 5(1), 42–48.
<https://doi.org/10.1080/02630258808970501>
- Halpin, D. (1977). Cyclone–Method for modeling job site processes. *Journal of the Construction Division*, 103(3), 489–499. <https://doi.org/10.1061/jccea.0000712>
- Hassan, A., El-Rayes, K., & Attalla, M. (2021). Stochastic scheduling optimization of repetitive construction projects to minimize project duration and cost. *The International Journal of Construction Management*, 1–10.
<https://doi.org/10.1080/15623599.2021.1975078>
- He, Q., Wang, G., Luo, L., Shi, Q., Xie, J., & Meng, X. (2017). Mapping the managerial areas of Building Information Modeling (BIM) using scientometric analysis. *International Journal of Project Management*, 35(4), 670–685.
<https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2016.08.001>
- Hosny, A., Nik-Bakht, M., & Moselhi, O. (2020). Workspace planning in construction: non-deterministic factors. *Automation in Construction*, 116, 103222.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103222>
- Hosny, A., Nik-Bakht, M., & Moselhi, O. (2022). Physical Distancing Analytics for Construction Planning Using 4D BIM. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 36(4).
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0001023](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0001023)
- Hossen, M. M., Kang, S., & Kim, J. (2015). Construction schedule delay risk assessment by using combined AHP-RII methodology for an international NPP project. *Nuclear Engineering and Technology*, 47(3), 362–379.
<https://doi.org/10.1016/j.net.2014.12.019>
- Hu, S., Fang, Y., & Moehler, R. (2023). Estimating and Visualizing the Exposure to Tower Crane Operation Hazards on Construction Sites. *Safety Science*, 160.
<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.106044>
- Isidore, R. J. L., Back, W. E., & Fry, G. T. (2001). Integrated probabilistic schedules and estimates from project simulated data. *Construction Management and Economics*, 19(4), 417–426.
<https://doi.org/10.1080/01446190010022677>
- Jalali, S. & Wohlin, C. (2012). Systematic literature studies: Database Searches vs. Backward Snowballing. ESEM'12: International Conference on Empirical Software Engineering and Measurement.
<https://doi.org/10.1145/2372251.2372257>
- Jaśkowski, P. & Sobotka, A. (2006). Scheduling construction projects using evolutionary algorithm. *Journal of the Construction Division and Management*, 132(8), 861–870.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9364\(2006\)132:8\(861](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9364(2006)132:8(861)
- Kammouh, O., Nogal, M., Binnekamp, R., & Wolfert, A. R. M. (2022). Dynamic control for construction project scheduling on-the-run. *Automation in Construction*, 141, 104450.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104450>
- Kavanagh, D. P. (1985). SIREN: A Repetitive Construction Simulation model. *Journal of the Construction Division and Management*, 111(3), 308–323.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9364\(1985\)111:3\(308](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9364(1985)111:3(308)
- Kedir, N. S., Somi, S., Fayek, A. R., & Nguyen, P. H. D. (2022). Hybridization of reinforcement learning and agent-based modeling to optimize construction planning and scheduling. *Automation in Construction*, 142, 104498.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104498>
- Kelley, J. E., & Walker, M. R. (1959). Critical-path planning and scheduling. IRE-AIEE-ACM Computer Conference.
<https://doi.org/10.1145/1460299.1460318>
- Khan, K. S., Kunz, R., Kleijnen, J., & Antes, G. (2003). Five steps to conducting a systematic review. *JRSM*, 96(3), 118–121.
<https://doi.org/10.1258/jrsm.96.3.118>
- Kim, J.-L. & Ellis, R. D. (2009). Robust global and local search approach to resource-constrained project scheduling. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 36(3), 375–388.
<https://doi.org/10.1139/L08-135>
- Kokkaew, N. & Chiara, N. (2010). Modelling completion risk using stochastic critical path-envelope method: a BOT highway project application. *Construction Management and Economics*, 28(12), 1239–1254.
<https://doi.org/10.1080/01446193.2010.521755>
- Laufer, A. & Cohenca, D. (1990). Factors Affecting Construction-Planning Outcomes. *Journal of Construction Engineering and Management*, 116(1), 135–156.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(1990\)116:1\(135](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(1990)116:1(135)
- Lee, D. (2005). Probability of project completion using stochastic project scheduling simulation. *Journal of the Construction Division and Management*, 131(3), 310–318.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9364\(2005\)131:3\(310](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9364(2005)131:3(310)
- Lee, H., Shin, J., Park, M., & Ryu, H.-G. (2009). Probabilistic Duration Estimation Model for High-Rise Structural Work. *Journal of Construction Engineering and Management*, 135(12), 1289–1298.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000105](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000105)
- Lempert, R. J., Popper, S. W., & Bankes, S. C. (2003). Shaping the Next One Hundred Years: New Methods for Quantitative, Long-Term Policy Analysis. RAND Corporation.
<https://doi.org/10.7249/MR1626>



- Leu, S.-S., Chen, A.-T., & Yang, C.-H. (1999a). Fuzzy Optimal Model for Resource-Constrained Construction Scheduling. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 13(3), 207–216. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3801\(1999\)13:3\(207\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3801(1999)13:3(207))
- Leu, S.-S., Chen, A.-T., & Yang, C.-H. (1999b). A fuzzy optimal model for construction resource leveling scheduling. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 26(6), 673–684. <https://doi.org/10.1139/99-028>
- Leu, S.-S., Chen, A.-T., & Yang, C.-H. (2001). A GA-based fuzzy optimal model for construction time–cost trade-off. *International Journal of Project Management*, 19(1), 47–58. [https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(99\)00035-6](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(99)00035-6)
- Leu, S.-S. & Hung, T.-H. (2002). A genetic algorithm-based optimal resource-constrained scheduling simulation model. *Construction Management and Economics*, 20(2), 131–141. <https://doi.org/10.1080/01446190110109148>
- Li, H., Chan, N., Huang, T., Guo, H. L., Lu, W., & Skitmore, M. (2009). Optimizing construction planning schedules by virtual prototyping enabled resource analysis. *Automation in Construction*, 18(7), 912–918. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2009.04.002>
- Li, Q., Tao, S., Chong, H.-Y., & Dong, Z. S. (2018). Robust Optimization for Integrated Construction Scheduling and Multiscale Resource Allocation. *Complexity*, 2018, 1–17. <https://doi.org/10.1155/2018/2697985>
- Ma, G., Wang, A., Li, N., Gu, L., & Ai, Q. (2014). Improved Critical Chain Project Management Framework for Scheduling Construction Projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 140(12). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000908](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000908)
- Malcolm, D. G., Roseboom, J. H., Clark, C. E., & Fazar, W. (1959). Application of a technique for research and development program evaluation. *Operations Research*, 7(5), 646–669. <https://doi.org/10.1287/opre.7.5.646>
- Manik, A., Gopalakrishnan, K., Singh, A., & Yan, S. (2008). Neural networks surrogate models for simulating payment risk in pavement construction. *Journal of Civil Engineering and Management*, 14(4), 235–240. <https://doi.org/10.3846/1392-3730.2008.14.22>
- Milat, M., Knezić, S., & Sedlar, J. (2022). Application of a Genetic Algorithm for Proactive Resilient Scheduling in Construction Projects. *Designs*, 6(1), 16. <https://doi.org/10.3390/designs6010016>
- Moon, H., Kim, H., Kamat, V. R., & Kang, L. (2015). BIM-Based Construction Scheduling Method Using Optimization Theory for Reducing Activity Overlaps. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 29(3). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cp.1943-5487.0000342](https://doi.org/10.1061/(asce)cp.1943-5487.0000342)
- Moore, L. J. & Clayton, E. R. (1976). GERT Modeling and Simulation: Fundamentals and Applications.
- Mulholland, B., & Christian, J. (1999). Risk Assessment in Construction Schedules. *Journal of Construction Engineering and Management*, 125(1), 8–15. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(1999\)125:1\(8\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(1999)125:1(8))
- Nasir, D., McCabe, B., & Hartono, L. (2003). Evaluating Risk in Construction–Schedule Model (ERIC–S): Construction Schedule Risk Model. *Journal of Construction Engineering and Management*, 129(5), 518–527. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2003\)129:5\(518\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2003)129:5(518))
- Ock, J. H. & Han, S. H. (2010). Measuring risk-associated activity's duration: A fuzzy set theory application. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 14(5), 663–671. <https://doi.org/10.1007/s12205-010-1003-x>
- Ozdemir, B. & Kumral, M. (2017). Stochastic assessment of the material haulage efficiency in the earthmoving industry. *Journal of the Construction Division and Management*, 143(8). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0001336](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0001336)
- Pan, N.-F. (2005). Assessment of productivity and duration of highway construction activities subject to impact of rain. *Expert Systems with Applications*, 28(2), 313–326. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2004.10.011>
- Pawan, P. & Lorterapong, P. (2015). A Fuzzy-Based Integrated Framework for Assessing Time Contingency in Construction Projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 142(3). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001073](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001073)
- Plebankiewicz, E., Zima, K., & Wiecek, D. (2021). Modelling of time, cost and risk of construction with using fuzzy logic. *Journal of Civil Engineering and Management*, 27(6), 412–426. <https://doi.org/10.3846/jcem.2021.15255>
- Ribeirinho, M. J., Mischke, J., Strube, G., Sjödin, E., Blanco, J. L., Palter, R., ... & Andersson, T. (2020). The next normal in construction: How disruption is reshaping the world's largest ecosystem. McKinsey & Company.
- Russell, A. D. & Wong, W. (1993). New generation of planning structures. *Journal of the Construction Division and Management*, 119(2), 196–214. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9364\(1993\)119:2\(196\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9364(1993)119:2(196))
- Shibani, A., Hassan, D., & Shakir, N. S. (2020). The effects of pandemic on construction industry in the UK. *Mediterranean Journal of Social Sciences*, 11(6), 48. <https://doi.org/10.36941/mjss-2020-0063>
- Rozenfeld, O., Sacks, R., & Rosenfeld, Y. (2009). 'CHASTE': construction hazard assessment with spatial and temporal exposure. *Construction Management and Economics*, 27(7), 625–638. <https://doi.org/10.1080/01446190903002771>
- Sarkar, D., Jha, K. K., & Patel, S. (2021). Critical chain project management for a highway construction project with a focus on theory of constraints. *The International Journal of Construction Management*, 21(2), 194–207. <https://doi.org/10.1080/15623599.2018.1512031>
- Sharma, V., Zaki, M., Jha, K. N., & Krishnan, N. M. A. (2021). Machine learning-aided cost prediction and optimization in construction operations. *Engineering, Construction and Architectural Management*. <https://doi.org/10.1108/ECAM-10-2020-0778>
- Sukumaran, P., Hong, T., Bayraktar, M. E., & Hastak, M. (2006). Validation of a Model for Predicting Schedule Changes in Highway Work Zones—Case Studies. *Journal of Transportation Engineering*, 132(8), 638–648. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2006\)132:8\(638\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2006)132:8(638))
- Szczesny, K. & König, M. (2015). Reactive scheduling based on actual logistics data by applying simulation-based optimization. *Visualization in Engineering*, 3(1), 10. <https://doi.org/10.1186/s40327-015-0020-8>
- Tomczak, M. (2019). Modeling of the harmonization method for executing a multi-unit construction project. *Open Engineering*, 9(1), 282–291. <https://doi.org/10.1515/eng-2019-0036>



- Touran, A. (1986). Computer packages for construction data acquisition and processing. *Construction Management and Economics*, 4(3), 233–243. <https://doi.org/10.1080/01446198600000018>
- Tran, D. H. & Long, L. D. (2018). Project scheduling with time, cost and risk trade-off using adaptive multiple objective differential evolution. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 25(5), 623–638. <https://doi.org/10.1108/ECAM-05-2017-0085>
- Tseng, C., Zhao, T., & Fu, C. C. (2009). Contingency estimation using a real options approach. *Construction Management and Economics*, 27(11), 1073–1087. <https://doi.org/10.1080/01446190903222411>
- Van Eck, N. J., & Waltman, L. (2010). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 84(2), 523–538. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>
- Vaziri, K., Carr, P. G., & Nozick, L. K. (2007). Project Planning for Construction under Uncertainty with Limited Resources. *Journal of the Construction Division and Management*, 133(4), 268–276. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9364\(2007\)133:4\(268](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9364(2007)133:4(268)
- Yang, I. & Chang, C. (2005). Stochastic resource-constrained scheduling for repetitive construction projects with uncertain supply of resources and funding. *International Journal of Project Management*, 23(7), 546–553. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2005.03.003>
- Walker, W. E., Lempert, R. J., & Kwakkel, J. H. (2013). Deep Uncertainty. In *Encyclopedia of Operations Research and Management Science* (395–402). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1153-7_1140
- Wang, C., Zhang, S., Du, C., Pan, F., & Xue, L. (2016). A Real-Time Online Structure-Safety Analysis Approach Consistent with Dynamic Construction Schedule of Underground Caverns. *Journal of Construction Engineering and Management*, 142(9). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001153](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001153)
- Williams, T. (1999). Allocation of contingency in activity duration networks. *Construction Management and Economics*. <https://doi.org/10.1080/014461999371367>
- Wohlin, C. (2014). Guidelines for snowballing in systematic literature studies and a replication in software engineering. *EASE '14: Proceedings of the 18th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering*. <https://doi.org/10.1145/2601248.2601268>
- Woolery, J. C. & Crandall, K. C. (1983). Stochastic Network Model for Planning Scheduling. *Journal of Construction Engineering and Management*, 109(3), 342–354. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(1983\)109:3\(342](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(1983)109:3(342)
- Zahraie, B. & Tavakolan, M. (2009). Stochastic Time-Cost-Resource utilization optimization using nondominated sorting genetic algorithm and discrete fuzzy sets. *Journal of the Construction Division and Management*, 135(11), 1162–1171. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0000092](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0000092)
- Zhang, H. & Lin, Y. (2022). Prediction of Ergonomic Risks and Impacts on Construction Schedule through Agent-Based Simulation. *Journal of Construction Engineering and Management*, 149(3). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0002437](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002437)
- Zheng, E. Z. H. & Carvalho, M. M., de. (2016). Managing Uncertainty in Projects: A Review, Trends and Gaps. *Revista de Gestão e Projetos*, 07(02), 95–109. <https://doi.org/10.5585/gep.v7i2.402>
- Zhong, D., Bi, L., Yu, J., & Zhao, M. (2016). Robustness analysis of underground powerhouse construction simulation based on Markov Chain Monte Carlo method. *Science China Technological Sciences*, 59(2), 252–264. <https://doi.org/10.1007/s11431-015-5859-3>
- Zolfagharian, S., Irizarry, J., Ressang, A., Nourbakhsh, M., & Gheisari, M. (2014). Automated safety planning approach for residential construction sites in Malaysia. *The International Journal of Construction Management*, 14(3), 134–147. <https://doi.org/10.1080/15623599.2014.926190>

