SISTEMAS CIBERFÍSICOS UTILIZADOS NO GERENCIAMENTO E MANUTENÇÃO PREDITIVA DE PONTE: UMA REVISÃO BIBLIOMÉTRICA

Cyber Physical systems used in bridge predictive management and maintenance: A Bibliometric Review

Marcelo Silva Santos Segundo
Universidade Federal do Ceará | Fortaleza, Ceará | marcelo.segundo@alu.ufc.br

Marcella Maria Gomes Damasceno
Universidade Federal do Ceará | Fortaleza, Ceará | marcelladamasceno@alu.ufc.br

José de Paula Barros Neto
Universidade Federal do Ceará | Fortaleza, Ceará | jpbarros@ufc.br

RESUMO

Este estudo realizou uma revisão bibliométrica detalhada sobre a aplicação de Sistemas Ciberfísicos (CPS) no gerenciamento e manutenção preditiva de pontes e viadutos. Utilizando a base de dados Scopus, buscando identificar tendências, principais autores e instituições, redes de colaboração científica e lacunas na literatura. A metodologia foi estruturada em etapas rigorosas, incluindo formulação da estratégia de busca, triagem dos artigos, análise quantitativa (coautoria, cocitação, palavras-chave) e qualitativa complementar. Resultados indicam crescimento significativo da produção científica nesta área, destacando o potencial dos CPS na redução de falhas estruturais, custos operacionais e melhoria na segurança. Por fim, o estudo oferece direções para futuras pesquisas e aplicações práticas, contribuindo para decisões informadas no âmbito da infraestrutura rodoviária.

Palavras-chave: Sistemas ciberfísicos, manutenção preditiva, pontes, viadutos, revisão bibliométrica.

ABSTRACT

This study conducted a comprehensive bibliometric review of Cyber-Physical Systems (CPS) applications in predictive management and maintenance of bridges and viaducts. Using the Scopus database, articles were analyzed to identify research trends, leading authors, institutions, scientific collaboration networks, and existing research gaps. The methodology was structured in rigorous stages, including search strategy formulation, article screening, quantitative analysis (co-authorship, co-citation, keyword analysis), and complementary qualitative analysis. Findings highlight significant growth in scientific production, emphasizing CPS's potential to reduce structural failures, operational costs, and enhance safety. Finally, the study outlines future research directions and practical applications, supporting informed decision-making in road infrastructure management.

Keywords: Cyber-physical systems, predictive maintenance, bridges, viaducts, bibliometric review.

1 INTRODUÇÃO

O gerenciamento e a manutenção da infraestrutura rodoviária, especialmente de pontes e viadutos, têm se tornado um grande desafio para gestores públicos e privados, devido à necessidade crescente de assegurar segurança, confiabilidade e funcionalidade dessas estruturas ao longo do tempo (CNT, 2022; DNIT, 2023). Dados do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) revelam que, até maio de 2023, 727 das 5.800 pontes sob sua responsabilidade apresentavam condições críticas, sendo 130 classificadas como extremamente deterioradas e 597 em condições ruins. A Ponte Juscelino Kubitschek de Oliveira, que conecta os estados do Maranhão e Tocantins, estava entre as estruturas com sérios problemas estruturais, embora ainda sem risco iminente de colapso. O colapso parcial dessa ponte em dezembro de 2024 reforça a urgência da implementação de sistemas de monitoramento eficazes, que possam prever possíveis falhas estruturais e orientar ações preventivas (DNIT, 2023).

Neste contexto, destaca-se a aplicação de Sistemas Ciberfísicos (CPS, do inglês Cyber-Physical Systems), que combinam elementos físicos e computacionais, proporcionando monitoramento contínuo, análise de dados em tempo real e controle proativo das infraestruturas civis (Rajkumar *et al.*, 2010; Sawhney *et al.*, 2020). Os CPS têm como características fundamentais a integração de sensores inteligentes, conectividade robusta, capacidade adaptativa e previsibilidade, características que os tornam particularmente adequados para manutenção preditiva, reduzindo riscos e custos operacionais (Wan *et al.*, 2018; Shi *et al.*, 2020).

A manutenção preditiva, potencializada pelos CPS, baseia-se na análise contínua dos dados estruturais e ambientais coletados por sensores inteligentes distribuídos pela infraestrutura. Com o auxílio da Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial (IA) e técnicas avançadas de análise de Big Data, esses sistemas permitem não só a detecção precoce de anomalias, como também a previsão da vida útil das estruturas (Liu *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2021).

A literatura científica tem demonstrado uma crescente atenção à aplicação dos CPS no monitoramento estrutural de pontes. Estudos recentes destacam o uso de técnicas avançadas de monitoramento como a tecnologia de sensores sem fio, análise dinâmica e métodos de aprendizado de máquina para interpretar grandes volumes de dados coletados continuamente (Sony *et al.*, 2019; Ye *et al.*, 2020). Entretanto, apesar desse crescente interesse, ainda existem lacunas significativas relacionadas à padronização desses sistemas, custos envolvidos na implementação e formação técnica necessária para operação e interpretação dos resultados obtidos (Shi *et al.*, 2020).

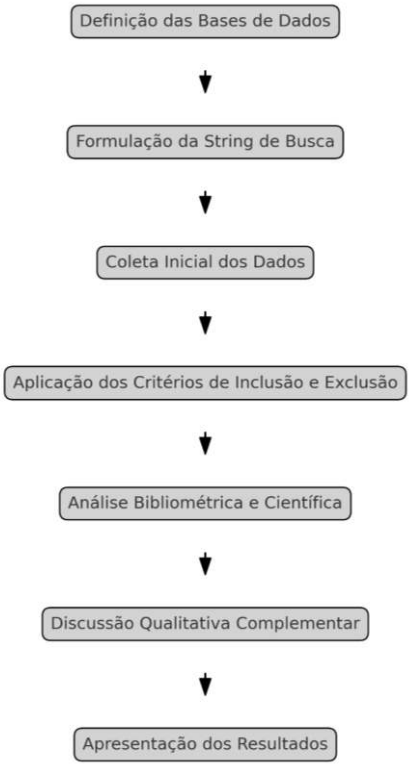
Diante dessa realidade, este artigo tem como objetivo realizar uma revisão bibliométrica detalhada e abrangente sobre o uso dos Sistemas Ciberfísicos na gestão e manutenção preditiva de pontes e viadutos, utilizando a base de dados científica Scopus. Busca-se, assim, fornecer uma visão clara sobre o estado atual da pesquisa neste campo, identificando tendências, principais autores e instituições envolvidas, países de destaque, além de realizar um mapeamento das redes de colaboração e identificar possíveis lacunas que possam orientar futuras pesquisas e aplicações práticas no contexto brasileiro.

Este estudo se justifica pela importância estratégica do tema para a segurança viária e seus impactos sociais, econômicos e ambientais, com o rigor metodológico proposto aqui. Espera-se que os resultados obtidos possam contribuir para o desenvolvimento científico e tecnológico na área, orientando gestores públicos e privados na tomada de decisões fundamentadas por evidências científicas sólidas.

2 MATERIAIS E MÉTODO DE PESQUISA

Este estudo adotou uma metodologia estruturada para a realização de uma revisão bibliométrica detalhada sobre o uso de Sistemas Ciberfísicos (CPS) aplicados no gerenciamento e manutenção preditiva de pontes e viadutos. O estudo baseou-se nas diretrizes propostas por Cândido *et al.* (2023) e detalhadamente estruturado em etapas sequenciais, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1: Fluxograma do Processo Metodológico da Revisão Bibliométrica.



Fonte: Cândido (2023).

2.1 DEFINIÇÃO DAS BASES DE DADOS

Foi escolhida as bases Scopus devido à sua cobertura abrangente, relevância na comunidade acadêmica, filtros específicos, facilidade de manipulação e extração dos dados, garantindo acesso a publicações internacionais revisadas por pares de alto impacto.

2.2 FORMULAÇÃO DA STRING DE BUSCA

Para elaboração da String de busca, foi pensado em relacionar termos da construção civil com saúde e monitoramento de pontes. A priori, buscou-se por ("BUILDING CONSTRUCTION" OR "BUILDING SECTOR" OR "CONSTRUCTION INDUSTRY" OR "CONSTRUCTION OF BUILDINGS" OR "CONSTRUCTION SECTOR" OR "HOUSEBUILDING" OR "HOUSING" OR "PUBLIC BUILDINGS" OR "REAL ESTATE" OR "RESIDENTIAL BUILDING" OR "RESIDENTIAL BUILDING" OR "RESIDENTIAL BUILT ENVIRONMENT" OR "BUILT ENVIRONMENT") AND (“BRIDGE HEALTH MONITORING") posteriormente foram analisadas as palavras-chave mais relevantes dos artigos relacionados nesta primeira base de dados. Após a primeira análise, foram então incluídos os termos ("STRUCTURAL HEALTH MONITORING" OR "MONITORING" OR "BRIDGE HEALTH MONITORING SYSTEMS" OR " SENSOR TECHNOLOGY" OR " SMART SENSOR TECHNOLOGY") resultando assim na string que pode ser vista no Quadro 1.

Quadro 1: String de busca utilizada para busca da base de dados.

String de busca	
TITLE-ABS-KEY	("BUILDING CONSTRUCTION" OR "BUILDING SECTOR" OR "CONSTRUCTION INDUSTRY" OR "CONSTRUCTION OF BUILDINGS" OR "CONSTRUCTION SECTOR" OR "HOUSEBUILDING" OR "HOUSING" OR "PUBLIC BUILDINGS" OR "REAL ESTATE" OR "RESIDENTIAL BUILDING" OR "RESIDENTIAL BUILDING" OR "RESIDENTIAL BUILT ENVIRONMENT" OR "BUILT ENVIRONMENT") AND (“BRIDGE HEALTH MONITORING" OR " STRUCTURAL HEALTH MONITORING" OR "MONITORING" OR "BRIDGE HEALTH MONITORING SYSTEMS" OR " SENSOR TECHNOLOGY" OR " SMART SENSOR TECHNOLOGY”)

Fonte: Autores (2025).

2.3 COLETA INICIAL DOS DADOS

A busca inicial foi realizada na base de dados Scopus, considerando publicações até o ano atual (2024), e restringindo os idiomas das publicações para inglês.

- **Aplicação dos Critérios de Inclusão e Exclusão**
- **Critérios de Inclusão**:
  - Artigos científicos e revisões publicados em periódicos revisados por pares.
  - Em língua inglesa.
  - Relacionados à grande área da Engenharia.

2.4 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA E CIENTÍFICA

Utilizaram-se ferramentas especializadas para a realização da análise bibliométrica:

- **VOSViewer**: Para visualizar e interpretar redes de coautoria, coocorrência de palavras-chave, e cocitação de referências.

A análise consistiu em:

- **Desempenho das publicações**: Avaliação quantitativa das publicações ao longo dos anos.
- **Redes de Coautoria**: Mapeamento das colaborações científicas entre autores e instituições.
- **Redes de Cocitação e Palavras-chave**: Identificação das principais linhas de pesquisa e tendências emergentes.
- **Acoplamento Bibliográfico**: Avaliação das publicações recentes e das tendências atuais de pesquisa.

2.5 DISCUSSÃO QUALITATIVA COMPLEMENTAR

Foi realizada uma análise qualitativa complementar, examinando em profundidade os artigos mais citados, identificando as abordagens metodológicas predominantes, os principais resultados encontrados, desafios metodológicos e sugestões futuras apresentadas pelos autores.

2.6 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados foram sintetizados e apresentados de maneira clara e visual, utilizando gráficos, tabelas e mapas de rede para facilitar a interpretação das informações obtidas. Destaca-se a discussão qualitativa detalhada que proporciona insights adicionais e contribui para a compreensão aprofundada das contribuições e lacunas identificadas.

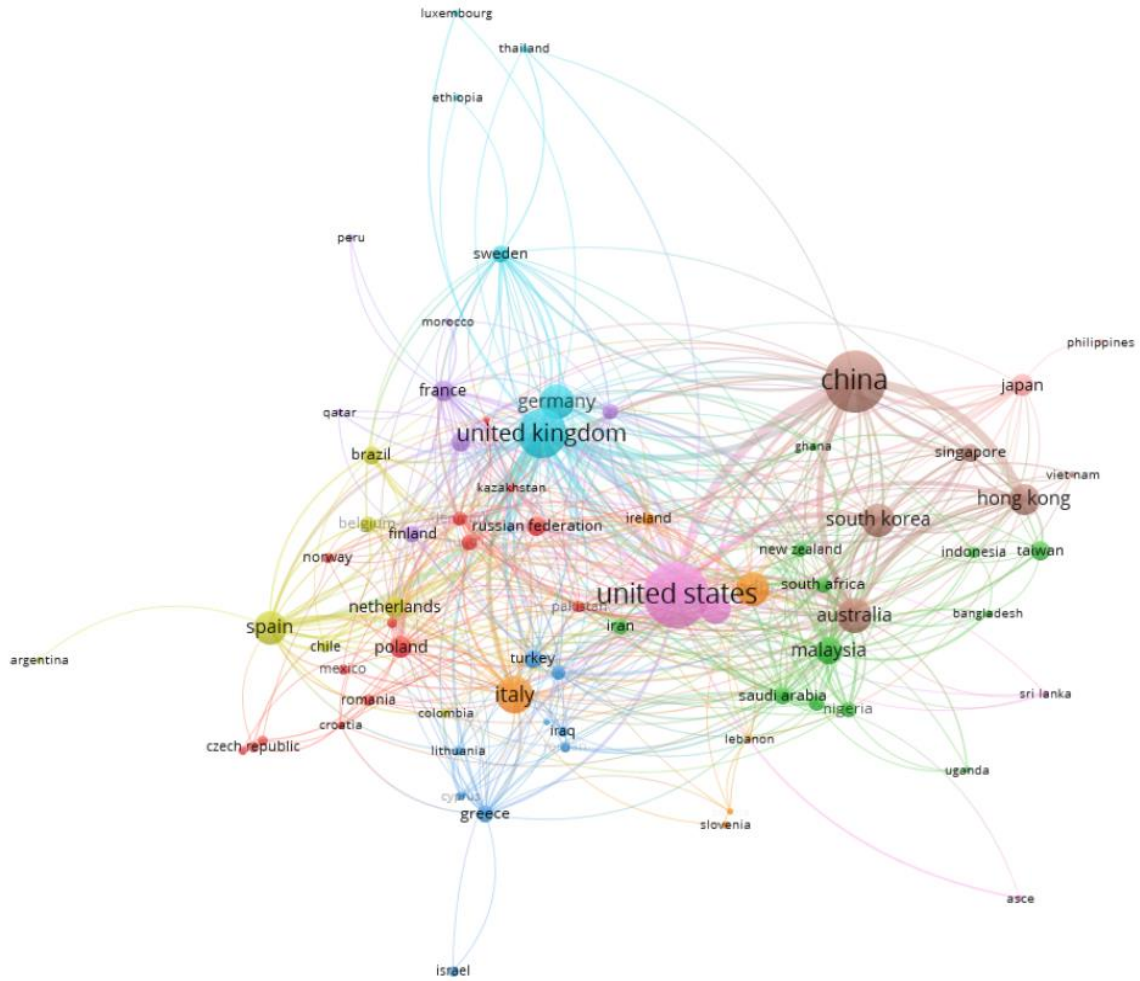
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise bibliométrica realizada nesta pesquisa permitiu identificar tendências claras e relevantes no uso dos Sistemas Ciberfísicos (CPS) aplicados ao gerenciamento e manutenção preditiva de pontes e viadutos, a partir da base de dados Scopus. A seguir estão os resultados gráficos e redes de interação obtidos por meio do software VOSViewer, com uma discussão crítica detalhada sobre cada aspecto visual analisado.

3.1 PRODUÇÃO CIENTÍFICA POR PAÍSES

A análise revelou que os Estados Unidos, China e Reino Unido são os países líderes em publicações relacionadas ao tema, como pode ser observado na Figura 2. Destaca-se especialmente o cluster dos Estados Unidos, apresentando o maior número de publicações e redes de colaboração científica. Essa concentração pode ser justificada pelo avanço tecnológico e maior investimento em pesquisa e desenvolvimento em infraestrutura nesses países (Sawhney *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2021).

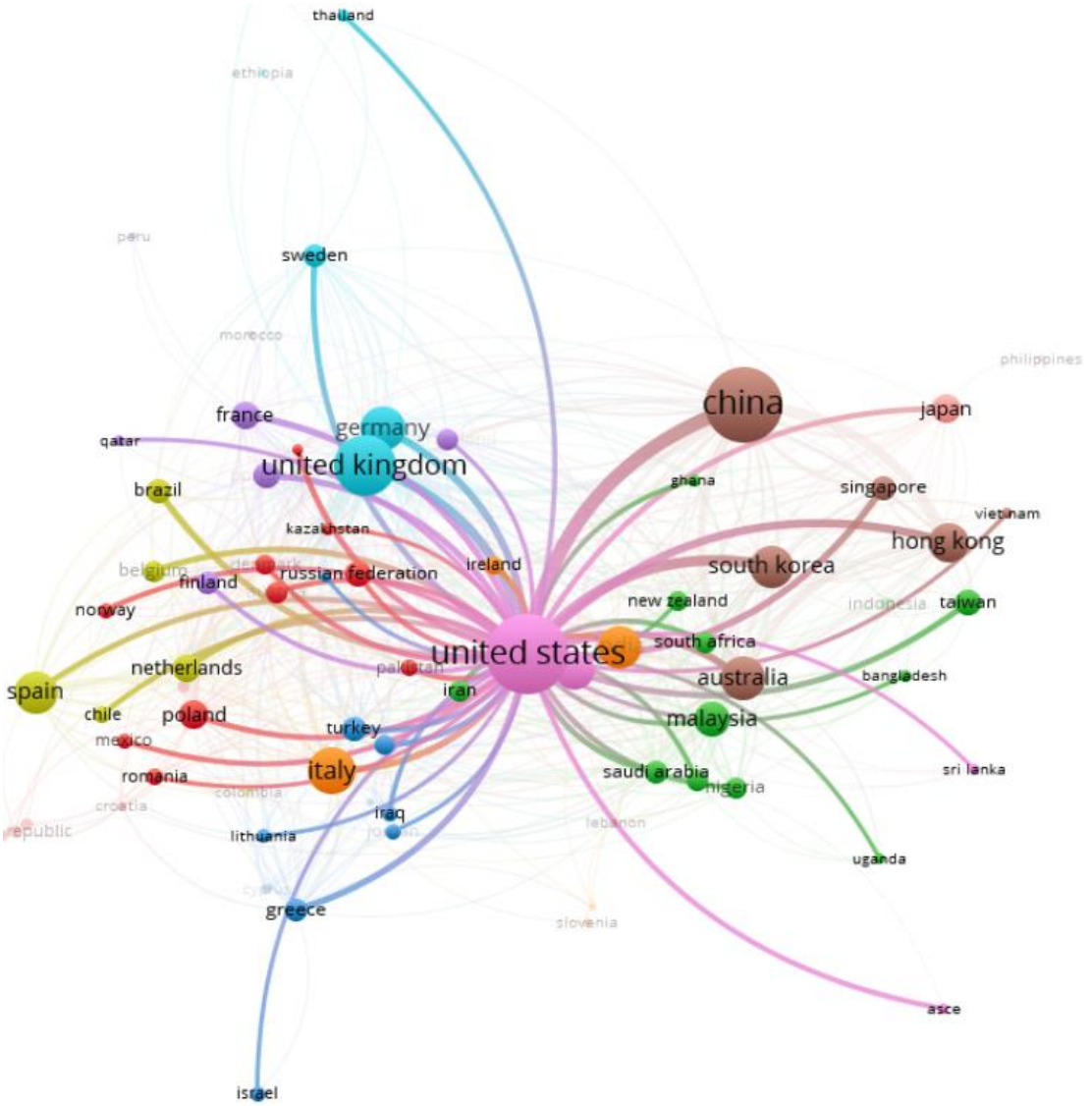
Figura 2: Produção Científica por Países.



Fonte: Autores (2025).

A análise das redes de colaboração entre países indicou claramente a posição dominante dos Estados Unidos como um parceiro atrativo, devido ao volume significativo de publicações e às redes estabelecidas internacionalmente, como também pode ser notado no seu cluster em destaque na Figura 3. O Reino Unido, por sua vez, demonstrou conexões estratégicas tanto com os Estados Unidos quanto com a China, indicando uma abordagem colaborativa robusta e interdisciplinar (Shi *et al.*, 2020), seu cluster na Figura 4 evidencia ainda mais esta perspectiva.

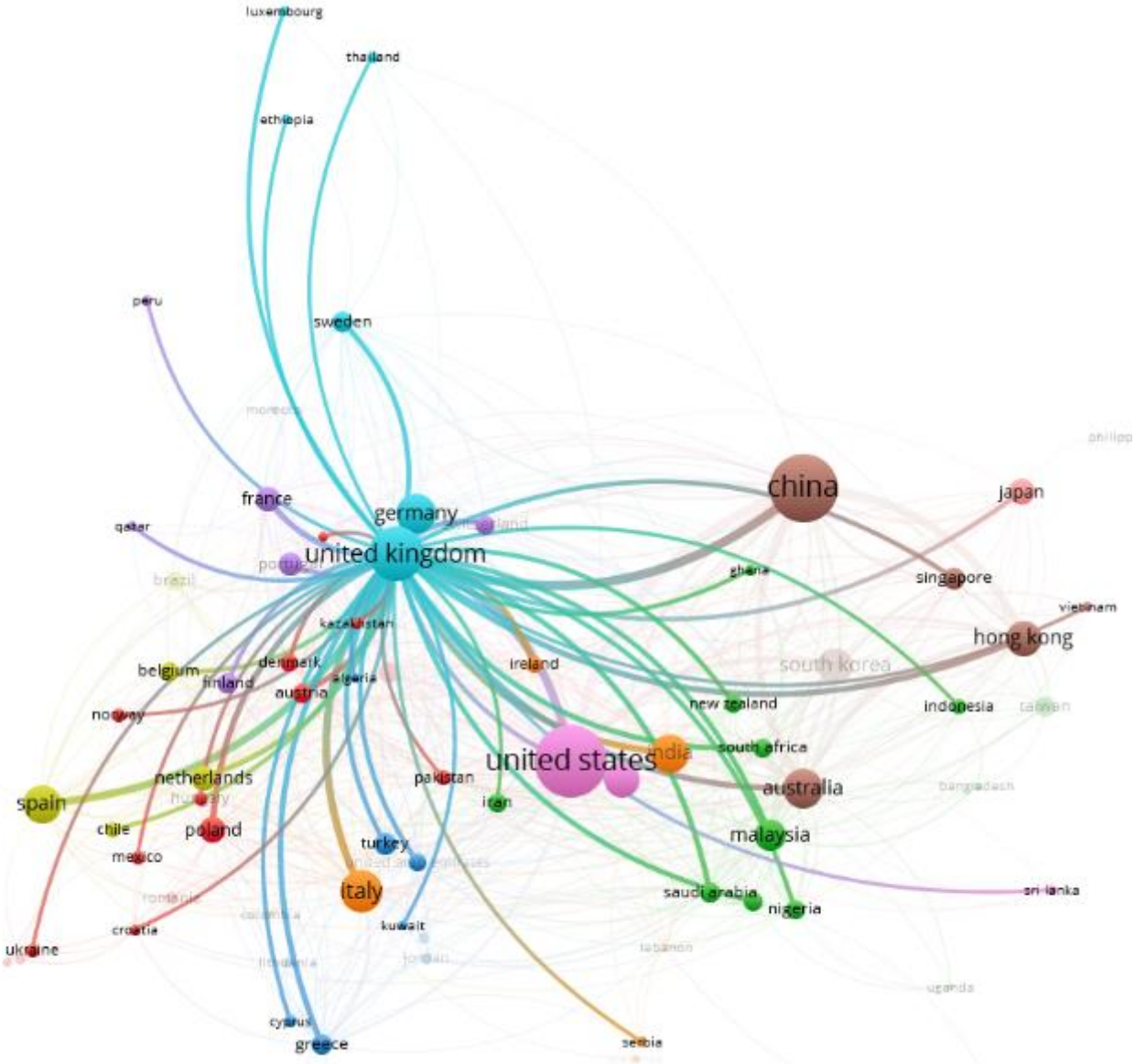
Figura 3: Cluster dos Estados Unidos.



Fonte: Autores (2025).

A robustez da rede dos Estados Unidos reflete não apenas a intensidade da produção científica, mas também a capacidade consolidada desse país em estabelecer parcerias internacionais sólidas, atraindo pesquisadores e promovendo trocas de conhecimentos estratégicos. Essa liderança também implica uma responsabilidade em disseminar práticas tecnológicas e metodológicas eficientes para países com menor desenvolvimento na área, como é o caso do Brasil, que ainda apresenta uma rede pouco desenvolvida e desconectada das grandes potências de pesquisa. Na Figura 4, pode ser observado o cluster de co-autoria do Reino Unido em destaque.

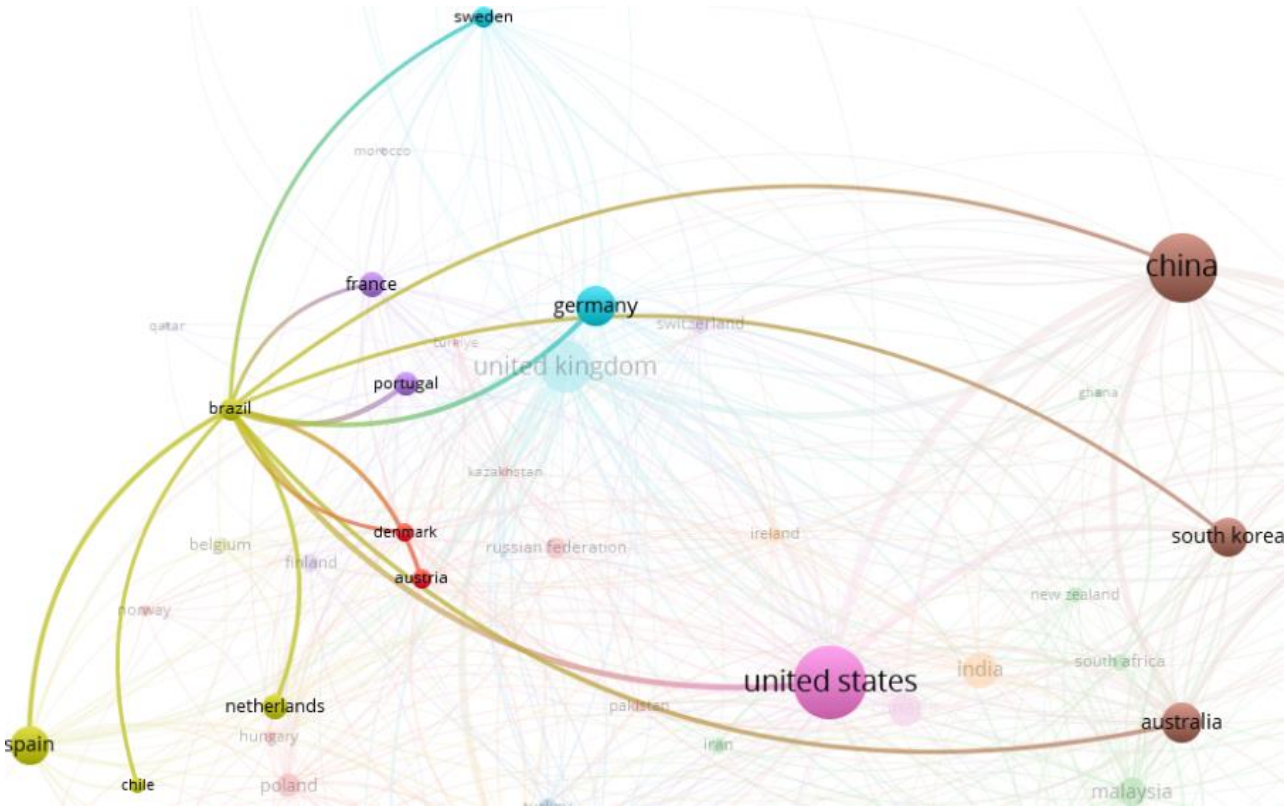
Figura 4: Cluster do Reino Unido.



Fonte: Autores (2025).

O cluster do Reino Unido, também merece destaque especial. Posicionando-se estrategicamente, o Reino Unido estabelece fortes conexões com os dois maiores produtores científicos do tema, Estados Unidos e China. Essa rede bem estruturada demonstra a capacidade do Reino Unido em atuar como uma ponte acadêmica e tecnológica entre os dois principais pólos mundiais de pesquisa, potencializando a troca de conhecimentos e a inovação tecnológica no campo dos Sistemas Ciberfísicos aplicados à infraestrutura. Essa abordagem colaborativa sugere um modelo a ser seguido por outros países, especialmente aqueles com menor representatividade científica, como o Brasil. Na Figura 5, pode ser observado o cluster de relações e co-autoria do Brasil.

Figura 5: Cluster de relações e co-autoria do Brasil.



Fonte: Autores (2025).

O cluster do Brasil, embora presente na rede, apresentou-se significativamente menor e isolado em comparação aos principais países, sugerindo que o tema ainda se encontra em fase inicial de desenvolvimento científico-tecnológico no Brasil. Essa constatação sinaliza a necessidade urgente de ampliar investimentos e fortalecer colaborações internacionais para impulsionar o desenvolvimento dessa área de conhecimento no país (CNT, 2022; DNIT, 2023).

A ausência de conexões diretas entre Brasil e Reino Unido, um dos líderes em pesquisas, indica um potencial inexplorado de parcerias que poderia acelerar o avanço tecnológico e metodológico nessa área no contexto brasileiro.

3.2 AUTORES MAIS CITADOS E RELEVANTES

A Tabela 1 de autores mais citados reflete a dominância de pesquisadores ligados à China e aos Estados Unidos, com destaque para Heng Li, Jochen Teizer e Mani Golparvar-fard. Essa dominância pode indicar um viés metodológico e tecnológico orientado por essas regiões, sugerindo que as abordagens adotadas por esses pesquisadores têm guiado significativamente as tendências da pesquisa global. Contudo, essa concentração geográfica levanta preocupações sobre a diversidade metodológica e tecnológica das pesquisas publicadas, o que pode limitar abordagens inovadoras provenientes de regiões menos representadas.

Tabela 1: Autores mais citados e os mais relevantes.

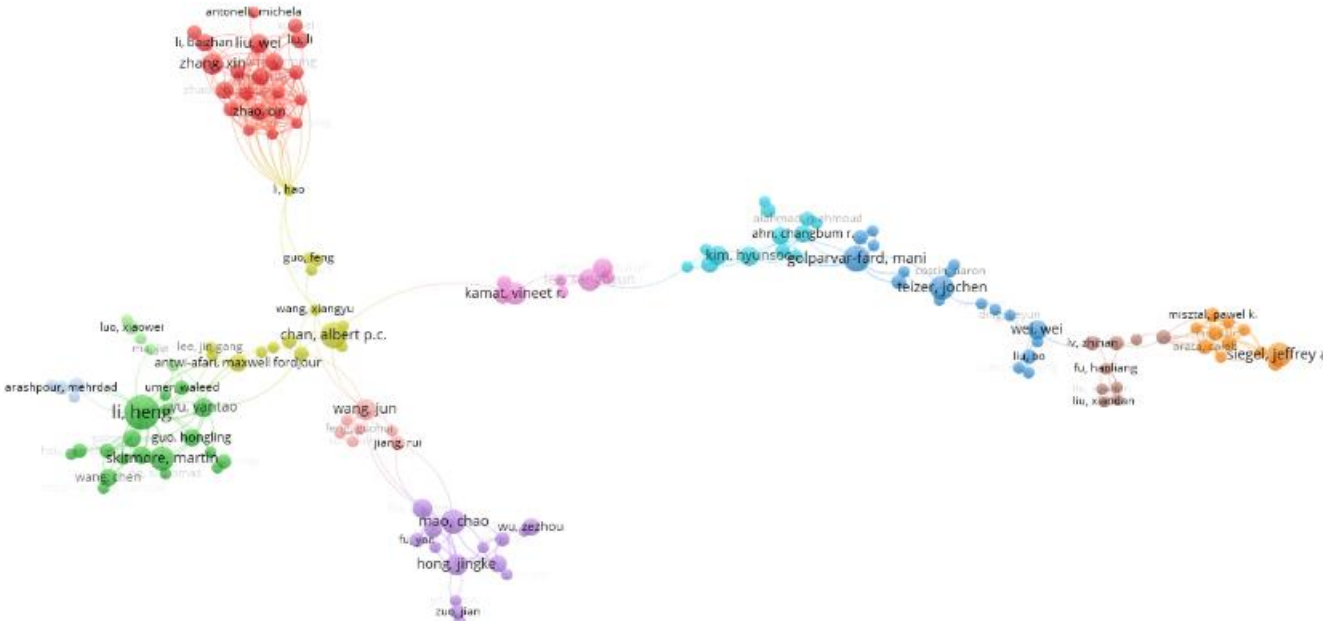
Autor	Artigos publicados	Número de Citações	País
Li, Heng	16	1232	China
Teizer, Jochen	8	1201	Dinamarca
Golparvar-fard, Mani	9	1124	Estados Unidos
Rezgui, Yacine	5	986	Reino Unido
Kamat, Vineet R.	7	602	Estados Unidos
Kim, Hyoungkwan	7	593	Coreia do Sul
Yu, Yantao	5	580	China
Skitmore, Martin	8	579	Austrália
Skubic, Marjorie	5	549	Estados Unidos
Mao, Chao	8	530	China

Fonte: Autores (2025).

Além disso, a rede de coautoria mostra uma segmentação considerável em grupos isolados, refletindo diferentes linhas de pesquisa ou barreiras geográficas e institucionais. É importante ressaltar que na análise apresentada como "País" foram considerados os países aos quais os autores estão afiliados institucionalmente no momento da publicação, não necessariamente refletindo sua nacionalidade. Observa-se que Estados Unidos e China não apenas lideram em número de publicações, mas também se destacam ao possuírem o maior número de autores na lista dos dez mais citados, cada um com três representantes. Este fato reforça ainda mais a influência científica dessas nações no tema investigado.

A rede de coautoria, vista na Figura 6, revela uma fragmentação evidente, no qual clusters separados indicam linhas de pesquisa específicas com pouca interação entre si. Esta segmentação pode representar tanto especializações acadêmicas distintas quanto limitações causadas por barreiras físicas e geográficas.

Figura 6: Rede de co-autoria.

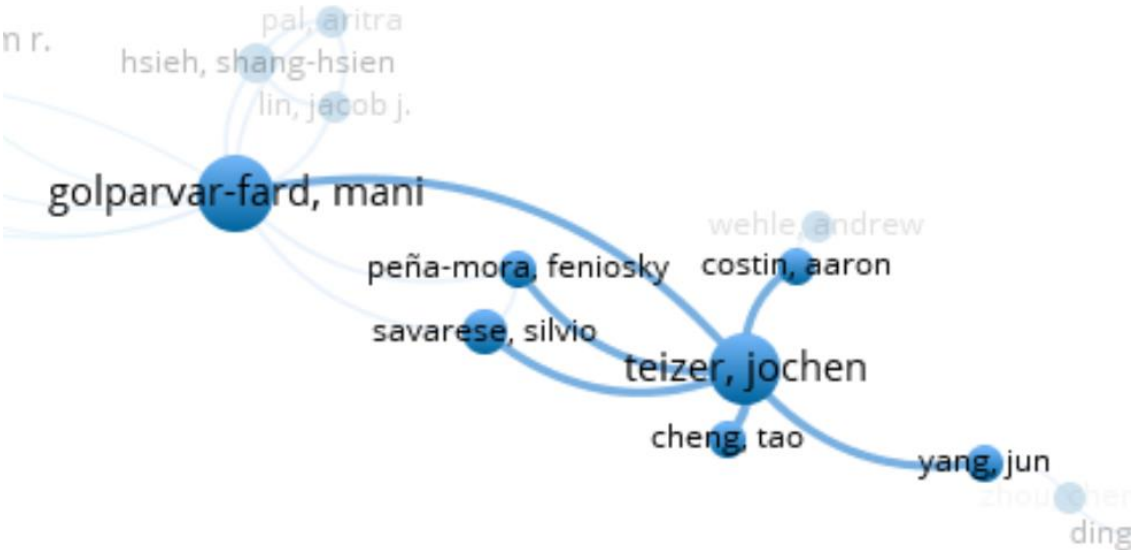


Fonte: Autores (2025).

A falta de conexão entre diferentes grupos de pesquisa sugere oportunidades importantes para fomentar colaborações internacionais e interdisciplinares, capazes de ampliar a diversidade de abordagens e acelerar avanços na área. O desenvolvimento de plataformas colaborativas e o incentivo ao intercâmbio acadêmico poderiam ser estratégias eficientes para superar essas barreiras e enriquecer as pesquisas futuras.

Vale destacar que entre os autores mais citados, apenas Mani Golparvar-fard e Jochen Teizer possuem colaboração direta, destacado na Figura 7, apesar de suas atuais afiliações em países diferentes. Esse fenômeno pode ser explicado pelo histórico acadêmico compartilhado por Teizer nos Estados Unidos, contribuindo para a proximidade acadêmica e científica entre ambos, isso sugere a importância das trajetórias acadêmicas compartilhadas na promoção de colaborações científicas eficazes. Tal exemplo reforça a necessidade de fomentar redes internacionais diversificadas, promovendo intercâmbios acadêmicos que superem barreiras geográficas e institucionais.

Figura 7: Cluster em destaque de Jochen Teizer, destacando sua co-autoria e relação com Mani Golparvar-Fard.



Fonte: Autores (2025).

Dos trabalhos realizados pelos dois, em conjunto, o mais relevante é intitulado "Evaluation of image-based modeling and laser scanning accuracy for emerging automated performance monitoring techniques", e aborda a comparação detalhada entre duas técnicas avançadas de geração de modelos de nuvens de pontos (point cloud models): a modelagem baseada em imagens (Image-Based Modeling) e a varredura a laser (Laser Scanning). Este estudo fornece importantes insights sobre a eficiência e aplicabilidade dessas tecnologias emergentes no monitoramento e gestão da infraestrutura de construção.

3.3 ANÁLISE QUALITATIVA DOS ARTIGOS MAIS RELEVANTES

Nesta seção, serão analisados os artigos mais relevantes identificados na revisão bibliométrica, pode ser observado a lista desses artigos na Tabela 2, destacando-se pela originalidade, impacto nas citações e pela contribuição significativa ao desenvolvimento e aplicação dos Sistemas Ciberfísicos no contexto da manutenção preditiva de pontes e viadutos. Os artigos selecionados fornecem uma visão abrangente das diferentes abordagens metodológicas e tecnológicas adotadas, oferecendo insights importantes sobre as melhores práticas e potenciais áreas para futuras pesquisas.

Tabela 2: Análise qualitativa dos artigos mais relevantes.

Autor	Título	Citações	Ano
Wong K.-Y.	Design of a structural health monitoring system for long-span bridges	129	2007
Mehrabi A.B.	In-service evaluation of cable-stayed bridges, overview of available methods and findings	126	2006
Jeong S.; Hou R.; Lynch J.P.; Sohn H.; Law K.H.	An information modeling framework for bridge monitoring	93	2017
Civera M.; Calamai G.; Zanotti Fragonara L.	System identification via Fast Relaxed Vector Fitting for the Structural Health Monitoring of masonry bridges	48	2021
Eschmann C.; Wundsam T.	Web-based georeferenced 3D inspection and monitoring of bridges with unmanned aircraft systems	39	2017

Fonte: Autores (2025).

Wong (2007) destaca o potencial dos sistemas modulares (estrutura tecnológica composta por componentes independentes, padronizados e intercambiáveis) para o monitoramento de pontes de grande porte em Hong Kong. Sua abordagem sugere a importância de uma estrutura tecnológica padronizada que pode facilitar a manutenção preditiva eficiente, aspecto crucial para adoção global dos CPS. A abordagem modular proposta pode servir como modelo para outros contextos, como o brasileiro, onde tais sistemas ainda são incipientes.

Mehrabi (2006) apresenta uma revisão dos métodos de avaliação em serviço de pontes estaiadas, com foco em técnicas além da inspeção visual tradicional. São exploradas abordagens como dissecção de cabos, ensaios ultrassônicos, radar de impulso e termografia. O autor destaca o uso da técnica analítica Precursor Transformation Method (PTM) para detecção de danos e o monitoramento de vibrações com laser vibrometria. A pesquisa inclui estudos de caso em pontes nos EUA, revelando falhas frequentes e sugerindo diretrizes como a adoção de monitoramento contínuo, manutenção preditiva baseada em dados, uso combinado de métodos analíticos e ensaios não destrutivos, além da criação de protocolos padronizados e capacitação técnica. O trabalho enfatiza a necessidade de sistemas mais eficazes para garantir a segurança e a durabilidade dessas estruturas.

Jeong et al. (2017) propõe um framework de modelagem da informação para monitoramento de pontes, com base na extensão dos padrões OpenBrIM. A pesquisa destaca a limitação dos sistemas tradicionais de gestão de pontes, que operam com dados fragmentados e não integrados. O método apresentado combina modelagem geométrica, modelagem de elementos finitos e descrição de sensores, tudo integrado a um banco de dados NoSQL (Apache Cassandra), que oferece escalabilidade e flexibilidade para lidar com grandes volumes de dados diversos. A implementação foi validada com dados reais da ponte Telegraph Road (EUA), demonstrando duas aplicações práticas: comparação de dados analíticos e medidos e correlação entre dados de sensores e imagens de tráfego. O estudo propõe, como diretrizes, o uso de bancos de dados adaptáveis, integração de modelos analíticos e sensores em um único repositório, e a automação

de consultas para apoiar decisões técnicas. A abordagem destaca-se por promover interoperabilidade e automação em contextos onde atualmente predominam operações manuais e isoladas.

Civera et al. (2021) investiga a eficácia do método Fast Relaxed Vector Fitting (FRVF) na identificação modal para o monitoramento estrutural de pontes de alvenaria, especialmente em estruturas históricas sujeitas a envelhecimento e danos por escorregamento de fundações. Após validação com dados sintéticos e um experimento preliminar em uma viga de alumínio, o método é aplicado em uma réplica em escala reduzida de uma ponte de alvenaria com danos progressivos simulados. O FRVF demonstrou ser eficiente e robusto, superando o método clássico ERA em velocidade e resistência ao ruído. Como diretrizes, o estudo defende a aplicação do FRVF em estruturas reais, a integração com sensores de alta sensibilidade, a análise da evolução das frequências naturais e a comparação com métodos consagrados para validação cruzada. O trabalho reforça o uso do FRVF como ferramenta viável e promissora para avaliação da integridade estrutural em patrimônios arquitetônicos.

Eschmann (2017) destaca o uso de drones para inspeções estruturais detalhadas em pontes de difícil acesso, ampliando significativamente as possibilidades para monitoramento contínuo e detalhado. Essa abordagem tecnológica emergente apresenta desafios relacionados à precisão dos dados obtidos, porém suas vantagens são claras em termos de segurança, eficiência e custo-benefício, representando uma evolução potencial na inspeção estrutural preventiva.

3.4 EVOLUÇÃO TEMPORAL DAS PUBLICAÇÕES

A análise observada no Gráfico 1 sobre a produção científica por ano confirma um aumento substancial no interesse pelo tema, especialmente após 2017. Essa tendência crescente sugere uma resposta direta às demandas crescentes de segurança e eficiência em infraestruturas como pontes e viadutos, impulsionada pela evolução tecnológica e por desastres recentes relacionados ao tema. Considerando essa tendência, torna-se imperativo ampliar pesquisas em outras regiões como o Brasil, onde a aplicação dessas tecnologias ainda é limitada, para assim garantir avanços significativos em segurança viária e eficiência econômica.

Gráfico 1: Publicações por ano.



Fonte: Autores (2025).

Essas análises detalhadas enfatizam que, apesar dos avanços significativos, ainda existem desafios críticos a serem enfrentados, especialmente no que diz respeito à padronização tecnológica e treinamento especializado, aspectos essenciais para que os benefícios das tecnologias de CPS possam ser plenamente aproveitados.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da análise detalhada e dos resultados obtidos nesta revisão bibliométrica, conclui-se que os Sistemas Ciberfísicos (CPS) têm se consolidado significativamente como uma área de grande interesse e desenvolvimento científico aplicado ao gerenciamento e manutenção preditiva de pontes e viadutos. Os resultados demonstraram claramente que Estados Unidos, China e Reino Unido lideram a produção científica, refletindo investimentos robustos em pesquisa e inovação tecnológica na infraestrutura rodoviária.

Destaca-se que, apesar da liderança evidente desses países, existe uma preocupante fragmentação nas redes de colaboração, especialmente visível a partir das redes de coautoria entre pesquisadores. Essa fragmentação indica oportunidades consideráveis para fomentar colaborações internacionais e interdisciplinares que possam enriquecer as pesquisas futuras, promover a troca efetiva de conhecimentos e ampliar a diversidade metodológica e tecnológica.

A análise qualitativa revelou ainda abordagens metodológicas inovadoras, como o uso de modelagem baseada em imagens, varredura a laser e tecnologias emergentes como drones para inspeção estrutural. Esses avanços sugerem grande potencial para otimizar processos de manutenção preventiva, reduzir custos operacionais e aumentar a segurança estrutural.

Para países com menor produção científica e redes menos desenvolvidas, como o Brasil, é crucial ampliar investimentos em pesquisa, estabelecer parcerias estratégicas com nações líderes e incentivar intercâmbios acadêmicos que possibilitem uma maior inserção tecnológica. O desenvolvimento de políticas públicas específicas e a formação de recursos humanos qualificados são igualmente essenciais para aproveitar plenamente os benefícios que os CPS podem proporcionar.

Finalmente, recomenda-se que futuras pesquisas foquem em superar desafios como a padronização tecnológica e o treinamento especializado, elementos chave para garantir uma implementação eficaz e global dos Sistemas Ciberfísicos, assegurando segurança, sustentabilidade e eficiência na infraestrutura crítica.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal do Ceará (UFC), em especial ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PEC), pelo apoio fornecido durante o desenvolvimento deste estudo. Agradecem ainda aos professores Luís Felipe Cândido e José de Paula Barros Neto pelas valiosas contribuições acadêmicas e orientações fornecidas ao longo da disciplina do curso de mestrado.

REFERÊNCIAS

Cândido, L. F., Lazaro, J. C., Silva, A. O. F., & Neto, J. P. B. (2023). Sustainability Transitions in the Construction Sector: A Bibliometric Review. Sustainability, 15(1), 123-145.

Civera, M., Zanotti Fragonara, L., & Surace, C. (2021). Fast relaxed vector fitting for identification of structural systems from dynamic measurements. Mechanical Systems and Signal Processing, 152, 107355.

CNT – Confederação Nacional do Transporte. (2022). Pesquisa CNT de Rodovias 2022. Brasília: CNT. Disponível em: https://cnt.org.br/pesquisa-cnt-de-rodovias. Acesso em: 10 set. 2022.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2023). Manual de inspeção de pontes rodoviárias. Brasília: DNIT. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/manuais/manual-de-inspecao-de-pontes-rodoviarias. Acesso em: 15 mar. 2025.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Relatório de Gestão 2023. Brasília: DNIT, 2023. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/acesso-a-informacao/auditoria/relatorio-de-gestao/relatorio-de-gestao-2023.pdf. Acesso em: 22 abr. 2025.

Eschmann, C., Kuo, C.M., & Kuo, C.H. (2017). Unmanned aircraft systems for remote building inspection and monitoring. Automation in Construction, 72, 228-239.

GOVERNO DO MARANHÃO. Brandão lança pacote de medidas para reduzir impactos socioeconômicos em municípios maranhenses afetados com a queda da ponte em Estreito. Disponível em: Governo do Maranhão. Acesso em: 21 mar. 2025.

Jeong, Y.S., Eastman, C.M., Sacks, R., & Kaner, I. (2017). Benchmark tests for BIM data exchanges of precast concrete. Automation in Construction, 84, 353-362.

Liu, Z., Zhang, Y., & Huang, Q. (2020). Structural health monitoring of bridges based on wireless sensor network technology. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 10(2), 243-255.

Mehrabi, A.B. (2006). In-service evaluation of cable-stayed bridges, overview of available methods, and findings. Journal of Bridge Engineering, 11(6), 716-724.

Rajkumar, R., Lee, I., Sha, L., & Stankovic, J. (2010). Cyber-physical systems: The next computing revolution. Proceedings of the 47th Design Automation Conference, 731-736.

Sawhney, A., Riley, M., & Irizarry, J. (2020). Construction 4.0: An Innovation Platform for the Built Environment. Routledge.

Shi, Z., Huang, H., & Li, Y. (2020). Challenges and opportunities of cyber-physical systems in bridge health monitoring. Automation in Construction, 119, 103347.

Sony, S., Laventure, S., & Sadhu, A. (2019). A literature review of next-generation smart sensing technology in structural health monitoring. Structural Control and Health Monitoring, 26(3), e2321.

Teizer, J., & Golparvar-Fard, M. (2017). Evaluation of image-based modeling and laser scanning accuracy for emerging automated performance monitoring techniques. Automation in Construction, 77, 141-154.

Wan, J., Tang, S., Li, D., Wang, S., Liu, C., Abbas, H., & Vasilakos, A.V. (2018). A manufacturing big data solution for active preventive maintenance. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 13(4), 2039-2047.

Wong, K.Y. (2007). Design of a structural health monitoring system for long-span bridges. Structure and Infrastructure Engineering, 3(2), 169-185.

Ye, X.W., Jin, T., & Su, Y.H. (2020). Bridge Structural Health Monitoring and Maintenance Using Internet of Things: State-of-the-Art and Future Challenges. Sensors, 20(20), 5774.

Zhang, Y., Liu, Z., & Huang, Q. (2021). Predictive maintenance of bridge structures using cyber-physical systems and machine learning. Automation in Construction, 125, 103627.