



Artigos de Revisão



<http://revistarebram.com/index.php/revistauniara>

USO INTEGRADO DE BIM E SOFTWARES DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA E PROJETO ESTRUTURAL

Renato Silva Nicoletti*; Vitor Lourensato Leoni**; Angelo Giovanni Bonfim Corelhano***; Alex Sander Clemente de Souza
Cristiane Bueno****

* *Doutorando no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos (PPGECiv/UFSCar).*

** *Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos (PPGECiv/UFSCar).*

*** *Mestre em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) pela Universidade de São Paulo.*

**** *Doutorado em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) pela Universidade de São Paulo.*

***** *Doutorado pelo Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo - IAU USP.*

*Autor para correspondência e-mail: renato_nicoletti@hotmail.com

PALAVRAS-CHAVE

Modelagem da Informação
da Construção
Interoperabilidade
Método dos Elementos Finitos.

KEYWORDS

Building Information
Modeling
Interoperability
Finite Element Method

RESUMO: Pesquisas sobre a utilização da Modelagem da Informação da Construção (BIM) vêm ganhado bastante espaço ultimamente. A tecnologia BIM traz inúmeros benefícios para os projetos de engenharia por meio da integração de dados multidisciplinares e a criação de representações digitais detalhadas. Por esse motivo, o presente trabalho teve como objetivo analisar o estado da arte da integração do BIM com os softwares Abaqus, Ansys, Robot e SAP2000, muito utilizados para projetos estruturais e simulações numéricas. Para tanto, foi realizada uma revisão sistemática da literatura nas bases de dados *Web of Science e Scopus*, buscando artigos que associavam o termo BIM com cada software analisado. Um total de 30 artigos foi encontrado inicialmente e, após uma filtragem dos mesmos, restaram 17 artigos relevantes, que foram então analisados e discutidos um a um. Após a análise dos artigos, diversos benefícios foram encontrados, contudo, lacunas e limitações também foram identificadas, mostrando a necessidade de estudos sobre a interoperabilidade entre o BIM e os softwares estruturais.

INTEGRATED USE OF BIM AND NUMERICAL SIMULATION AND STRUCTURAL DESIGN SOFTWARE

ABSTRACT: Research on the use of Building Information Modeling (BIM) has gained a lot of space lately. BIM technology brings numerous benefits to engineering projects through the integration of multidisciplinary data and the creation of detailed digital representations. For this reason, this work aimed to analyze the integration of BIM with Abaqus, Ansys, Robot and SAP2000 software, widely used for structural projects and numerical simulations. Therefore, a systematic literature review was performed in the Web of Science and Scopus databases, seeking articles that associated the term BIM with each software analyzed. A total of 30 articles were initially found and, after filtering them, 17 relevant articles remained, which were then analyzed and discussed one by one. After analyzing the articles, several benefits were found, however, gaps and limitations were also identified, showing the need for studies on the interoperability between BIM and structural software's.

Recebido em: 15/05/2022

Aprovação final em: 17/07/2022

DOI: <https://doi.org/10.25061/2527-2675/ReBraM/2022.v25i3.1397>

INTRODUÇÃO

A tecnologia BIM, *Building Information Modeling* ou Modelagem da Informação da Construção, é um processo que desenvolve um modelo informativo semanticamente rico de um projeto que pode ser utilizado durante todo o ciclo de vida do projeto. (EASTMAN *et al.*, 2014). O BIM vem ganhando muito espaço ultimamente na indústria AECO (Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação), visto que permite a criação de um modelo virtual de uma edificação com suas informações técnicas e diversos outros dados, dependendo do nível de detalhamento utilizado ou da dimensão da tecnologia BIM adotada, onde cada nível acrescenta cada vez mais informações.

De acordo com o Guia AsBEA (2013), Boas Práticas em BIM, fascículo 1, ao longo do processo evolutivo do desenvolvimento de projetos, surgiu a nova plataforma BIM, com o lançamento de novos softwares, que utilizam processos e conceitos inovadores. A partir disso, os desenhos dos projetos não foram mais desenvolvidos em modelos bidimensionais, mas sim em modelos tridimensionais, que contêm todas as informações relativas à construção nas diversas fases de seu ciclo de vida. Informações estas que são alocadas em um só modelo integrado, paramétrico, intercambiável e passível de simulação, que pode ser utilizado desde à concepção dos projetos, ao decorrer das obras e durante toda a vida útil da edificação.

Em toda edificação, o processo de projeto trata-se de um conjunto de procedimentos que visa fundamentar a produção de um objeto por meio das características físicas do projeto (projeto do produto) e utilizando informações acerca do método de produção (projeto do processo). Nesse contexto, os diversos softwares que apareceram no mercado permitiram a aplicação do BIM em etapas e nas mais diversas disciplinas de projeto. A análise estrutural é uma delas, essencial ao longo do desenvolvimento dos projetos e que necessita de total interoperabilidade entre outras diversas disciplinas para evitar incompatibilidades.

Nesse contexto, investigou-se a correlação entre o BIM e os softwares da Tabela 1.

Tabela 1 - Softwares cuja interoperabilidade com o BIM foi estudada.

Software	Desenvolvedor	Principal aplicação
Abaqus	Simulia/Dassault Systemes S.A.	Simulações numéricas , por elementos finitos, dos mais variados problemas da engenharia.
Ansys	Ansys Inc.	
Robot	Autodesk	Análise estrutural , por elementos finitos, e dimensionamento com base nas normas técnicas.
SAP2000	Computer and Structures Inc.	

Fonte: Elaborado pelos autores.

Todos eles realizam análises estruturais lineares e não lineares, estáticas e dinâmicas, utilizando o método dos elementos finitos, contando também com uma interface 3D orientada a objetos para auxiliar o usuário. A principal diferença entre os softwares se dá pelo fato de o SAP2000 e o Robot serem voltados para projetos e possuírem biblioteca de elementos limitadas e com aplicações mais específicas na construção civil. Por outro lado, o Abaqus e o Ansys possuem maiores potencialidades por possuírem biblioteca de elementos finitos mais amplas e abertas, dotadas de vários procedimentos e métodos de análise - o que permite seu uso em projetos menos comuns (diferenciados), tais como na indústria naval, aeronáutica, automobilística e etc.

Devido à grande quantidade de programas de diversas empresas e funcionalidades, a interoperabilidade entre todos eles se tornou algo desafiador. Eastman *et al.* (2010) mostra que as funções de exportação e importação para os mesmos dados, entre os softwares, estão entre os principais desafios de interoperabi-

lidade a serem superados e acabam constituindo uma barreira para o avanço do BIM. Já Venugopal *et al.* (2012) diz que a interoperabilidade é considerada um fator chave para agilizar os fluxos de informação entre as diferentes disciplinas e possui grande influência no valor do BIM na indústria.

Eastman *et al.* (2014) mostram os dois principais modelos de dados de produtos de construção: o Industry Foundation Classes (IFC), utilizado para planejamento, projeto, construção e gerenciamento de edificações; e o CIMSteel Integration Standard Versão 2 (CIS/2), especializado para engenharia e fabricação de aço estrutural. Ambos permitem representar, usando a linguagem EXPRESS, diversas propriedades necessárias para o projeto e produção de um modelo.

Como o formato CIS/2 seguiu um caminho mais especializado na área de estruturas metálicas, o IFC ganhou bastante importância e novas atualizações ao longo do tempo, sendo o principal formato utilizado para os produtos associados à construção. Cada vez mais a BuildingSMART (organização internacional que visa melhorar o intercâmbio de informações entre aplicativos de software usados na indústria da construção) vem realizando grandes esforços para liberar novos protocolos e aumentar a interoperabilidade dos arquivos IFC.

Nesse contexto, o presente trabalho apresenta um detalhamento dos trabalhos que mesclam o uso de BIM com os softwares Abaqus, Ansys, Robot e SAP2000, expondo as diferentes aplicações, ferramentas, e dados de input e output, delineando o estado da arte sobre o tema, e contribuindo para o avanço das pesquisas na área.

METODOLOGIA

A principal etapa da revisão sistemática teve o objetivo de encontrar artigos científicos correlacionando o BIM com os softwares Abaqus, Ansys, Robot e SAP2000. Com esse intuito, em maio de 2021, foi conduzida uma revisão sistemática nas bases de dados Web of Science (WoS) e Scopus. A busca se restringiu a artigos científicos publicados a partir de 1900. A revisão sistemática foi realizada com quatro buscas diferentes (1 a 4), a fim de encontrar os artigos correlacionam o uso do BIM com os softwares Abaqus, Ansys, Robot e SAP2000, respectivamente.

ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

A Tabela 2 apresenta as strings utilizadas para cada busca nas bases e o número de artigos encontrados.

Tabela 1 - Strings de buscas e número de artigos encontrados inicialmente.

Busca	String Web of Science	String Scopus	Número de artigos
1	(BIM*) AND (abaqus*);	TITLE-ABS-KEY ("BIM*") AND TITLE-ABS-KEY ("abaqus*") AND DOCTYPE (ar) AND PUBYEAR > 1900;	2
2	(BIM*) AND (ansys*);	TITLE-ABS-KEY ("BIM*") AND TITLE-ABS-KEY ("ansys*") AND DOCTYPE (ar) AND PUBYEAR > 1900;	9
3	(BIM*) AND (robot*) AND (structural*);	TITLE-ABS-KEY ("BIM*") AND TITLE-ABS-KEY ("robot*") AND TITLE-ABS-KEY ("structural*") AND DOCTYPE (ar) AND PUBYEAR > 1900;	18
4	(BIM*) AND (SAP2000*)	TITLE-ABS-KEY ("BIM*") AND TITLE-ABS-KEY ("SAP2000*") AND DOCTYPE (ar) AND PUBYEAR > 1900.	4

Fonte: Elaborado pelos autores.

Vale ressaltar que:

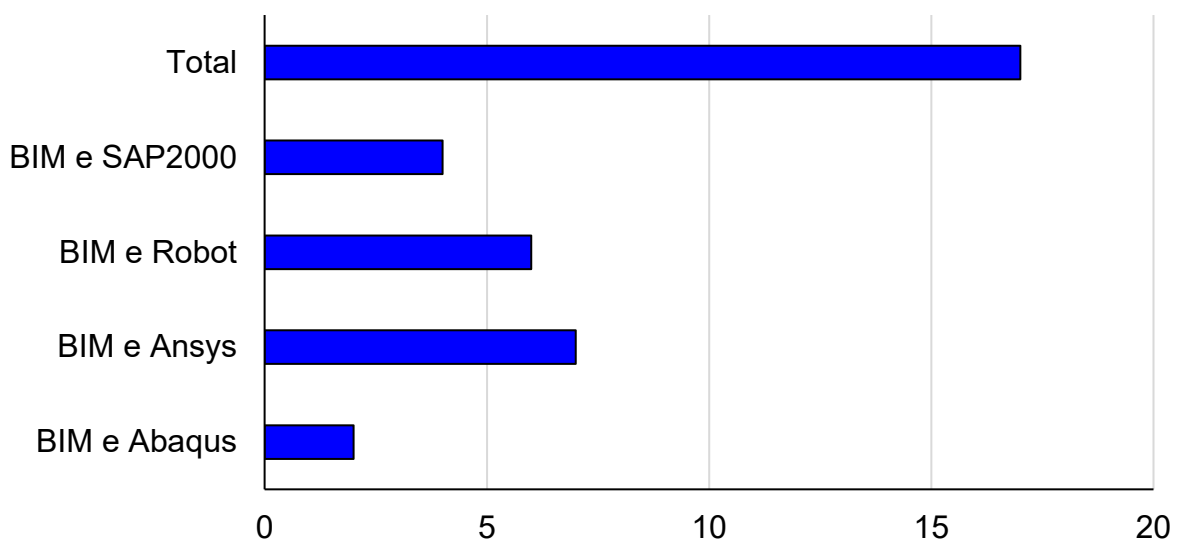
- O operador "AND" significa "e" e determina que os dois termos separados por ele devam constar no título e/ou no resumo e/ou nas palavras-chaves do artigo;
- O caractere "*" tem a função de localizar os termos quando estes estão inseridos em um substantivo composto – “interação BIM-ABAQUS”, por exemplo;
- Na *String 3*, o termo "*structural*" foi adicionado, pois, pesquisando apenas "BIM" e "Robot", muitos documentos com o termo "*robotic*" eram encontrados. Com a adição do termo "*structural*" foi possível refinar as buscas para a finalidade do presente trabalho.

Em todas as strings, os documentos encontrados foram exportados para um arquivo com extensão ".bib" e dois arquivos foram gerados, um para cada base. Na sequência, eles foram importados para o R Studio e combinados, excluindo as repetições, utilizando a ferramenta "*mergeDbSources*" do pacote Bibliometrix do R (ARIA; CUCCURULLO, 2017).

A soma do número dos artigos das buscas resultou em mais do que 30 pelo fato de haver artigos iguais entre elas. Após a leitura do resumo, diversos artigos foram excluídos da análise. Os principais motivos de exclusão foram: idioma em chinês; não obtenção da versão completa do documento; artigos cujo acrônimo BIM se referia a "*building insulation materials*", isto é, materiais de isolamento; trabalhos que se referiam ao Robot com outro sentido e não ao *software* desenvolvido pela Autodesk. Com tais filtros, 13 artigos foram excluídos e restou um total de 17.

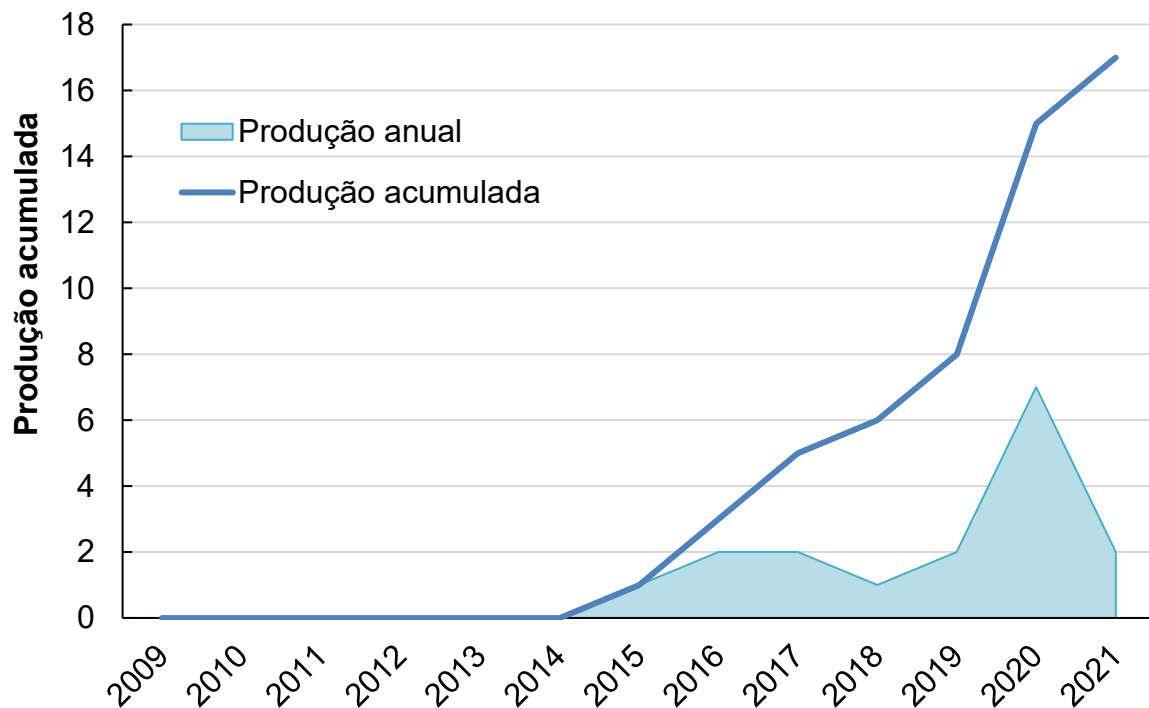
A Figura 1 apresenta a quantidade de artigos encontrada em cada busca e o total de artigos, considerando as exclusões. Ainda pela Figura 1, nota-se que as buscas que resultaram maior número de artigos foram a do Ansys e do Robot (com 7 e 6 artigos, respectivamente). Na sequência, tem-se o SAP2000 (4) e o Abaqus (2).

Figura 1 – Quantidade de artigos encontrada nas buscas.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A Figura 2 apresenta a produção acumulada e a produção anual considerando todos os 30 artigos encontrados.

Figura 2 – Produção acumulada e anual dos artigos.

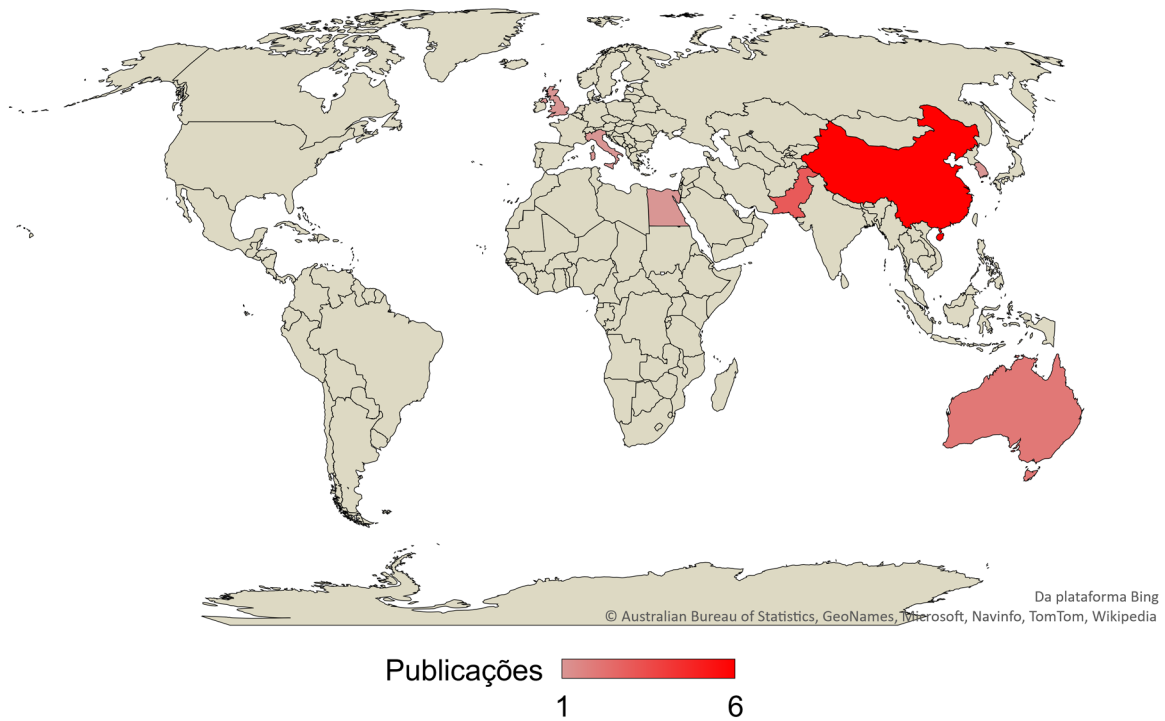
Fonte: Elaborado pelos autores.

Observa-se que as pesquisas correlacionando BIM com os softwares Abaqus, Ansys, SAP2000 e Robot se iniciaram em 2009 e há uma forte tendência de crescimento nos últimos anos. Praticamente, cerca de 53 % (9 de 17) dos trabalhos foram publicados nos últimos 2 anos. Isso indica que ainda há lacunas e carências a serem estudadas e um potencial de evolução.

Em relação aos países que possuem autores com maior número de publicações, em primeiro lugar tem-se a China (com 6 artigos), seguido do Paquistão (3) e da Austrália e da República Tcheca (2). A Figura 3 apresenta um mapa com os países cujos autores publicaram no tema do presente estudo. Acredita-se que essa distribuição se justifica pelo fato de tais países realizarem muitas pesquisas por meio de análises numéricas, nos quais os softwares, Abaqus, Ansys e SAP2000 são muito utilizados.

Em termos de relevância, a Tabela 3 apresenta os artigos com maior número de citações dentre os selecionados. O número de citações do trabalho de Hu *et al.* (2016) justifica-se pelo ano de publicação, pelo periódico, que possui grande projeção e elevado fator de impacto, e pelo fato de correlacionar o BIM com dois softwares, o Ansys e o SAP2000. O segundo e o terceiro trabalho mais citado são o de Tang *et al.* (2020) e o de Biancardo *et al.* (2020), que tratam sobre aplicações envolvendo BIM com o Abaqus e o Robot, respectivamente. Apesar de ambos serem recentes (publicados em 2020), os periódicos possuem extensa projeção. Por fim, os trabalhos de Li (2015) e Chen *et al.* (2017) tratam sobre aplicações correlacionando o BIM com os softwares Robot e Ansys. Embora ambos sejam de periódicos de menor impacto, em relação aos três mais citados, fazem mais de 4 anos que ambos os trabalhos foram publicados.

Figura 3 – Países com autores pesquisando o uso do BIM nos softwares Abaqus, Ansys, SAP2000 e Robot.



Fonte: Elaborado pelos autores.

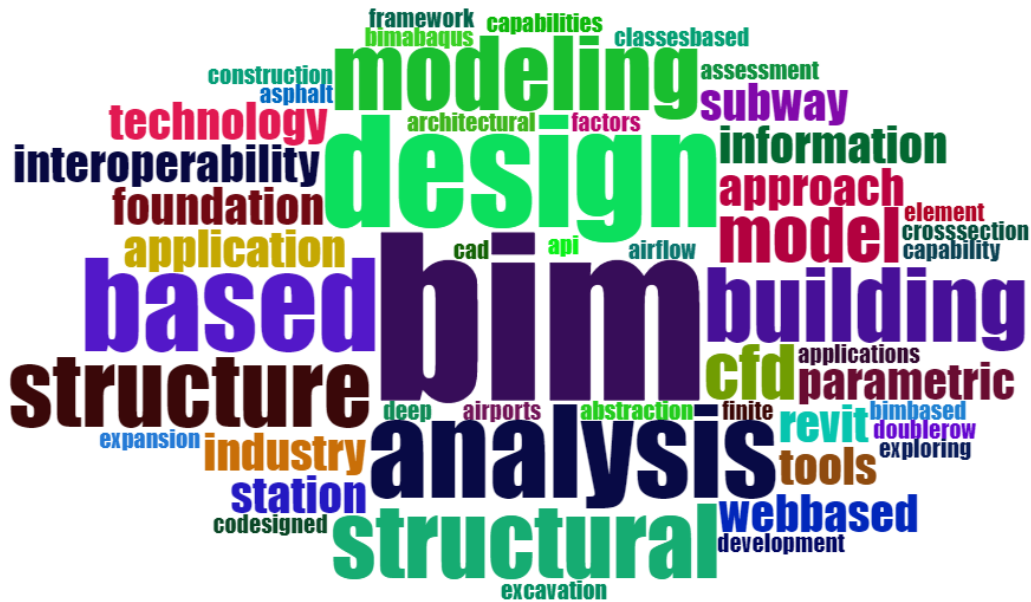
Tabela 3 - Artigos com maior número de citações que investigaram o uso do BIM nos softwares Abaqus, Ansys, SAP2000 e Robot.

Autores (Ano) - Revista	DOI	Citações
Hu <i>et al.</i> (2016) – Automation in Construction	10.1016/j.autcon.2016.02.001	34
Tang <i>et al.</i> (2020) – Automation in Construction	10.1016/j.autcon.2019.103066	16
Biancardo <i>et al.</i> (2020) - Infrastructures	10.3390/infrastructures5050041	7
Li, K. (2015) - Journal of Railway Engineering Society	Não possui	7
Chen <i>et al.</i> (2017) - Journal of Xian University of Architecture and Technology	10.15986/j.1006-7930.2017.03.009	3

Fonte: Elaborado pelos autores.

Por fim, a Figura 4 apresenta uma nuvem de palavras considerando as que são mais frequentes no título dos documentos. Dentre as palavras da Figura 4, é possível notar as seguintes com maior destaque: BIM; *design*; *analysis*; *structural*; *building*; *structure*; e *based*. Todas coerentes com o propósito deste trabalho e justificam-se pelo fato de o Robot ser um software de análise (*analysis*) e projeto (*design*) estrutural (*structural*) de edificações (*buildings*), enquanto o Abaqus, o Ansys e o SAP2000 são softwares destinados a análises (*analysis*) numéricas fundamentadas (*based*) no método dos elementos finitos.

Figura 4 – Nuvem de palavras considerando os termos mais frequentes no título.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Por fim, a Figura 4 apresenta uma nuvem de palavras considerando as que são mais frequentes no título dos documentos. Dentre as palavras da Figura 4, é possível notar as seguintes com maior destaque: BIM; *design*; *analysis*; *structural*; *building*; *structure*; e *based*. Todas coerentes com o propósito deste trabalho e justificam-se pelo fato de o Robot ser um software de análise (*analysis*) e projeto (*design*) estrutural (*structural*) de edificações (*buildings*), enquanto o Abaqus, o Ansys e o SAP2000 são softwares destinados a análises (*analysis*) numéricas fundamentadas (*based*) no método dos elementos finitos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas subseções a seguir, o conteúdo dos artigos de cada busca é discutido individualmente.

BIM E ABAQUS

Foram identificados apenas dois artigos correlacionando o BIM e o software Abaqus - ambos de 2020.

Han e Zhang (2020) analisaram a estabilidade de tubulações de grande diâmetro por meio da tecnologia BIM e do Abaqus. Os autores utilizaram uma tecnologia BIM (não especificada) para modelar as tubulações e o solo. Na sequência, o impacto de quedas de rochas sobre as tubulações foi analisado pelo software Abaqus. Contudo, os autores não detalharam nem fizeram quaisquer comentários quanto a interoperabilidade entre o modelo BIM de dutos e a análise feita no Abaqus.

Tang *et al.* (2020) conduziram uma modelagem paramétrica e verificação da estrutura de pavimento asfáltico utilizando um modelo em BIM do Revit conjuntamente com o Abaqus. Os autores afirmam que o uso do BIM ainda não avançou muito no contexto da engenharia rodoviária. Com tal justificativa, Tang *et al.* (2020) propuseram uma interface de dados capaz de apresentar a modelagem visual tridimensional e de realizar cálculos estruturais para pavimentação asfáltica. Uma modelagem de visualização 3D do pavimento asfáltico foi inicialmente feita por meio do software de modelagem Revit. Em seguida, o arquivo do modelo gerado (.RVT) foi importado para o software transferidor YJK, e o modelo foi transformado em um arquivo denominado INP pelo software transferidor. Assim, o arquivo do modelo gerado (.INP) foi analisado pelo software Abaqus. Por meio de uma aplicação no pavimento semirrígido de uma rodovia

na China, pôde-se verificar que a interface de conversão de dados proposta pelos autores foi eficiente e permitiu a integração dos dados do BIM na análise estrutural.

Dentre os trabalhos envolvendo “BIM” e o software “Abaqus”, nenhuma lacuna/dificuldade foi relatada pelos autores e o potencial de atuação conjunta das tecnologias foi ressaltado e comprovado por meio de uma aplicação geotécnica e outra rodoviária. Entretanto, o fato de haver apenas dois trabalhos e ambos serem de 2020 indica que os estudos no tema estão numa fase incipiente e certamente há muitas lacunas a serem identificadas e preenchidas.

BIM E ANSYS

No total, foram identificados 8 trabalhos correlacionando BIM e Ansys. Todos estão discutidos individualmente a seguir, com exceção dos trabalhos de Shoieb *et al.* (2020) e de Hu *et al.* (2016), discutidos nas seções 3.3 e 3.4, respectivamente, pelo fato de terem avaliado a interação do BIM sobretudo com o Robot e o SAP2000.

Porter *et al.* (2020) desenvolveu um artigo intitulado "LODOS - Indo de BIM para CFD via CAD e abstração de modelo". Nele, os autores realizam e discutem os desafios para simular a dinâmica de fluidos computacionais (CFD) em modelos de ambientes e objetos do mundo real. Foi averiguado que as principais dificuldades são os esforços necessários para renderizar objetos e ambientes complexos e também a capacidade computacional necessária para os resolver. Nesse contexto, Porter *et al.* (2020) apresentam um processo para importar modelos de informações de construção ou modelos CAD 3D para o software Ansys. Além disso, os pesquisadores discutem um sistema denominado de "LODOS", cuja função é auxiliar na importação e configuração de modelos de alta complexidade, reduzindo seletivamente a complexidade geométrica. Para trabalhar com modelos nos quais a modelagem de fluido de alta precisão é necessária, o tipo de abstração usado no LODOS pode ser inadequado. O Ansys requer geometrias simples e bem discretizadas para realizar as simulações e em alguns casos, ora o LODOS fornecia geometrias complexas ou demasiadamente simples. Visto isso, os autores ressaltaram a necessidade de mais testes para aprimorar os processos. Porter *et al.* (2020) também destacaram a necessidade de melhoria da interoperabilidade do CFD com o BIM e o CAD, no qual o LODOS mostra-se como uma solução promissora. Entretanto, ainda há muito que evoluir nesse contexto, visto que nem o LODOS, nem outros trabalhos similares ainda constituem "soluções mágicas".

Perng *et al.* (2020) realizaram uma discussão de um estudo numérico que visava otimizar um sistema de ventilação e construção de subestação de energia por meio de otimizador multiobjetivo de enxame de partículas (MOPSO). O estudo usou BIM para construir modelos internos e externos do edifício da subestação e, na sequência, verificou o desempenho geral usando o software Ansys para simular a velocidade do ar e a distribuição da temperatura do ar dentro do edifício. A combinação das técnicas mostrou-se muito promissora, contudo, os autores não discutem a interoperabilidade entre o software empregado para a modelagem de informação de construção e o Ansys.

Xu e Li (2020) realizaram, com o auxílio do BIM, uma análise de segurança de escavação de fundação profunda em solos moles saturados. Os pesquisadores apresentaram métodos que combinam a modelagem de informações de construção (BIM), no software Revit, a análise de elementos finitos (FEA), no software Ansys, e o método das diferenças finitas (FDM), no software FLAC3D. Usando a tecnologia BIM, buscou-se estabelecer um modelo de informação 3D e, com base na interface de programação do aplicativo e na linguagem C#, a conversão de dados do BIM-ANSYS-FLAC3D foi realizada. Na sequência, a estrutura e comportamento do solo foi analisada por meio do FLAC3D. Tal metodologia foi validada com base em um caso real e mostrou-se eficiente. Para realizar o fluxo de informações, os modelos foram integrados em uma plataforma de sistema por meio dos padrões IFC. Os autores ressaltaram ainda que a conversão de dados BIM-ANSYS-FLAC3D teve um desempenho satisfatório em termos de qualidade de conversão,

precisão e oportunidade, o que ajuda muito os engenheiros a capturar informações mais precisas durante a geração do modelo REVIT para o modelo FLAC3D.

Cheng *et al.* (2021) realizaram uma análise de sensibilidade de fatores de influência na simulação fluidodinâmica computacional (CFD) do fluxo de ar em ambientes. Especificamente, os pesquisadores investigaram o impacto dos fatores de influência na temperatura e na distribuição da concentração de dióxido de carbono de um modelo CFD validado de um piso de escritório típico usando o Ansys. Os fatores estudados foram o tamanho dos vãos das portas, a radiação solar e o número e orientação dos ocupantes. Assim como Perng *et al.* (2020), os autores valeram-se de um software BIM para modificar os fatores de influência da parametrização e, posteriormente, importar o modelo a ser analisado para o Ansys. Nesse caso, o modelo BIM fornecia a geometria de construção, orientação, localização, informações de materiais e dados meteorológicos de estações meteorológicas próximas para análise solar. Não foram relatados problemas quanto à interoperabilidade.

Chmátal, Pollet e Svand (2016) realizaram a modelagem numérica de um projeto hidráulico coordenado com as etapas de uma construção em BIM, utilizando o software Ansys para analisar os fenômenos hidráulicos. Entretanto, esse artigo é focado inteiramente na simulação numérica, não abordando a relação entre o BIM e o Ansys.

Lee *et al.* (2021) desenvolveram um processo de modelagem fluidodinâmica computacional (CFD) com base em BIM, de forma similar a Porter *et al.* (2020) e Cheng *et al.* (2021). O método de Lee *et al.* (2021) é constituído de cinco etapas: extração de dados BIM, simplificação da geometria, otimização da grade, correspondência de dados de atributos e, finalmente, exportação de uma pasta de caso CFD para OpenFOAM (uma ferramenta de análise CFD de código aberto). Vale ressaltar que a pesquisa foi conduzida empregando arquivos IFC. Tal método foi validado por meio de quatro modelos de ventilação interna. A taxa de erro relativa foi inferior a 5% em todas as condições.

Nos trabalhos correlacionando o BIM e o software Ansys, diversas pesquisas foram identificadas no qual o uso conjunto do BIM com o Ansys apresentou bons resultados. A maioria das pesquisas concentra-se em simulações fluidodinâmicas, tanto para avaliar o comportamento dos fluidos quanto para realizar estudos de conforto ambiental. De imediato, nota-se uma carência de estudos com aplicações em estruturas. Contudo, nos trabalhos analisados, os autores queixam-se de problemas de interoperabilidade em modelos mais complexos, nos quais a principal limitação é a conversão da geometria dos objetos em malhas de elementos finitos.

BIM E ROBOT

Foram identificados seis artigos correlacionando o BIM e o software Robot Structural Analysis – um artigo em 2015, 2017 e 2019 e três em 2020.

Li (2015), afirma que até recentemente as aplicações das tecnologias BIM na China, principalmente em obras de estações de metrô eram restritas à modelagem geométrica e verificação de incompatibilidades, mas há um forte crescimento da implantação destas tecnologias. No artigo, o autor propõe uma metodologia de trabalho para implantação do BIM para análise estrutural através do Robot. Em linhas gerais, foi gerado um modelo geométrico de uma estação no Revit, que por sua vez gerou automaticamente um modelo analítico que foi exportado para o Robot usando as extensões nativas do Revit. Uma vez realizadas as análises estruturais pertinentes, os resultados puderam ser compartilhados novamente com o Revit.

Guan e Hou (2017), estudaram a aplicação da modelagem BIM para uma estação de metrô na China, foi avaliada a conversão do modelo da estação do Revit para um modelo de elementos finitos no Robot, ambos softwares da Autodesk. Foi realizada uma análise não linear considerando a interação solo estrutura, assim como a relação constitutiva não linear dos materiais da estrutura. A validação da metodologia aplicada foi feita através da comparação dos valores das deformações dadas pela análise computacional

com os valores medidos na estrutura. Os autores não relataram dificuldades, particularidades ou ajustes na exportação do modelo do Revit para o Robot.

Khan *et al.* (2019) fizeram um relato sobre a prática de projetos no Paquistão, onde descrevem que os projetos ainda são desenvolvidos em ambiente CAD, geralmente através do AutoCAD, com uma mínima integração entre projetos e projetistas, trazendo dificuldades desde o anteprojeto até a execução. Ao final propuseram uma modelagem de uma estrutura através da modelagem BIM no Revit e posterior exportação do modelo para o Robot, foi feita a validação dos resultados através de uma checagem cruzada usando o Etabs. Os autores também não relataram eventuais dificuldades na interoperabilidade do modelo entre Revit e Robot ou Etabs.

Biancardo *et al.* (2020) apresentaram a modelagem de uma passagem elevada entre o portão de embarque e a pista no aeroporto internacional de Nápoles. O modelo geométrico foi elaborado no Revit, com auxílio de algumas famílias de elementos estruturais e, posteriormente, exportado o modelo analítico para o Robot via extensão nativa. Dentre as vantagens deste tipo de modelagem, os autores destacaram a facilidade de detecção de incompatibilidades, melhor integração entre projetistas e redução significativa de tempo de projeto.

Hamidavi *et al.* (2020), com o intuito de aprimorarem a automação da modelagem da estrutura de edifícios altos, fizeram uma pesquisa online com profissionais da área (arquitetos, engenheiros e gerentes de projeto). O questionário qualitativo buscava identificar nos profissionais, quais os desafios a serem vencidos para a automação do projeto estrutural, ao menos em sua fase inicial. O questionário foi enviado a 354 profissionais, destes, 105 responderam e os principais desafios reportados foram os seguintes: automação do projeto (21%), interoperabilidade entre disciplinas (21%), otimização estrutural (20%), concepção estrutural (18%), detalhamento da estrutura (11%), análise estrutural (7%) e outros (2%). Identificados os principais desafios, os autores propuseram um fluxo de trabalho para automação da análise estrutural baseado em um sistema de pontuação dado a cada um dos aspectos mais relevantes do projeto estrutural. O fluxo começa pela modelagem da arquitetura no Revit, onde dados paramétricos da estrutura são inseridos, e uma rotina do Dynamo baseada nesses critérios gera diferentes modelos estruturais que são então exportados para o Robot para a análise, dimensionamento e detalhamento prévio. Em seguida, usando o esquema de pontuação, a rotina do Dynamo indica qual dos modelos é o mais adequado. A otimização e ajustes finais são, então, feitos manualmente. O principal ganho desse modelo de fluxo de trabalho foi a dispensa da necessidade de se criar vários modelos para avaliação da melhor solução estrutural.

Shoeiab *et al.* (2020), avaliaram a interoperabilidade entre os principais softwares comerciais de análise estrutural dos EUA: SAP2000, Etabs, Robot, Staad Pro e RFEM. Os métodos de troca de informação foram avaliados usando a escala de Likert, e classificados em três graus: completo, parcial e nenhuma. Para que uma transferência seja considerada completa, deve contemplar quatro parâmetros essenciais para a análise estrutural: geometria, carregamento, condições de contorno e propriedades dos materiais. A interoperabilidade é importante tendo em vista que consultores externos podem usar softwares diferentes ou em versões diferentes daquela usada pelo projetista da estrutura, evitando o retrabalho de uma nova modelagem. Os autores desenvolveram uma ferramenta computacional que toma o padrão IFC2x3 referência para gerar um mediador entre os softwares analisados. Foram realizados testes de validação comparando os modelos nativos com os importados. Ainda há necessidade de implementação de algumas funcionalidades, como protensão e cargas dinâmicas.

A maior parte dos trabalhos relacionando BIM e Robot trata da implementação de metodologias de projeto para que haja uma integração entre modelo geométrico e modelo estrutural. Em todos os artigos pesquisados, a metodologia era baseada na modelagem geométrica no Revit e posterior exportação do modelo analítico para o Robot. Para esclarecimento, o chamado modelo analítico da estrutura é um

conjunto de informações básicas para a geração do modelo em elementos finitos, contendo geometria dos elementos estruturais, dados da seção, materiais, vinculações e carregamentos. Esse conjunto, chamado modelo analítico, é exportado para o Robot via extensões nativas e é usado para a geração do modelo estrutural em elementos finitos. Por serem softwares de um mesmo desenvolvedor, não existem grandes dificuldades na interoperabilidade.

BIM E SAP2000

Na revisão sistemática da literatura, quatro artigos foram encontrados relacionando BIM com o software SAP2000. Todos publicados nos últimos 5 anos, sendo o mais antigo em 2016, um em 2017, um em 2019 e, o mais atual, publicado em 2020. Um deles é o de Shoieb *et al.* (2020), discutido na seção 3.3.

Hu *et al.* (2016) mostraram em seu artigo que os diferentes softwares de análise estrutural possuem interoperabilidade inadequada entre si. Para resolver esse problema, os autores propuseram uma nova abordagem, criando e combinando um modelo de informação unificada baseado em IFC com diversos algoritmos para aumentar a interoperabilidade entre modelos arquitetônicos e estruturais em BIM e entre vários modelos BIM de análise estrutural, com uma conversão bidirecional dos arquivos. Para demonstrar a performance de seu modelo unificado, os autores realizaram a conversão de alguns projetos reais comparando a qualidade da conversão dos arquivos, a precisão e a latência da conversão. A conversão bidirecional dos arquivos BIM foi executada em dois estudos de caso, desenvolvidos inicialmente no ETABS (*.e2k) e convertidos para os softwares de análise estrutural ETABS (*.e2k), SAP2000 (*.s2k), ANSYS (*.mac) e MIDAS (*.mgt), com todas as 16 possíveis rotas de conversão devidamente testadas e validadas. Após isso, um grande projeto foi analisado testando a conversão direta do software ETABS para os demais, porém as conversões não foram suportadas e falharam. As principais limitações encontradas no trabalho foram a conversão de objetos complexos em malhas FEM (método dos elementos finitos), além da combinação de diferentes cargas e condições de restrição da estrutura, incluindo os resultados da análise estrutural com deformações e reforços.

Chen *et al.* (2017) comentaram que o BIM não é comumente utilizado para criar modelos de estruturas de madeira históricas, então realizaram um estudo para modelar a Yingxian Wooden Tower, China, e analisar as propriedades mecânicas da torre frente às ações de terremotos e ação do vento. Para a modelagem, foi utilizado o software Revit e foram criados todos os detalhes necessários no software para representar cada elemento característico da edificação. Com a utilização da plataforma .NET e Revit API, o método para a criação do elemento Dougong (elemento estrutural característico da arquitetura tradicional chinesa) por parametrização ajudou os autores a reduzir a dificuldade do trabalho. Já para a análise estrutural da torre, um modelo foi exportado do Revit e foi estabelecido um modelo analítico de elementos finitos, o qual foi importado para o software SAP2000 para ser analisado. Todavia, os autores não fornecem detalhes sobre a interoperabilidade.

Em seu artigo, Tufailkhalil *et al.* (2019) exploraram as capacidades do BIM em um projeto de construção real, para trocar informações entre diferentes softwares e analisar qualquer perda de dados. O objeto de estudo foi o pavilhão do Estádio Qayyum com uma estrutura de 50 anos de idade e localizado em Saddar, Peshawar. O projeto conta com uma nova construção de três andares proposta dentro da estrutura do pavilhão do estádio. As linhas de grade para a estrutura foram feitas usando o AutoCAD 2015, salvas em arquivo "AutoCAD 2004.dxf" e exportadas para o software Tekla Structure, no qual foi modelada toda a antiga e nova estrutura. O arquivo com a estrutura modelada foi, então, exportado em formato .IFC e importado no software SAP2000 para realização da análise estrutural. Após importação do modelo no SAP2000, os autores utilizaram uma análise de lacunas do próprio software para determinar os elementos estruturais que não foram transladados como lajes curvas e juntas de vigas e de pilares. Os autores também comentaram que após a análise realizada no SAP2000, o modelo foi novamente exportado para

o Tekla Structure, no qual foram feitos os detalhamentos de armaduras, com desenhos e quantificação, porém essa parte não é mostrada ao longo do artigo.

O uso de softwares BIM paralelamente com SAP2000 mostrou-se promissor, tendo em vista a existência das aplicações citadas. Quanto às limitações, foram identificados problemas de interoperabilidade em diferentes fases, desde o projeto até a execução e operação. Em especial, assim como relatado entre softwares BIM e o Ansys, há problemas na conversão da geometria em malhas de elementos finitos e também há perda de informações. Em vários casos houve a necessidade de algum software ou algoritmo mediador. Tais fatos ratificam a necessidade de estudos para superar esses desafios de conversão.

LACUNAS DO CONHECIMENTO IDENTIFICADAS

Dentre os trabalhos envolvendo “BIM” e o software “Abaqus”, nenhuma lacuna/dificuldade foi mencionada pelos autores. Entretanto, é importante notar que apenas dois trabalhos foram encontrados e, este fato, por si só, demonstra a carência de estudos correlacionando o uso do BIM com o Abaqus. Sendo assim, são necessários mais estudos para identificar o potencial e as lacunas envolvendo estes softwares.

Por sua vez, entre o BIM e o Ansys, a maioria dos trabalhos aborda simulações fluidodinâmicas computacionais, enquanto um único trabalho estudou aplicações no contexto geotécnico e outro no de engenharia rodoviária. Então, de imediato, percebe-se uma carência de estudos envolvendo BIM e Ansys na análise estrutural. Além disso, diversos autores não relatam problemas de interoperabilidade do BIM com Ansys, enquanto outros afirmaram que o processo fluiu de forma eficiente (vide seção 3.2). Essa divergência se deu por conta da complexidade dos modelos. Certamente há problemas de interoperabilidade em modelos mais complexos. Alguns autores desenvolveram processos adaptar o arquivo BIM para o Ansys, contudo, em alguns casos, o resultado era uma geometria demasiadamente simples e noutras, uma muito complexa, dificultando a simulação.

Entre BIM e o software Robot, são mostrados trabalhos com enfoque no fluxo de trabalho para modelagem da estrutura principalmente de edifícios usando o Revit para a arquitetura ou geometria, os autores não relatam dificuldades ou necessidades de ajustes na interoperabilidade entre o Revit e o Robot, embora não deixem claro, muito provavelmente tal assertividade na interoperabilidade é devida às extensões nativas para a geração do modelo analítico da estrutura para a posterior exportação para o Robot.

Sobre a integração do BIM com o software SAP2000, do mesmo modo, poucos artigos foram encontrados, indicando uma falta de estudos relacionando os dois termos. Todos os artigos encontrados são bem recentes, publicados nos últimos 5 anos, o que indica que essa integração começou a despertar interesses recentemente e que o número de estudos tende a crescer nessa área para avaliar melhor essa associação entre BIM e SAP2000. Alguns autores comentam que a interoperabilidade inadequada entre os softwares ainda persiste em diferentes fases, desde o projeto até a execução e operação, e que estudos são cada vez mais necessários para superar os desafios de conversão de dados entre softwares BIM arquitetônicos e estruturais.

CONCLUSÃO

O presente trabalho desenvolveu uma revisão sistemática da literatura para analisar os trabalhos publicados que mesclam o uso de BIM com os softwares Abaqus, Ansys, Robot e SAP2000, expondo as diferentes aplicações, ferramentas, e dados de input e output, delineando o estado da arte sobre o tema, e contribuindo para o avanço das pesquisas na área. Com base na revisão sistemática de literatura conduzida, percebe-se que os estudos correlacionando BIM com os softwares Abaqus, Ansys, Robot e SAP2000 ainda estão numa fase inicial, havendo muito potencial a ser explorado e lacunas a serem preenchidas.

Nas interações entre os softwares de arquitetura ou geometria e análise estrutural para implantação de uma metodologia BIM, pode-se notar que os softwares Abaqus, SAP2000 e Ansys tem um menor grau

de interação com o software de arquitetura/geometria (em geral Revit), pois as informações transferidas geralmente ficam restritas à geometria e, em alguns casos, há a necessidade de algum software ou algoritmo mediador para tal transferência. Em especial, o Abaqus e o Ansys são softwares muito sensíveis na entrada de dados, visto que pequenas modificações podem acarretar sérios problemas de convergência. Além disso, muitas vezes o software BIM não é capaz e fornecer as propriedades dos materiais com o nível de detalhes requerido para a simulação numérica. Por essas razões, o caminho para alcançar uma interoperabilidade dos softwares Abaqus, Ansys e SAP2000 com o BIM é mais extenso.

Já o Robot, quando associado ao Revit, por se tratar de softwares desenvolvidos pela mesma empresa (Autodesk), apresentam maior interoperabilidade, visto que utilizam extensões nativas para a transferência de informação. Dentre o Robot e o Revit, os autores destacaram a facilidade de detecção de incompatibilidades, melhor integração entre projetistas e redução significativa de tempo de projeto. Embora não haja uma maior atenção dos autores sobre o processo de exportação do modelo analítico, percebe-se a necessidade de ajustes, tanto na fase de geração do modelo analítico no Revit, feito automaticamente de forma interativa com o modelo geométrico, quanto no Robot após a importação.

Nos trabalhos relacionando o BIM com o SAP2000, poucos detalhes sobre a interoperabilidade foram discutidos. Contudo, problemas similares aos já listados foram encontrados. Uma das principais limitações gerais (para todos os softwares) é a conversão de objetos complexos em malhas de elementos finitos. Diversos erros foram relatados na conversão de lajes curvas e juntas de vigas e de pilares, por exemplo.

Vale ressaltar ainda que, em muitos casos, a modelagem direta nos softwares de análise e de simulação costuma apresentar problemas, uma vez que é preciso que diversos atributos sejam coerentemente modelados, tais como: disposição da malha de elementos finitos, vinculações, esforços externos e sua respectiva forma e modo de aplicação; tipo de elemento finito; modelo constitutivo dos materiais; e posicionamento adequado das partes que constituem um modelo, a fim de evitar sobreposições. Caso algum dos atributos citados não seja modelado corretamente, o método de cálculo dos softwares não será capaz de solucionar o problema numérico. Visto isso, pode-se perceber a complexidade existente para a troca de informações entre um software BIM e os softwares de simulação e projeto estrutural. Em muitos casos, o software BIM possui apenas informações relativas à geométrica e mesmo elas podem não ser transferidas adequadamente.

Além disso, na maior parte dos artigos, os resultados das pesquisas focam em mostrar uma ideia geral de como implementar a metodologia e nos benefícios trazidos pela integração, como economia de tempo com automação de processos e maior integração entre projetistas. Vale mencionar ainda a existência de trabalhos cujos autores desenvolveram algoritmos mediadores para uma conversão bidirecional dos arquivos. Porém, mesmo com eles, fazem-se necessários mais testes e aperfeiçoamentos para que uma interoperabilidade ideal seja alcançada nas conversões.

Portanto, uma integração eficiente entre o BIM e os softwares de análise estrutural agregariam qualidade e produtividade para a Indústria AECO. A revisão sistemática de literatura, conduzida nesse trabalho, mostrou diversas lacunas e limitações, mas também apontou muitas vantagens. Além disso, o presente trabalho apenas analisou estudos de casos existentes na literatura. Para uma análise detalhada do uso integrado de BIM com os softwares estudados, faz-se importante realizar estudos de caso com foco na interoperabilidade.

De modo geral e conforme já exposto, a revisão sistemática de literatura conduzida mostrou que a pesquisa do uso integrado de BIM com softwares de simulação numérica e projeto estrutural estão numa fase incipiente e que há muitas lacunas a serem identificadas/preenchidas. É possível notar um crescimento no número de pesquisas em tal área, indicando que, apesar do caminho ser longo, ele está sendo percorrido – e esse é o primeiro passo para se alcançar uma integração eficiente.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

ARIA, M.; CUCCURULLO, C. bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. **Journal of Informetrics**, [s. l.], v. 11, n. 4, p. 959–975, 2017. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS ESCRITÓRIOS DE ARQUITETURA - AsBEA. **Guia AsBEA - Boas Práticas em BIM**. Fascículo 1. 2013. 20p. São Paulo.

BIANCARDO, S. A.; VISCIONE, N.; ORETO, C.; VEROPALUMBO, R.; ABBONDATI, F. BIM Approach for Modeling Airports Terminal Expansion. **Infrastructures**, [s. l.], v. 5, n. 5, p. 41, 2020. Available at: <https://doi.org/10.3390/infrastructures5050041>.

CHEN, Q.; YONGQI, W.; LI, M. Research on the modeling of Yingxian wooden tower based on revit and revit API. **Journal of Xian University of Architecture and Technology**, [s. l.], v. 49, n. 3, p. 369–374, 2017. Available at: <https://doi.org/10.15986/j.1006-7930.2017.03.009>.

CHENG, J. C.; KWOK, H. H.; LI, A. T.; TONG, J. C.; LAU, A. K. Sensitivity analysis of influence factors on multi-zone indoor airflow CFD simulation. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 761, p. 143298, 2021. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143298>.

CHMÁTAL, P.; POLLERT, J.; ŠVANDA, O. Numerical model application in rowing simulator design. Stavební obzor - **Civil Engineering Journal**, [s. l.], v. 25, n. 1, 2016. Available at: <https://doi.org/10.14311/CEJ.2016.01.0005>.

GUAN, C.; HOU, J. BIM nonlinear finite element analysis of subway station structure BIM. **Journal of Wuhan University of Technology**, [s. l.], 2017. Available at: <https://doi.org/10.3963/j.issn.1671-4431.2017.11.010>.

EASTMAN, C. M.; JEONG, Y. S.; SACKS, R.; KANER, I. Exchange Model and Exchange Object Concepts for Implementation of National BIM Standards. **Journal of Computing in Civil Engineering**, [s. l.], v. 24, n. 1, p. 25–34, 2010. Available at: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3801\(2010\)24:1\(25\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3801(2010)24:1(25)).

SACKS, ; EASTMAN, C.; TEICHOLZ, P.; LEE, G. **Manual de BIM: um guia de modelagem da informação da construção para arquitetos, engenheiros, gerentes, construtores e incorporadores**. Bookman Editora, 2014.

HAMIDAVI, T.; ABRISHAMI, S.; PONTEROSSO, P.; BEGG, D.; NANOS, N. OSD: A framework for the early stage parametric optimisation of the structural design in BIM-based platform. **Construction Innovation**, [s. l.], v. 20, n. 2, p. 149–169, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1108/CI-11-2019-0126>.

HAO, F.; ZHANG, Y. Stability analysis of cross-section of doublerow large-diameter pipeline based on

bim technology. **Academic Journal of Manufacturing Engineering**, [s. l.], v. 18, n. 2, p. 196–202, 2020.

HU, Z. Z.; ZHANG, X. Y.; WANG, H. W.; KASSEM, M. Improving interoperability between architectural and structural design models: An industry foundation classes-based approach with web-based tools. **Automation in Construction**, [s. l.], v. 66, p. 29–42, 2016. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.02.001>.

KHAN, M. assessment of structural design capability of building information modeling (BIM) tools in building industry of pakistan. **Journal of Mechanics of Continua and Mathematical Sciences**, [s. l.], v. 14, n. 2, 2019. Available at: <https://doi.org/10.26782/jmcms.2019.04.00030>.

LEE, M.; PARK, G.; JANG, H.; KIM, C. Development of Building CFD Model Design Process Based on BIM. **Applied Sciences**, [s. l.], v. 11, n. 3, p. 1252, 2021. Available at: <https://doi.org/10.3390/app11031252>.

LI, K. The application study of BIM technology in the structure design of subway station. **Journal of Railway Engineering Society**, [s. l.], 2015.

PERNG, J. W.; KUO, Y. C.; CHANG, Y. T.; CHANG, H. H.. Power Substation Construction and Ventilation System Co-Designed Using Particle Swarm Optimization. **Energies**, [s. l.], v. 13, n. 9, p. 2314, 2020. Available at: <https://doi.org/10.3390/en13092314>.

PORTER, S.; TAN, T.; WANG, X.; PAREEK; V. LODOS - Going from BIM to CFD via CAD and model abstraction. **Automation in Construction**, [s. l.], v. 94, p. 85–92, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.06.001>.

SHOIEB, K.; SERROR, M. H.; MARZOUK, M. Web-Based Tool for Interoperability among Structural Analysis Applications. **Journal of Construction Engineering and Management**, [s. l.], v. 146, n. 6, p. 04020058, 2020. Available at: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001840](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001840).

TANG, F., MA, T.; GUAN, Y.; ZHANG, Z. Parametric modeling and structure verification of asphalt pavement based on BIM-ABAQUS. **Automation in Construction**, [s. l.], v. 111, p. 103066, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.103066>.

TUFAILKHALIL, MUHAMMAD; HAFEEZ, JOHAR. Exploring the capabilities of building information modelling for a real-life structure. **Journal of Mechanics of Continua and Mathematical Sciences**, [s. l.], v. 14, n. 2, 2019. Available at: <https://doi.org/10.26782/jmcms.2019.04.00013>.

VENUGOPAL, M.; EASTMAN, C. M.; SACKS, R.; TEIZER, J. Semantics of model views for information exchanges using the industry foundation class schema. **Advanced Engineering Informatics**, [s. l.], v. 26, n. 2, p. 411–428, 2012. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2012.01.005>.

XU, H.; LI, S. Safety Analysis of Deep Foundation Excavation in Water-Rich Soft Soils Based on BIM. **Mathematical Problems in Engineering**, [s. l.], v. 2020, p. 1–19, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1155/2020/4923984>