

Utilização de Inteligência Artificial para Análise e Dimensionamento de Estruturas em Concreto Armado: uma prospecção tecnológica

Use of Artificial Intelligence for Analysis and Dimensioning of Structures in Armed Concrete: a technological prospection

Marcos Gottschalg Discher¹

Givanildo de Jesus Santos¹

Eduardo Oliveira Teles¹

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, Salvador, BA, Brasil

Resumo

A Inteligência Artificial (IA) é uma tecnologia que faz uso de máquinas que aprendem com a experiência e possuem a capacidade de executar tarefas complexas como o dimensionamento de estruturas de concreto armado. O aumento na complexibilidade das estruturas utilizadas nas construções traz a necessidade de desenvolvimento e de implantação de novas tecnologias na construção civil. Assim, o objetivo deste trabalho é realizar uma prospecção científica e tecnológica sobre a utilização de IA na análise e no dimensionamento de estruturas em concreto armado. Este trabalho apresenta uma abordagem quali-quantitativa, de natureza exploratória, por meio de pesquisas científicas nas bases da Capes e Web of Science, e patentárias nas bases do INPI e do Orbit. Apesar de o uso de TICs na construção civil ser tímido, a prospecção apontou um crescimento relevante da utilização da IA na construção civil no mundo, no entanto, no Brasil, a utilização dessa tecnologia ainda é muito incipiente.

Palavras-chave: Inteligência Artificial. Engenharia Estrutural. Concreto Armado.

Abstract

Artificial Intelligence (AI) is a technology that makes use of machines that learn from experience and have the ability to perform complex tasks such as the design of reinforced concrete structures. The increase in the complexity of structures used in constructions brings the need for the development and implementation of new technologies in civil construction. Thus, the objective of this work was to carry out a scientific and technological prospection on the use of AI in the analysis and design of reinforced concrete structures. This work presents a qualitative-quantitative approach, of an exploratory nature, through scientific research in the bases of Capes and Web of Science, and patents in the bases of INPI and Orbit. Although the use of ICTs in civil construction is timid, the prospection pointed to a relevant growth in the use of AI in civil construction in the world, however, in Brazil the use of technology is still very incipient.

Keywords: Artificial Intelligence. Structural Engineering. Reinforced Concrete.

Área Tecnológica: Propriedade Intelectual. Inteligência Artificial. Engenharia Civil-Estruturas.



1 Introdução

Segundo Freitas (2019), o concreto armado foi o sistema construtivo mais utilizado no século XX. Ele é responsável pela parte estrutural das construções e é composto basicamente de dois elementos: o concreto, que trabalha essencialmente a compressão, e o aço, incumbido de resistir aos esforços de tração.

Apesar da larga utilização do concreto armado e de a indústria da construção ser uma das mais antigas, ainda existe uma grande defasagem tecnológica em relação a outros setores, assim como uma lenta utilização de novas tecnologias (BALAGUER; ABDERRAHIM, 2007). Porém, a Engenharia Civil, mais especificamente a análise e o dimensionamento de estruturas em concreto armado, está repleta de problemas que desafiam os especialistas, e não são encontradas soluções utilizando as técnicas de computação tradicional. Em meio a isso, surge a Inteligência Artificial (IA), tendo como alvos esses problemas, chegando ao nível mais alto da capacidade humana (SALEHI; BURGUEÑO, 2018).

De acordo com Santos *et al.* (2020), a Inteligência Artificial (IA) é uma ferramenta poderosa que pode ser usada para resolver problemas em diversas áreas. A IA é uma área do conhecimento ligada à linguagem, à inteligência, ao raciocínio lógico e à aprendizagem para resolução de problemas, de acordo com Kaufman (2019). Também engloba diversas áreas do conhecimento, como a Computação, a Matemática, a Neurociência, a Linguística, a Filosofia, a Cibernética, entre outras. Segundo Salehi e Burgueño (2018), a IA é um método computacional que tem a capacidade de simular a cognição e a inteligência humana por meio da manipulação de símbolos e de bases de conhecimentos para resolver problemas convencionais. A IA possibilita o desenvolvimento de *softwares* e de máquinas com inteligência semelhante à humana por meio do uso de algoritmos, podendo ser aplicada na resolução de problemas complexos, como os que são encontrados na construção civil, mas que não podem ser resolvidos usando técnicas computacionais tradicionais.

Na Engenharia Civil, a IA pode ser utilizada como recurso tecnológico com o objetivo de otimizar a gestão de recursos, dar apoio ao processo de tomada de decisões, tornando-o mais rápido e eficiente, diminuir as taxas de erros, otimizar processos repetitivos, podendo se estender para segurança do trabalho e desenvolvimento sustentável (TEXEIRA; TEXEIRA; ROCHA, 2020). Além disso, o uso de tecnologia como a IA pode ajudar a resolver problemas complexos como os que são encontrados na análise e no dimensionamento de estruturas em concreto armado.

De acordo com Salehi e Burgueño (2018), o uso da IA pode resultar em economia significativa de tempo e de custo e, ainda, aumentar a eficiência computacional em tarefas ligadas à análise e ao dimensionamento de estrutura. No entanto, existem algumas barreiras com relação ao uso da Tecnologia da Informação e Comunicação (TIC) dentro da construção, por exemplo, a dificuldade de os profissionais da construção civil usarem ferramentas computacionais, segurança dos dados, e a desconfiança com relação ao uso da IA para trabalhar com dimensionamento de estrutura, tendo em vista que uma falha no processo pode colocar em risco a vida de muitas pessoas.

O campo da IA tem recebido maior atenção do setor da engenharia estrutural em especial em situações em que a formulação teórica tradicional não foi deduzida. Assim, são utilizadas formulações empíricas, oriundas de resultados experimentais, que apresentam pequenas falhas

e limitações, cujos modelos de IA se tornam uma alternativa ao capturar relações complexas, difíceis de serem percebidas utilizando métodos tradicionais (ZHANG *et al.*, 2020).

Nos dias atuais, a Análise Estrutural pode ser vista como uma simulação computacional do comportamento das estruturas. A inclusão de novas tecnologias é inevitável, já que mesmo para estruturas mais simples, é impensável executar tarefas de Análise Estrutural sem a utilização de soluções computacionais (MARTHA, 2017).

Com o desenvolvimento da tecnologia e o aumento da complexibilidade das estruturas utilizadas nas construções, seja por motivos estéticos ou de dimensões (como a altura dos edifícios e os vãos das pontes), a utilização de *softwares* para a análise e o dimensionamento das estruturas já é uma realidade nos escritórios de projetos. Segundo Kimura (2018), atualmente todas as etapas de um projeto estrutural, desde o levantamento dos dados até a impressão dos desenhos, são influenciadas pela rapidez e precisão da informática. Um edifício é dimensionado e todos seus dados são guardados em uma mídia digital. “Hoje em dia, fica muito difícil imaginar o cálculo de uma grande estrutura de uma forma 100% manual!” (KIMURA, 2018, p. 18).

Porém, esse ainda é um trabalho que demanda muito esforço e horas trabalhadas do engenheiro projetista, que é a mão de obra mais especializada e custosa da empresa, além de ser suscetível a erros, fato inerente ao ser humano. Em face disso, surge a possibilidade da utilização da IA, tanto na análise e no dimensionamento da estrutura quanto na verificação e no alerta a possíveis erros existentes. Lembrando sempre o que disse Alio Ernesto Kimura, sócio diretor da TQS – informática, desenvolvedora de um dos principais *softwares* de análise e dimensionamento estrutural do país: “O *software* não substitui e jamais substituirá o papel do engenheiro” (KIMURA, 2018, p. 36).

Um estudo realizado pela Confederação Nacional da Indústria (CNI, 2018) sobre investimentos em Indústria 4.0 mostrou que quase metade (48%) das grandes empresas industriais pretende investir em tecnologias digitais. Contudo, o percentual cai para 17% quando se filtra o resultado para empresas que pretendem investir em tecnologias que envolvam sistemas inteligentes de gestão, comunicação M2M (máquina-máquina), gêmeo digital (*Digital Twin*) e IA.

Tendo em vista a necessidade de usar soluções inteligentes em diversas áreas do conhecimento, este trabalho se justifica devido ao contínuo debate sobre o uso da Inteligência Artificial. Desse modo, o objetivo principal deste trabalho é realizar uma prospecção científica e tecnológica sobre a utilização da IA na análise e no dimensionamento de estruturas em concreto armado no Brasil. Ressaltando que o tema é relativamente recente, as informações encontram-se dispersas e com pouquíssimos resultados na língua portuguesa, dificultando, assim, a busca e a análise dos resultados recuperados.

O artigo está estruturado em cinco partes. Inicia-se pela Introdução, que contextualiza o que é IA e sua importância para a análise e o dimensionamento de estruturas em concreto armado, além de definir o objetivo e o problema. Em seguida, a Metodologia que trata das etapas da pesquisa. Posteriormente, os Resultados e Discussão são apresentados com todas as informações

encontradas, bem como o tratamento realizado com os dados. Posteriormente, a Conclusão na qual são feitos apontamentos sobre a IA e o dimensionamento de estruturas em concreto armado. Por fim, as Perspectivas Futuras as quais apresentam possibilidades de estudos futuros e seus potenciais de desenvolvimento.

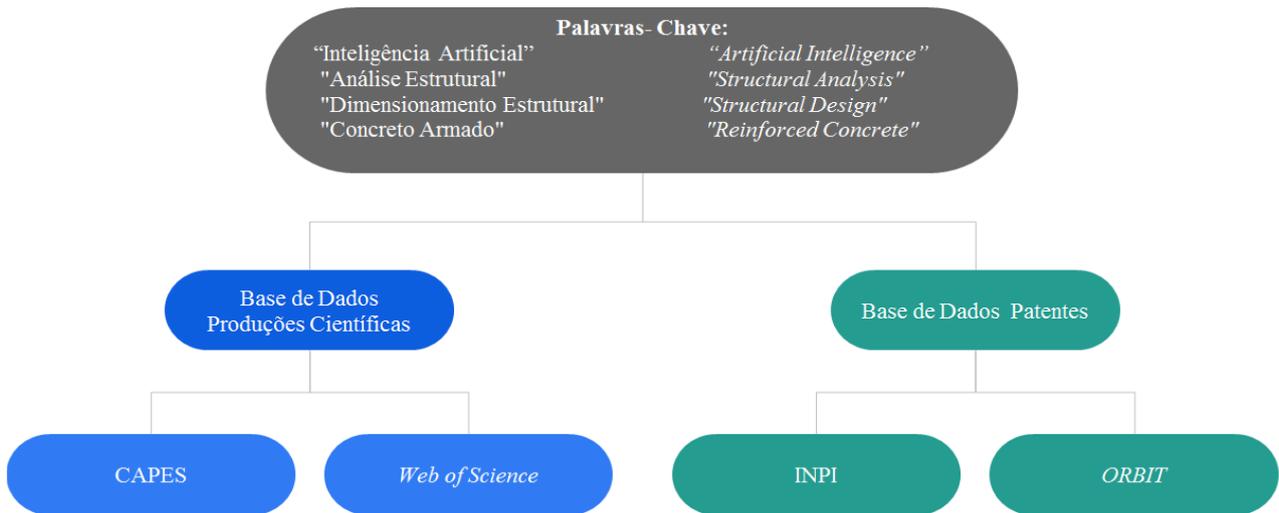
2 Metodologia

Esta prospecção tecnológica foi realizada por meio de buscas em base de patentes e em bases científicas, em nível nacional e internacional, para realizar um levantamento sobre o uso da IA na construção civil, em especial, na área de análise e dimensionamento de estruturas. Nas bases de patentes, a pesquisa procurou identificar todos os pedidos de patentes realizados no intervalo de tempo entre os anos 2000 a 2020. Em nível nacional, as buscas de pedidos de patentes foram realizadas na base do Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI), e as buscas internacionais foram feitas no sistema Questel Orbit, uma ferramenta de busca e de análise de patentes que abrange mais de 96 países.

As buscas por produções científicas sobre a temática foram realizadas no portal de periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e na Web of Science. Durante as buscas nas duas bases, foi adicionado um filtro temporal para limitar os resultados dentro do intervalo de tempo de 20 anos. O objetivo da limitação temporal é identificar de forma potencializada o Estado da Arte nesse período, buscando todas as publicações contidas nas bases científicas supracitadas. Com essa delimitação temporal, foi possível verificar o desenvolvimento e o uso da TIC, em especial da IA, na construção civil com enfoque em verificar o uso desta na análise e no dimensionamento de estruturas de concreto armado.

Nos processos de buscas, foram utilizados termos (palavras-chave) nas línguas portuguesa e inglesa relacionados à IA e à análise e ao dimensionamento de estruturas e de concreto armado. Os termos foram pesquisados nas línguas citadas nas bases de patentes e científicas de forma isolada ou combinada por meio do uso de operadores booleanos AND ou OR, ou dos dois juntos. A Figura 1 representa a metodologia de busca utilizada pelos pesquisadores. Foram usadas todas as oito palavras-chave presentes na Figura 1 em duas bases de dados de Patentes (INPI e Orbit) e em duas bases de dados de produções científicas (CAPES e Web of Science). Para as buscas na base de patentes, o levantamento foi realizado considerando os pedidos de patentes no intervalo de 20 anos, pesquisando os termos no título, na descrição e no resumo do pedido. Já as buscas nas bases científicas foram realizadas com enfoque em identificar os termos no título e no resumo das publicações. Ao realizar as buscas sobre IA no INPI, os resultados poderiam estar registrados em duas bases de dados diferentes: programa de computador e patentes, por esse motivo, optou-se por não se fazer a busca utilizando códigos de classificação patentária, uma vez que só é permitida a busca por palavra-chave na base de programa de computador do INPI.

Figura 1 – Metodologia para busca das oito palavras-chave



Fonte: Elaborada pelos autores deste artigo (2020)

Esta prospecção adotou uma metodologia qualitativa e quantitativa com caráter exploratório. Foi realizada uma análise bibliométrica e patentária para avaliar os artigos científicos revisados por pares e os pedidos de patentes publicados nas bases científicas da CAPES e Web Science, e de patentes no INPI e Orbit, respectivamente, com o objetivo de verificar o desenvolvimento e o uso da IA no projeto estrutural, com foco em sua aplicação na análise e no dimensionamento de estruturas de concreto armado. Por fim, após a coleta de dados, foi realizado um estudo comparativo entre os resultados das publicações científicas e as patentes relacionadas às tecnologias que implementam a IA aplicáveis à análise e ao dimensionamento de estruturas em concreto armado. Os dados resultantes do processo de busca foram processados e representados em forma de tabelas e gráficos que constam na próxima seção.

3 Resultados e Discussão

Realizada a pesquisa, foi possível montar a Tabela 1 na qual se observam os resultados encontrados nas bases de buscas de artigos científicos da CAPES e Web of Science e de patentes do INPI e do Orbit apresentados, separados por palavras-chave pesquisadas.

Tabela 1 – Quantidade de palavras-chave encontradas nas buscas de patentes e artigos científicos com os respectivos resultados – 2020

PALAVRAS-CHAVE	ARTIGOS CIENTÍFICOS		PATENTES	
	CAPES	WEB OF SCIENCE	INPI	ORBIT
"Inteligência Artificial"	569	2	453	768
" <i>Artificial intelligence</i> "	33 162	25 455	7	181 217
"Análise Estrutural"	144	1	4	422
" <i>Structural Analysis</i> "	29 121	39 278	2	42 758
"Dimensionamento Estrutural"	6	0	2	22
" <i>Structural Design</i> "	12 086	8 724	0	667 435
"Concreto Armado"	91	0	9	827
" <i>Reinforced Concrete</i> "	16 143	30 553	0	190 206
"Inteligência Artificial" AND ("Análise Estrutural" OR "Dimensionamento Estrutural") AND "Concreto Armado"	0	0	0	1
" <i>Artificial Intelligence</i> " AND " <i>Structural Analysis</i> "	26	16	0	584
" <i>Artificial Intelligence</i> " AND " <i>Structural Design</i> "	13	18	0	2 550
" <i>Artificial Intelligence</i> " AND " <i>Reinforced Concrete</i> "	9	39	0	173

Fonte: Elaborada pelos autores deste artigo a partir dos dados das bases: CAPES, Web of Science, INPI, e Orbit (2020)

Pode-se observar um equilíbrio entre os resultados encontrados nas bases de artigos científicos, pois ora a CAPES, ora a Web of Science apresentavam mais resultados. O maior resultado encontrado para as buscas, dentro da área da engenharia com a temática “Verificação e Dimensionamento de Estruturas em Concreto Armado”, foi de 39. 278 para a palavra-chave “*Structural Analysis*” na base da Web of Science (Tabela 1). Já dentro da área da informática “Inteligência Artificial”, o maior resultado foi de 33.162 para a palavra-chave “*Artificial intelligence*” na base da CAPES (Tabela 1). A CAPES apresentou mais resultados para os termos em português que a Web Of Science. Porém, para ambas, os resultados são muito menores que os apresentados para os mesmos termos em inglês. Ao se utilizar os operadores booleanos para junção das palavras-chave, o resultado foi ‘zero’ para os termos em português em ambas as bases, e para os termos em inglês: “*Artificial Intelligence*” AND “*Structural Analysis*”, “*Artificial Intelligence*” AND “*Structural Design*”, “*Artificial Intelligence*” AND “*Reinforced Concrete*”, obteve-se 48 artigos para a CAPES e 75 para a Web of Science (Tabela 1).

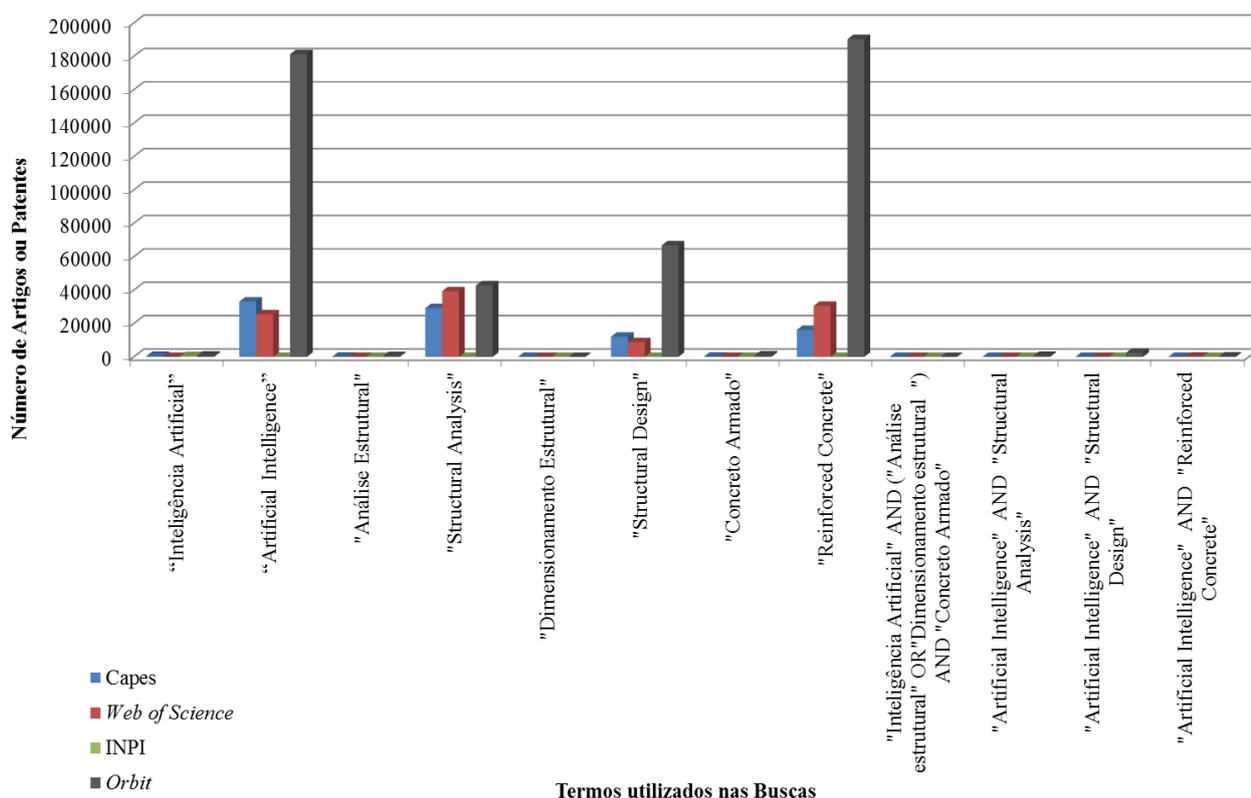
Com relação às bases de patentes INPI e Orbit, não houve o mesmo equilíbrio nos resultados como aconteceu nas buscas realizadas nas bases de artigos científicos. Analisando os resultados obtidos e expostos na Tabela 1, verifica-se que a quantidade de resultados do Orbit foi bem maior, principalmente quando utilizados os termos de busca sem o uso de operadores booleanos AND ou OR. Quanto à busca pelo termo ‘Inteligência Artificial’, observa-se que, na base do INPI, houve um retorno de 453 resultados, enquanto no Orbit foram retornados 768 (Tabela 1), sendo esse o termo de busca em que os resultados, entre as duas bases, foram mais próximos. Vale destacar que, nas pesquisas no INPI, os termos foram buscados nas bases de patentes e *software*, tendo em vista que não é possível procurar em uma base que concentre patentes e registros de programas de computador. Na base de programas de computador do INPI, a busca foi realizada utilizando o seletor que continha a opção de busca “qualquer uma das palavras”, no campo título do programa de computador, para obter um número maior de resultados, que após a busca foram analisados e separados apenas aqueles que estivessem ligados ao uso da IA na análise e no dimensionamento de estruturas em concreto armado.

Durante as buscas, foi possível observar que, para alguns termos, o resultado na base do INPI foi zero. Já no Orbit foi retornada uma quantidade expressiva de resultados, por exemplo, a busca pelo termo: “*Structural Design*”. Esse fato se repetiu para outros termos usados na busca, conforme as informações da Tabela 1. Ademais, analisando os resultados descritos na tabela acima, é possível verificar que as buscas realizadas com o uso de operadores booleanos AND ou OR não retornaram nenhum resultado na base do INPI. No entanto, no Orbit todos os termos buscados usando booleanos retornaram uma quantidade significativa de resultados, com exceção da busca utilizando a combinação “Inteligência Artificial” AND (“Análise Estrutural” OR “Dimensionamento Estrutural”) AND “Concreto Armado”, que retornou apenas um resultado.

Analisando os dados coletados durante o processo de busca nas bases de patentes, percebe-se que, quando foram utilizados termos na língua inglesa, a quantidade de resultados retornados pelo INPI foi bem pequena se comparado com os resultados obtidos no Orbit.

O Gráfico 1 apresenta a segmentação de artigos e de patentes encontrados por cada termo buscado. A barra **azul** indica os resultados na base da CAPES; a **vermelha** os resultados na Web of Science; a **verde** do INPI; e a **cinza** os resultados do Orbit, facilitando a visualização da diferença entre os resultados encontrados.

Gráfico 1 – Número de artigos e de patentes encontrados nas bases de dados – 2020



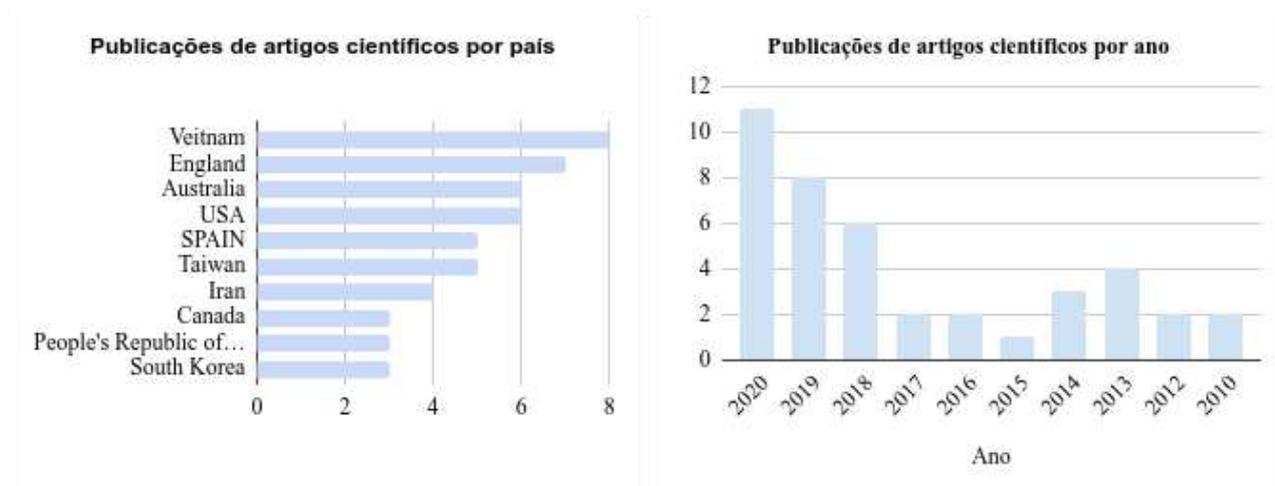
Fonte: Elaborado pelos autores deste artigo a partir dos dados das bases: CAPES, Web of Science, INPI, e Orbit (2020)

Analisando o Gráfico 1, observa-se que os temas separados: “Inteligência Artificial”, “Análise Estrutural”, “Dimensionamento Estrutural” ou “Concreto Armado” obtiveram um grande resultado nas buscas, principalmente considerando os resultados dos termos em inglês. Porém, quando se mesclam dois ou mais termos utilizando os operadores booleanos, com o intuito de verificar a utilização da IA ao projetar estruturas, foram encontrados os resultados mais relevantes e em quantidades bem menos expressivas. Observa-se também que, diferente do equilíbrio de resultados encontrados nas bases bibliométricas, o menor resultado encontrado foi na base do INPI. Isso não ocorre devido ao fato de o INPI ser uma base de patentes, visto que o maior número de resultados foi encontrado na base patentária do Orbit, indicando, assim, um grande déficit de pesquisas relacionadas com o desenvolvimento da tecnologia no Brasil. O cenário chega a ser desanimador, visto que o resultado das buscas com os termos mesclados foi nulo.

Os principais resultados encontrados na base bibliométrica da Web of Science foram obtidos utilizando os termos em inglês “*Artificial Intelligence AND Structural Analysis*”, “*Artificial Intelligence AND Structural Design*” e “*Artificial Intelligence AND Reinforced Concrete*”, conforme mostra a Tabela 1, totalizando 73 artigos. Por meio da leitura do Título e Resumo desses artigos, foram selecionados 45 artigos considerados de maior relevância com o tema e montados o Gráfico 2 (por países e anos) e o Gráfico 3 (por revistas).

A quantidade de publicações de artigos científicos separados por países é apresentada no Gráfico 2. O gráfico possibilita uma análise regional das publicações, permitindo comparar o desenvolvimento e o uso da IA na construção civil em vários países do mundo.

Gráfico 2 – Publicações de artigos científicos, por países, na base Web of Science utilizando as palavras-chaves “Artificial Intelligence AND Structural Analysis”, “Artificial Intelligence AND Structural Design” e “Artificial Intelligence AND Reinforced Concrete”



Fonte: Web of Science (2020)

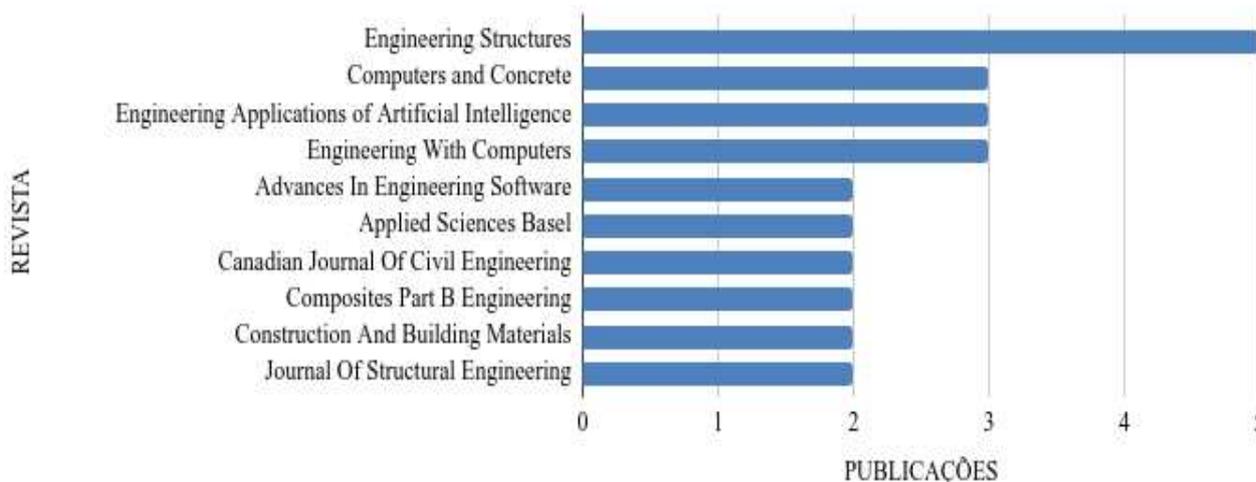
A partir dos dados do Gráfico 2, pode-se observar que não existe uma supremacia regional nas publicações, pois percebe-se que existem artigos científicos de países da Ásia, Europa, Oceania e América do Norte. Analisando os dados regionais, também foi possível observar um resultado preocupante para a prospecção dessa tecnologia no Brasil e em outros países da América do Sul, uma vez que a pesquisa não retornou nenhum resultado destes. Os países que mais publicaram foram: Vietnã com oito; seguido da Inglaterra com sete; Austrália e Estados Unidos da América cada um com seis.

O destaque dessa lista está no aparecimento do Vietnã liderando o número de publicações. No entanto, esse resultado vai de encontro ao apresentado no Índice Global de Inovação 2018 (WIPO, 2018), em que o Vietnã é apontado como segundo colocado, em uma lista de 20 países, cujo desempenho na área da inovação supera seu nível de desenvolvimento. Os resultados dos estudos de Kwon, Li e Sohn (2019), que analisaram a inovação em países socialistas como Cuba e Vietnã, indicam que, diferente de Cuba, onde a inovação depende de empresas estatais, no Vietnã, há maior participação do setor privado, principalmente com empresas do Japão, França e Estados Unidos. Isso, devido às políticas governamentais de apoio às empresas estrangeiras (KWON; LI; SOHN, 2019).

O Gráfico 2 também apresenta o número de publicações realizadas nos últimos dez anos, possibilitando avaliar a evolução das publicações científicas nesse período. Em análise dos resultados contidos no Gráfico 2, observa-se o volume de publicações relevantes ao decorrer dos anos. De posse dessas informações, pode-se notar que houve um pequeno crescimento no ano de 2013 com quatro, havendo uma diminuição entre os de 2014 e 2015, com, respectivamente, três e um. Nos anos de 2016 e 2017, há uma estabilidade, pois cada ano teve duas publicações; nos anos de 2018, 2019 e 2020, o número de publicações foi crescendo, respectivamente, para seis, oito e 11, alcançando o maior valor em 2020, indicando, assim, uma possível tendência de crescimento para os próximos anos.

A seguir, no Gráfico 3, verificam-se as revistas que mais publicam artigos relacionados à utilização de IA no dimensionamento de estruturas em concreto armado.

Gráfico 3 – Publicações de artigos científicos, por revista, na base Web of Science utilizando as palavras-chaves “Artificial Intelligence AND Structural Analysis”, “Artificial Intelligence AND Structural Design” e “Artificial Intelligence AND Reinforced Concrete”



Fonte: Web of Science (2020)

Ao se refinar a busca com o intuito de verificar quais revistas mais publicam artigos relacionados com a temática, pode-se verificar (Gráfico 3) que o periódico com o maior número de resultados, cinco no total, foi a *Engineering Structures*, seguida de perto por outras três revistas: a *Computers and Concrete*, a *Engineering Applications of Artificial Intelligence* e a *Engineering With Computers*, com três resultados cada uma. Como esperado, todas são da área da Engenharia e/ou Informática. Segundo dados encontrados na própria revista *Engineering Structures*, o artigo de Salehi e Burgueño (2018) “*Emerging artificial intelligence methods in structural engineering*”¹ é o artigo de revista com maior número de *downloads*.

Após a leitura mais minuciosa dos títulos e resumos dos artigos científicos encontrados, observou-se a subdivisão dos três métodos emergentes de IA dentro da engenharia estrutural, apontada por Salehi e Burgueño (2018). O primeiro é o *Pattern Recognition* (Reconhecimento de Padrões), aplicado para fins como monitoramento e detecção de danos na integridade estrutural, engenharia sísmica (terremoto), confiabilidade e desempenho estrutural. O segundo método encontrado foi o *Machine Learning* (Aprendizado de Máquina) utilizado para otimização e avaliação de desempenho estrutural, além da identificação de parâmetros estruturais, por exemplo, propriedades físicas e mecânicas do concreto. O terceiro método intitulado de *Deep Learning* (Aprendizado Profundo) é utilizado principalmente em modelos de monitoramento da saúde estrutural, fazendo uso de técnicas de processamento de imagens e vídeos para detecção de danos.

Aprofundando-se na pesquisa, de fato foram encontradas publicações relacionadas com os três métodos citados. No tocante ao Reconhecimento de Padrões, encontram-se pesquisas para avaliar a capacidade estrutural de edifícios de concreto armado em eventos sísmicos, como no estudo de Luo e Paal (2019) denominado “*A locally weighted machine learning model for generalized prediction of drift capacity in seismic vulnerability assessments*”². Nele, os autores relatam que os modelos existentes são empíricos, não se aplicam a todos os tipos de pilares, e apresentam uma relação linear entre as variáveis, o que é um erro segundo os autores, já que a

² Um modelo de aprendizado de máquina ponderado localmente para previsão generalizada de capacidade de deriva em avaliações de vulnerabilidade sísmica (traduzido pelos autores).

relação entre os materiais (concreto e aço) e os carregamentos sísmicos é altamente não linear. Então, é proposto um novo modelo utilizando técnicas de IA que englobam todos os tipos de pilares, além de analisar a não linearidade altamente complexa.

Já referente ao método Aprendizado de Máquina, foi possível observar resultados relacionados ao dimensionamento de vigas de concreto armado ao cisalhamento nos estudos de Zhang *et al.* (2020) chamado “Reinforced concrete deep beam shear strength capacity modelling using an integrative bio-inspired algorithm with an artificial intelligence model”³, e de Pérez *et al.* (2012) intitulado “Optimization of existing equations using a new Genetic Programming algorithm: Application to the shear strength of reinforced concrete beams”⁴. Como não existe uma formulação tradicional teórica e comprovada, são utilizadas formulações empíricas oriundas de resultados experimentais, em que são necessárias a determinação e aferição dos parâmetros das formulações. Assim, o modelo de IA permite a inclusão de novas variáveis na expressão resultando em melhoria acentuada ao utilizar essa metodologia (PÉREZ *et al.*, 2012)

Relacionado com o terceiro e último método, chamado de Aprendizado Profundo, Cha Choi e Büyüköztürk (2017) apresentaram um estudo para detectar rachaduras no concreto de túneis. A utilização de técnicas de processamento de imagem encontra situações no mundo real, por exemplo, mudanças de iluminação e sombras, que geram verdadeiros desafios para adoção do método (CHA; CHOI; BÜYÜKÖZTÜRK, 2017). Então, a pesquisa propõe um modelo baseado no processamento de imagens utilizando uma arquitetura profunda de redes neurais convolucionais para detectar fissuras no concreto. Os resultados mostraram que o modelo proposto apresentou desempenho melhor que os utilizados anteriormente e de fato pode encontrar fissuras em situações realistas.

Com o intuito de investigar o desenvolvimento de tecnologias relacionadas à IA que são aplicadas à construção civil, especialmente na área da análise estrutural, foi desenvolvido o Gráfico 4, no qual se apresenta a evolução dos pedidos de patentes nos últimos 20 anos.

Gráfico 4 – Pedidos de patentes, por ano, na base do Orbit utilizando o termo “Artificial Intelligence AND Structural Analysis”



Fonte: Adaptado pelos autores a partir de Orbit (2020)

Analisando o Gráfico 4, percebe-se que durante os últimos 20 anos, os pedidos de patentes relacionados ao termo “Artificial Intelligence AND Structural Analysis” se tornaram frequentes, em uma média de 18 pedidos por ano. Com base nos dados do Gráfico 4, verifica-se que, a partir de 2015, houve um crescimento considerável no número de pedidos de patentes, prin-

principalmente nos anos de 2017 e 2018, indicando um grande potencial de crescimento para os próximos anos. Os dados apresentados neste trabalho também são corroborados pelo estudo de Teixeira, Teixeira e Rocha (2020), no qual os autores observaram um declínio nos anos de 2009 a 2011, e uma pequena alta até o ano de 2014, que pode ter sido impulsionada pelo surgimento da Indústria 4.0, com uma discreta redução entre 2015 e 2016. A montagem do gráfico, no entanto, respeitou o período de sigilo de 18 meses de uma patente, por isso, só estão apresentados os dados até 2018 respeitando, desse modo, o período de graça.

O Índice Global de Inovação 2018 (WIPO, 2018) apresentou um quadro com os padrões de gastos com P&D entre os países após a crise financeira de 2008-2009, já que alguns países mantiveram os padrões e outros tiveram uma redução com os gastos em P&D. Porém, nos anos de 2014, 2015 e 2016, os países retomaram e ultrapassaram os valores que eram gastos antes da crise. Esses dados coincidem com as informações dos Gráficos 3 e 4, ajudando, assim, a entender o desenvolvimento tecnológico do setor nos últimos anos. Apesar de que o próprio relatório da WIPO indica isso, a Indústria 4.0, a automação, a robótica e a inteligência artificial são frequentemente mais vistas como ameaças do que como oportunidades.

Diferente do Gráfico 2, em que houve um equilíbrio entre as publicações científicas e dos países que pesquisam sobre o tema, o Gráfico 4 traz uma supremacia da China que aparece em primeiro lugar com 52,38% dos pedidos de patentes, ou seja, mais do que todos os outros países juntos, seguida de longe pelos Estados Unidos com 14,29% em segundo lugar e do Japão com 7,94% em terceiro lugar. Vale ressaltar que grande parte desse elevado número de pedidos de patentes se deve às Políticas de Promoção de Patentes implementadas pela China, no entanto, essa expansão quantitativa nos pedidos de patentes não veio acompanhada do aumento no qualitativo, comprovado pela grande taxa de desistência dos pedidos acompanhada da baixa taxa de renovação (LONG; WANG, 2019).

4 Considerações Finais

Com o presente estudo, foi possível observar o cenário nacional e mundial referente ao desenvolvimento da Tecnologia da Informação e Comunicação (TIC) relacionada à utilização de IA na análise e no dimensionamento de estruturas em concreto armado. Observou-se que o uso da IA vem crescendo dentro da construção civil, especialmente em áreas que precisam de análises complexas. Também foi possível verificar, por meio do levantamento de dados na pesquisa bibliométrica, que, na área da construção civil, o uso da tecnologia computacional ainda é muito tímido e enfrenta algumas barreiras, entre as quais, se destaca o fator humano.

As prospecções realizadas revelaram que a maioria dos resultados apresentou dados encontrados na Ásia, na Europa e nos Estados Unidos, conforme indicado na quantidade de publicações científicas localizadas. O Vietnã apareceu no topo da lista com oito resultados, seguido da Inglaterra com sete, Austrália e Estados Unidos da América cada um com seis. Esses resultados indicam que, naturalmente, essa tecnologia será desenvolvida inicialmente nessas regiões.

Observou-se também um crescente desenvolvimento, no mundo, da utilização de IA na engenharia estrutural nos últimos cinco anos, indicando, assim, uma forte tendência à sua aplicação e utilização. Esse fato causa certa preocupação com relação ao Brasil, visto que os

resultados aqui encontrados foram praticamente nulos. Isso também pode ser visto como oportunidade de um nicho de mercado para empresas da área. Porém, para o desenvolvimento de uma tecnologia, deve-se levar em conta a importância da interação entre a tríplice hélice da inovação (Governo, Universidades e Empresas), não se esquecendo da necessidade de incentivos à pesquisa e ao desenvolvimento.

Portanto, a partir da prospecção, foi possível analisar as possibilidades de utilização de IA na análise e no dimensionamento de estruturas em concreto armado, por exemplo, no dimensionamento aos carregamentos sísmicos, no aprimoramento de formulações empíricas para o dimensionamento ao cisalhamento e na utilização de técnicas para processamento de imagem na detecção de rachaduras, além de traçar um panorama no desenvolvimento da tecnologia nos próximos anos.

Apesar de os resultados apresentarem alguns artigos com temas relacionados à utilização de IA na engenharia estrutural, se faz necessário um estudo mais aprofundado que especifique e quantifique os subtemas que estão sendo pesquisados dentro dessa área com o intuito de nortear mais precisamente as possibilidades de pesquisas futuras.

5 Perspectivas Futuras

A incorporação de novas tecnologias na engenharia estrutural é um caminho a ser trilhado pelo setor. Nesse sentido e com base nos resultados apresentados, acredita-se que, em um futuro próximo, a utilização de IA será uma constante na engenharia estrutural, não só auxiliando na análise e no dimensionamento de estruturas, mas também as tornando mais econômicas e seguras. Espera-se, portanto, que o Brasil invista em pesquisa e desenvolvimento nessa área de modo que novos produtos e serviços sejam gerados. Ademais, mesmo que o Brasil resolva utilizar a IA desenvolvida por outros países, terá de lidar com o fato de que o dimensionamento das estruturas em concreto armado no Brasil deve obedecer à NBR, e tanto os Estados Unidos quanto a Europa utilizam normas próprias (ACI e EUROCODE, respectivamente). Assim, terão de ser feitas adaptações nas IAs ou, dependendo da divergência, a utilização da IA no Brasil pode ser inviável.

Referências

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118:2014**. Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ANTAC – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO; CBIC – CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. **Estratégias para a formulação de Políticas de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Indústria da Construção**. Brasília, DF: ANTAC; CBIC, 2013. 52p.

ANTAC – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. **“Projeto 7 – Ciência e Tecnologia para a Inovação na Construção” – Ciência, Tecnologia e Inovação e a Indústria da Construção Civil**: elementos para a formulação de uma política para o setor. Porto Alegre: ANTAC, 2011. 59p.

BALAGUER, C.; ABDERRAHIM, M. Robotics and automation technologies in construction.

International Journal of Advanced Robotic Systems, [s.l.], v. 4, n. 4, p. III-IV, 2007.

BJELANOVIC, A.; RAJCIC, V. New possibilities of structural design using artificial intelligence techniques. **A Balkema Publishers**, Leiden, p. 543-547, 2003.

CHA, Y.; CHOI, W.; BÜYÜKÖZTÜRK O. Deep Learning-Based Crack Damage Detection Using Convolutional Neural Networks. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, [s.l.], v. 3, p. 361-378, 2017. Disponível em: <https://doi-org.ez357.periodicos.capes.gov.br/10.1111/mice.12263>. Acesso em: 23 jun. 2022.

CNI – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Investimentos na Indústria 4.0**. Brasília, DF: CNI, 2018. Disponível em: https://static.portaldaindustria.com.br/media/filer_public/8b/0f/8b0f5599-9794-4b66-ac83-e84a4d118af9/investimentos_em_industria_40_junho2018.pdf. Acesso em: 13 fev. 2021.

FREITAS, M. L. M. X. História e Historiografia da Arquitetura e do Urbanismo Modernos no Brasil – Concreto Armado no Brasil: Invenção, História, Revisões. In: 13º SEMINÁRIO DOCOMOMO, Salvador, 10-17 de outubro, 2019. **Anais [...]**. Salvador, outubro de 2019. Disponível em: <https://docomomo.org.br/wp-content/uploads/2020/04/119437.pdf>. Acesso em: 9 dez. 2020.

KAUFMAN, D. **A inteligência artificial irá suplantar a inteligência humana?** Coleção Interrogações. Lúcia Santaella (coord.). São Paulo: Estação das Letras e Cores Editora, 2019.

KIMURA, A. E. **Informática aplicada em estruturas de concreto armado**. 2. ed. São Paulo: Pini Oficina de Textos, 2018.

KWON, D. S.; LI, D. J.; SOHN, S. Y. Identifying innovation in socialist countries through patent analysis focused on Cuba and Vietnam. **World Patent Information**, [s.l.], v. 59, p. 101898, December 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wpi.2019.04.001>. Acesso em: 23 jun. 2022.

LONG, C. X.; WANG J. China's Patent Promotion Policies and Its Quality Implications. **Science & Public Policy**, [s.l.], v. 46, n. 1, p. 91-104, 2019. Disponível em: <https://doi-org.ez357.periodicos.capes.gov.br/10.1093/scipol/scy040>. Acesso em: 23 jun. 2022.

LUO, H.; PAAL, S. G. A locally weighted machine learning model for generalized prediction of drift capacity in seismic vulnerability assessments. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, [s.l.], v. 34, n. 11, p. 935-950, nov. 2019. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/mice.12456>. Acesso em: 10 fev. 2021.

MARTHA, L. F. **Análise de estruturas: conceitos e métodos básicos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.

PÉREZ, J. L. *et al.* Optimization of existing equations using a new Genetic Programming algorithm: Application to the shear strength of reinforced concrete beams. **Advances in Engineering Software**, [s.l.], v. 50, p. 82-96, ago. 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0965997812000397?via%3Dihub>. Acesso em: 30 jan. 2021.

SALEHI, H.; BURGUEÑO, R. Emerging artificial intelligence methods in structural engineering. **Engineering Structures**, [s.l.], v. 171, p. 170-189, 15 set. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029617335526?via%3Dihub>. Acesso em: 5 fev. 2021.

SANTOS, V. S. *et al.* Prospecção Bibliométrica e Patentária de Tecnologias com Inteligência Artificial Aplicáveis a Smart Cities. **Cadernos de Prospecção**, Salvador, v. 15, n. 2, p. 523-540, 2022. DOI:

10.9771/cp.v15i2.46120. Disponível em: <https://periodicos.ufba.br/index.php/nit/article/view/46120>. Acesso em: 23 jun. 2022.

TEIXEIRA, F. dos S.; TEIXEIRA, P. dos S.; ROCHA, C. A. M. da. Estudo Prospectivo Sobre Inteligência Artificial Aplicado ao Setor da Construção Civil. **Cadernos de Prospecção**, Salvador, v. 13, n. 4, p. 1.134-1.146, 2020. DOI: 10.9771/cp.v13i4.32975. Disponível em: <https://periodicos.ufba.br/index.php/nit/article/view/32975>. Acesso em: 23 jun. 2022.

WIPO – WORLD INTELLECTUAL PROPERTY ORGANIZATION. **Índice Global de Inovação 2018 – Energizando o Mundo com Inovação**. 11. ed. [2018]. Disponível em: https://www.wipo.int/edocs/pubdocs/pt/wipo_pub_gii_2018-abridged1.pdf. Acesso em: 20 maio 2021.

ZHANG, G. *et al.* Reinforced concrete deep beam shear strength capacity modelling using an integrative bio-inspired algorithm with an artificial intelligence model. **Engineering with Computers**, [s.l.], 9 ago. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00366-020-01137-1>. Acesso em: 20 fev. 2021.

Sobre os Autores

Marcos Gottschalg Discher

E-mail: marcosdischer@yahoo.com.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9365-8925>

Especialista em Cálculo Estrutural e Fundações pela Universidade Federal do Espírito Santo em 2016.

Endereço profissional: Av. Renato Campos, n. 900, Nossa Sra. da Conceição, BR 116, Km-220, Euclides da Cunha, BA. CEP: 48500-000.

Givanildo de Jesus Santos

E-mail: givanildojesus@ifba.edu.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7597-6396>

Especialista em Redes de Computadores pela Escola Superior Aberta do Brasil em 2013.

Endereço profissional: John Kennedy, s/n Loteamento, Cidade Nova, Jequié, BA. CEP: 45201-570.

Eduardo Oliveira Teles

E-mail: eduardo.teles@ifba.edu.br

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4926-1423>

Doutor em Engenharia Industrial pela Universidade Federal da Bahia em 2016.

Endereço profissional: Av. Jorge Amado, s/n, Camaçari, BA. CEP: 42800-605.