

ATUALIZAÇÃO DE MODELOS NUMÉRICOS A PARTIR DE DADOS EXPERIMENTAIS PARA MONITORAMENTO ESTRUTURAL: MAPEAMENTO SISTEMÁTICO

Numerical model updating from experimental data for structural monitoring: mapping study

João Pedro Sena¹, Wellington Andrade da Silva², Iviane Cunha e Santos³,
Marcos Honorato de Oliveira⁴, Maurício de Pina Ferreira⁵



PALAVRAS CHAVE:

Atualização de modelos;
Identificação de sistemas;
Ensaio de vibração;
Integridade estrutural.

KEYWORDS:

Model updating;
System identification;
Vibration test;
Structural integrity.

RESUMO: A necessidade de monitoramento em estruturas aumenta a demanda por novos métodos de monitoramento, uma vez que ensaios de vibração forçada se tornam inviáveis em estruturas de grande porte. O aumento do acesso a novas tecnologias possibilita o estudo de identificação modal de estruturas utilizando somente carregamento ambiente, seguido de atualização de modelos numéricos e possíveis detecções de danos. Seguindo essa temática, realizou-se um mapeamento sistêmico em base de dados com intuito de caracterizar os estudos relacionados a esse objeto de estudo. Termos lógicos foram inseridos na busca, seguidos de filtragem de aderência de título e resumo. Após a leitura dos resumos dos 1006 artigos resultantes da pesquisa inicial, 76 foram selecionados e analisados conforme a quantidade, ano de publicação e periódico publicado. Entende-se que o crescimento dessa pesquisa se deu após o início da década de 2000, indicando o acesso a processamento como principal fator determinante para aumento do interesse por parte dos pesquisadores.

ABSTRACT: *The need for monitoring in structures increases the demand for new monitoring methods, since forced vibration testing becomes unviable in large structures. Increased access to new technologies makes it possible to study the modal identification of structures using only environmental loading, followed by updating numerical models and possible damage detections. Following this theme, a systemic mapping was carried out in a database with the purpose of characterizing the studies related to this object of study. Logical terms were entered in the search, followed by title tacking and summary. After reading the abstracts of the resulting 1006 articles from the initial research, 76 were selected and analyzed according to quantity, year of publication and periodical published. It is understood that the growth of this research occurred in the beginning of the year 2000, indicating the access to processing as the main determining factor to increase the interest on the part of the researchers.*

* Contato com os autores:

Publicado em 27 de dezembro de 2022

¹ e-mail: sena.joaopedro42@gmail.com (J. P. Sena)

Doutorando em Eng. Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

² e-mail: wellington_andrade@ufg.br (W. A. Da Silva)

Doutor, Professor Adjunto, Universidade Federal de Catalão (UFCAT).

³ e-mail: iviane.santos@dnit.gov.br (I. C. Santos)

Doutora, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT).

⁴ e-mail: marcoshonorato@unb.br (M. H. Oliveira)

Doutor, Professor Adjunto, Universidade de Brasília (UnB).

⁵ e-mail: mpina@ufpa.br (M. P. Ferreira)

Doutor, Professor Associado, Universidade Federal do Pará (UFPA).

1. INTRODUÇÃO

Ao se considerar a quantidade de obras de infraestrutura de grande porte que possui idades próximas do previsto em projeto, é possível se esperar que estas obras estejam sujeitas a carregamentos bastante acima daqueles os quais foram projetadas. A partir desta informação, se percebe a importância na avaliação das condições atuais e futuras do carregamento em que estão sujeitas tais obras, com enfoque maior em grandes obras sujeitas a carregamentos dinâmicos de vento e carregamentos sísmicos. Outro tipo de obra que necessita de maior atenção quanto a manifestações patológicas são obras de patrimônio, onde a conservação e o monitoramento de obras de reparo devem ser levadas em conta. (BANERJI, CHIKERMANE, 2012).

No processo de modelagem numérica de estruturas, como análises utilizando o Método dos Elementos Finitos, algumas incertezas podem aparecer, relacionadas às propriedades do material, condições de contorno, tamanho da malha, propriedades da seção e equações matemáticas ou elementos. Estas incertezas acarretam num resultado não tão confiável, abrindo assim a possibilidade de validação do modelo a partir de medições experimentais. Análises modais experimentais produzem as características dinâmicas da estrutura, como frequência natural, modos de vibração e coeficientes de amortecimento, o que vem ganhando grande atenção nas pesquisas nas duas últimas décadas. Estas características dinâmicas fornecem mecanismos de controle para validação do modelo em elementos finitos, uma vez que os valores experimentais são considerados como parâmetros de referência que caracterizam a estrutura em seu estado real (ALTUNIŞIK et al., 2018).

A atualização de modelos também pode ser utilizada para avaliação e monitoramento contínuo de estruturas graças às tecnologias disponíveis, que utilizam sinais remotos de vibração para calibração do modelo em elementos finitos, possibilitando a detecção de qualquer alteração nos parâmetros da estrutura. Este procedimento em específico se torna bastante útil para avaliação da integridade estrutural durante ou após eventos com carregamentos severos, como forte rajada de vento ou terremotos. Porém, pode também ser utilizado para deterioração da estrutura em longo termo por conta de corrosão, fadiga ou ações fluido-estrutura (NTOTSIOS et al., 2009).

2. OBJETIVOS

Esse trabalho tem o objetivo de analisar o panorama histórico das pesquisas relacionadas ao monitoramento e atualização de modelos numéricos de estruturas, selecionando os principais estudos na área com base nas características da estrutura, metodologia utilizada e condições de ensaio. O resultado quantitativo será utilizado para análise qualitativa dos dados, buscando caracterizar o cenário atual de pesquisa sobre o tema e possíveis lacunas, a partir de um estudo de mapeamento sistemático.

3. METODOLOGIA

A revisão do objeto de estudo é realizada utilizando o mapeamento sistemático (*mapping study*) como base, de acordo com a metodologia descrita por Bailey et al. (2007) e Petersen et al. (2008). Este sistema consiste na pesquisa de material bibliográfico cadastrado em bases de dados científicos, utilizando termos ou palavras chaves para filtragem inicial dos estudos de interesse.

A base de dados utilizada nesse trabalho foi somente a presente no Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, a partir do acesso pela Universidade Federal de Goiás. A grande vantagem da utilização desta base de dados consiste na incorporação de outras bases no momento da busca, aumentando assim a abrangência da pesquisa na área de estudo.

A definição da pesquisa se baseou no objeto de estudo “Atualização de modelos numéricos a partir de análises modais”. A primeira busca utilizou os termos “*model updating*” e “*vibration test*” com o operador lógico “AND” para selecionar os artigos que possuíam os dois termos. A utilização destes termos consegue englobar a maioria dos estudos na área, devido a especificidade desta combinação. A segunda busca foi utilizada para acrescentar possíveis estudos com enfoques diferentes do objeto, mas que possuam estudos de caso no campo de atualização de modelos. Os termos utilizados foram “*vibration test*” e “*damage detection*” com o operador “AND”.

A utilização de filtros iniciais na busca foi realizada com intuito de descartar estudos que possuem discrepância em relação ao tema, como trabalhos relacionados a outras áreas de conhecimento. Uma vez percebido que existia apenas uma pequena quantidade de trabalhos em idiomas diferentes de inglês e português, este filtro inicial não foi aplicado, sendo esta exclusão realizada em etapas posteriores. Além disso, todos os artigos selecionados para análise foram artigos revisados por pares.

Com auxílio de um editor de planilhas, foi realizada uma análise de aderência dos títulos e resumos, selecionando assim quais estudos continham informações condizentes com o objeto de estudo selecionado. Por fim, os itens que continham repetições, tanto na mesma pesquisa quanto entre as pesquisas realizadas, foram eliminados da análise. Assim como os trabalhos selecionados no mapeamento, outros artigos e livros, nacionais e internacionais, foram utilizados nessa pesquisa, os quais possuíam importância no levantamento do estudo.

4. RESULTADOS

Na análise de aderência, buscaram-se indícios do tema principal do trabalho, selecionando os trabalhos que seguissem o objeto de estudo, contendo principalmente a utilização de algum método indireto de atualização de modelos numéricos e a aplicação deste método em ao menos um estudo de caso. Estas seleções foram feitas para possibilitar uma classificação dos artigos finais em categorias, permitindo uma análise mais detalhada dos resultados. Os valores resultantes de cada busca, após a análise de aderência dos títulos e resumos, estão descritos na Tabela 1.

TABELA 1: Resumo dos resultados obtidos

Critérios utilizados	Expressões-chave	
	"model updating" AND "vibration test"	"vibration test" AND "damage detection"
Número inicial de artigos sem repetições dentro de uma mesma busca	459	547
Artigos selecionados após análise de aderência de títulos	205	157
Artigos selecionados após leitura dos resumos	83	57
Artigos repetidos na mesma busca	8	4
Artigos repetidos entre buscas	52	
Total	76	

FONTE: Autoria própria.

A primeira divisão realizada nos resultados foi de tipo de estrutura estudada. Ao longo da análise, foi possível perceber uma grande variedade de estruturas passíveis de atualização por meio de análises modais. Estas estruturas se dividiam principalmente em ensaios em laboratório para validação do método estudado e em grandes estruturas que necessitavam de avaliações na integridade estrutural. Nos ensaios de

bancada (em laboratório), têm-se as vigas, treliças e pórticos, enquanto que nas grandes estruturas, têm-se as pontes e edifícios. Existem ainda os trabalhos com estruturas distintas, como peças aeronáuticas e aeroespaciais, torres, placas, plataformas, entre outras, as quais foram agrupadas na categoria nomeada outras estruturas, como mostrado na Figura 1. Na Figura 2, é possível verificar a segunda divisão realizada, que levou em conta o material da estrutura que foi utilizada como exemplo, sendo aço, concreto armado, alumínio e alvenaria os principais utilizados.

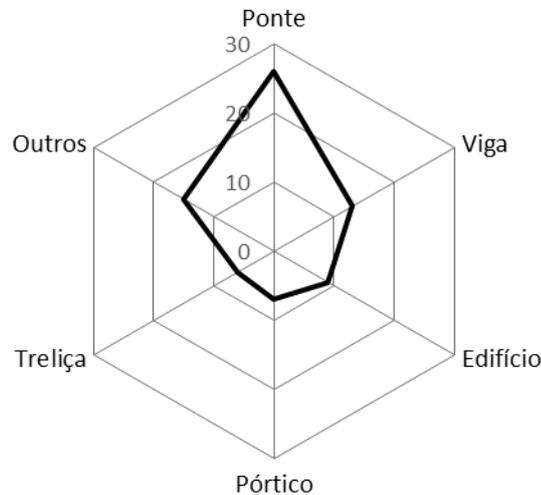


FIGURA 1: Principais estruturas utilizadas nos estudos de caso.

FONTE: Autoria própria.

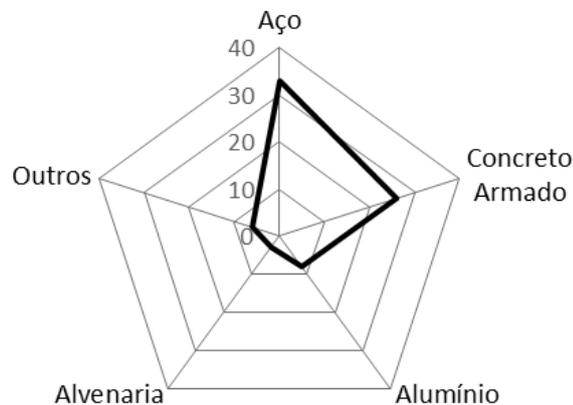


FIGURA 2: Principais tipos de estruturas utilizadas nos estudos de caso.

FONTE: Autoria própria.

Com esses dados, é perceptível que a utilização de técnicas de atualização de modelos é mais comum em estruturas de ponte. Além da necessidade de integridade nestes tipos de estruturas, outro fator inicial que pode ser levado em conta é o custo de monitoramento, que se equipara relativamente com o custo de implantação de tais obras. Identificar e remediar manifestações patológicas no início do surgimento resulta num aumento da vida útil da estrutura. A maior parte dos exemplos foi estruturas de aço ou concreto armado, o que pode ser justificado pela maior incidência de efeitos dinâmicos que estes tipos de estruturas possuem, como por exemplo edifícios e pontes de grande porte submetidos às cargas de vento.

Ainda com enfoque na comparação do procedimento experimental, uma terceira divisão foi realizada segundo o teste de vibração utilizada na análise de respostas dinâmicas das estruturas. A quantidade de artigos para cada um dos três principais tipos de teste se encontra na Figura 3, sendo estes vibração livre, vibração forçada e vibração ambiente. O teste de vibração ambiente, com maior quantidade de exemplos, se mostra mais factível em estruturas de grande porte, como pontes e edifícios, pois não necessitam de excitação externa e pode ser realizada sem a interrupção da utilização da estrutura.

Por fim, considerou-se o método de atualização utilizado, tanto os métodos clássicos quanto novas técnicas aplicadas na minimização da diferença entre as respostas calculadas analiticamente e as obtidas a partir de ensaios experimentais. A Figura 4 contém a quantidade de artigos para cada técnica utilizada. O método da sensibilidade é o mais utilizado entre os artigos aderentes, além de ser um dos primeiros métodos introduzidos na área de atualização de modelos numéricos e também com maior facilidade de implementação.

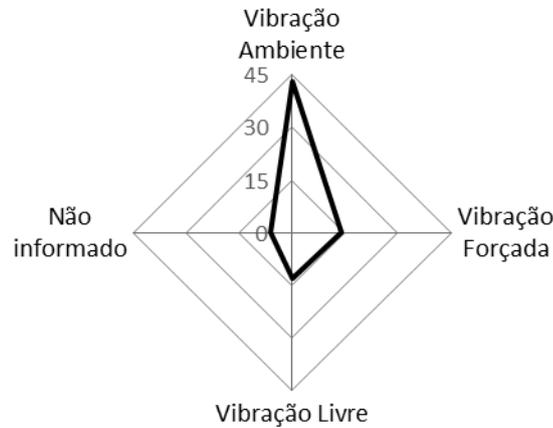


FIGURA 3: Principais testes de vibração.

FONTE: Autoria própria.

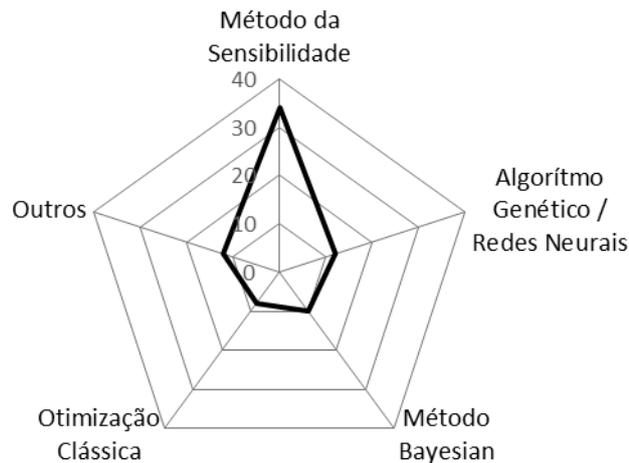


FIGURA 4: Principais métodos de atualização.

FONTE: Autoria própria.

O crescimento de publicações ao longo do ano, a partir do ano 2000 até o ano de 2018 pode ser conferido no gráfico da Figura 5, com períodos de 4 anos. Percebe-se o padrão de crescimento linear ao longo dos anos. A facilidade de acesso à computadores aptos a realizarem as atualizações, de forma a possibilitar e facilitar testes e análises, explica tanto este crescimento como a quantidade elevada de artigos publicados no último ano considerado. Além disso, a acessibilidade à equipamentos de medições precisas aumentou devido ao aumento de empresas fabricantes desses tipos de produtos, apesar de ainda possuírem um preço elevado.

Dentre os artigos selecionados, 58% foram publicados em periódicos com ao menos 2 publicações no tópico, conforme Tabela 2. Os periódicos “Engineering Structures” “Mechanical Systems and Signal Processing” são os que possuem maior número de publicações.

Alguns autores possuem atenção em relação a quantidade de trabalhos selecionados. A Tabela 3 contém 32% dos artigos, sendo que “Altunışık, A. C.” e “Lam, H. F.” se destacam em relação ao restante dos autores. Vale destacar que somente o primeiro autor de cada trabalho foi considerado para esta análise.

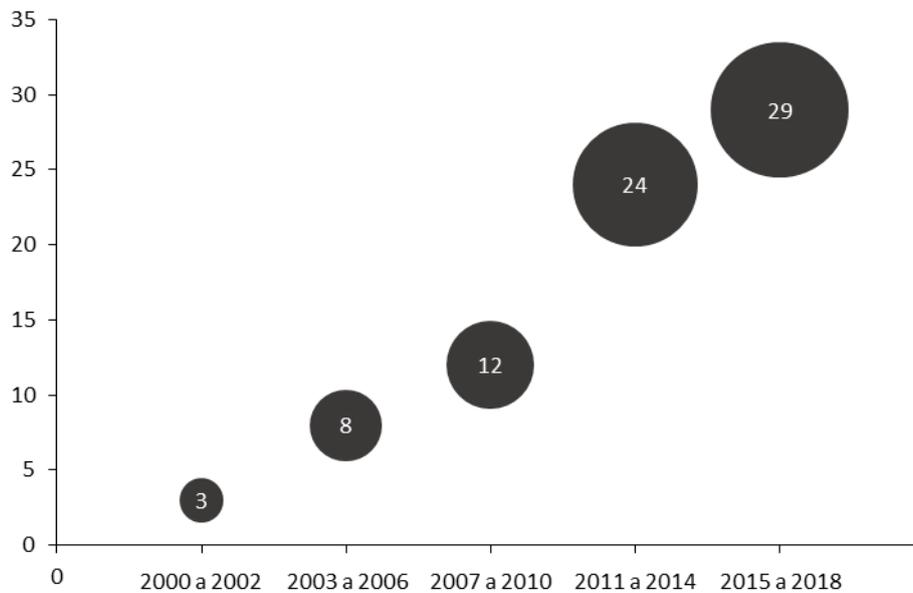


FIGURA 5: Número de publicações ao longo dos anos.

FONTE: Autoria própria.

TABELA 2: Principais periódicos no tópico “atualização de modelos numéricos a partir de análises modais”

Periódico	Número de artigos publicados
Composite Structures	2
Computers and Structures	3
Engineering Computations	2
Engineering Structures	7
Finite Elements in Analysis & Design	2
Journal of Civil Structural Health Monitoring	2
Journal of Constructional Steel Research	2
Journal of Sound and Vibration	5
Journal of Vibroengineering	2
KSCE Journal of Civil Engineering	2
Mechanical Systems and Signal Processing	6
Shock and Vibration	2
Structural Control and Health Monitoring	2
Structure and Infrastructure Engineering	5

FONTE: Autoria Própria.

TABELA 3: Principais autores no tópico “atualização de modelos numéricos a partir de análises modais”

Pesquisador	Número de publicações
Altunışık, A. C.	5
Araújo, A. L.	2
Jaishi, B.	4
Jung, D. S.	2
Lam, H. F.	5

Touat, N.	2
Wan, H. P.	2
Wang, Y.	2

FONTE: Autoria Própria.

4.1 IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMA

A fim de identificar as características modais da estrutura (frequência natural e modos de vibração), é necessário realizar medições dinâmicas da estrutura. Para se determinar a locação dos sensores, alguns aspectos devem ser levados em conta. É necessário que os acelerômetros sejam dispostos de modo que consigam representar as respostas de toda a estrutura. Uma sugestão seria a locação em regiões com maiores sinais de vibração, o que pode ser predeterminado com auxílio de uma análise numérica anterior à experimental (Altunişik et al., 2018). Existe também o método EFI (independência efetiva), que busca o melhor conjunto de localizações de sensores a partir de várias possibilidades, que tem como base a manutenção da independência dos modos de vibração (Castro-Triguero et al., 2017). A utilização de medições transversais auxilia na obtenção dos modos de vibração em estruturas com maior largura, como é o caso da ponte estudada por Araújo, Maldonado e Cho (2011). Porém, para este tipo de medição, é necessário que se utilize sensores sem fio (Mosavi et al., 2013), ou que se interrompa o tráfego de veículos.

Amplificadores e filtros de sinais também são utilizados para aumentar a precisão da caracterização dinâmica da estrutura. Estes equipamentos são utilizados por Ferraioli, Miccoli e Abruzzese (2018) para possibilitar a leitura de pequenas vibrações na estrutura, causadas por cargas ambientes. Mesmo com estes equipamentos, alguns ruídos ainda ficam presentes nos dados finais, necessitando de uma filtragem posterior para se realizar satisfatoriamente a identificação do sistema (FERRAIOLI, MICCOLI e ABRUZZESE, 2018; OH, KIM e PARK, 2016).

Para se extrair as características dinâmicas da estrutura, Altunişik et al. (2018) utilizam decomposição do domínio de frequência aprimorada (EFDD) e identificação do subespaço estocástico (SSI). A escolha do método de decomposição do domínio de frequência (FDD), utilizado por Sabamehr, Lim e Bagchi (2018), se dá pela facilidade de utilização pelo usuário. Outro método bastante utilizado é a seleção de pico (PP), que utiliza das funções de resposta de frequência para identificar valores extremos (picos), sendo esses valores as frequências naturais da estrutura (Ding e Li, 2008). No estudo de caso, Wang, Li e Li (2010) comparam o método PP e o SSI, comprovando que, apesar das frequências identificadas se igualarem, o método PP não consegue identificar tantos modos de vibração quanto o método SSI. A utilização de método de Bayesian FFT por Yang, Lam e Hu (2015) se mostra muito eficiente mesmo com a presença de muitos graus de liberdade, características comuns em estruturas de engenharia civil.

Ensaio dinâmico de vibração em laboratório possuem vantagem em relação aos ensaios em campo devido à facilidade de controle do ambiente, como temperatura e humidade. O controle destas características permite analisar os efeitos do ambiente nos parâmetros modais da estrutura (Lam, Wong e Yang, 2012). Outras características exteriores podem influenciar nos dados medidos. Huang, Gardoni e Hurlbaas (2012) introduzem erros de medição nos cálculos das atualizações, para aumentar a acurácia dos resultados. Por outro lado, Jaishi et al. (2007) relatam a dificuldade de se quantificar os erros presentes nos testes de vibração, principalmente na etapa de pós processamento.

Segundo Lam, Yang e Au (2018), o método Bayesian de identificação de sistemas consegue prever incertezas posteriores com eficácia. Quando se possui todos os dados de medição, o sistema é identificável e as incertezas são pequenas. Por outro lado, quando se tem dados modais reduzidos, as incertezas aumentam. Alguns modos de vibração mais elevados só podem ser obtidos a partir de vibração livre. Para baixos modos de vibração, apenas o ensaio de vibração ambiente é necessário (QIN et al., 2018).

4.2 MÉTODOS DE ATUALIZAÇÃO

O processo de atualização de modelos pode ser realizado diretamente, alterando-se os parâmetros manualmente, ou iterativamente, com auxílio de alguma ferramenta computacional. Existem algoritmos genéricos para implementação dos métodos clássicos. Porém, alguns autores optam pela utilização de ferramentas que realizam automaticamente essa atualização, como Altunişik et al. (2018a), que utilizam do software FEMtools para atualização dos parâmetros de incerteza, baseado no método da sensibilidade, resultando numa diminuição de cerca de 34% na diferença máxima entre os parâmetros. Altunişik et al. (2018b) também utilizam o mesmo software, porém com o método Bayesian de estimativa de parâmetros, alcançando redução da diferença máxima de cerca de 12% entre os parâmetros selecionados.

Alguns métodos são validados para utilização em estruturas de campo. Chouksey, Dutt e Modak (2013) utilizam a validação do método inverso da sensibilidade para comprovar com segurança sua utilização na previsão de balanceamento de sistemas de motores. Outros métodos, como o Bayesian baseado no MCMC (Markov Chain Monte Carlo), são validados para utilização no monitoramento da integridade de edifícios (Hu, Lam e Yang, 2017). Outras validações são realizadas em relação ao modelo analítico a ser utilizado. A utilização de modelo analítico de placas, quando em estruturas mais simples, diminui consideravelmente a quantidade de iterações necessárias para se chegar em um resultado mais preciso. Com o aumento da complexidade da estrutura, o tempo de análise aumenta, enquanto a diminuição do número de parâmetros a serem utilizados resulta numa diminuição no tempo de análise (Jung e Kim, 2013a).

Além dos métodos clássicos, a utilização de Redes Neurais e Algoritmos Genéticos vem comprovando a eficácia desses métodos na atualização de modelos. A principal vantagem se dá na atualização direta dos parâmetros estruturais, podendo ser aplicada em estruturas complexas. O tempo gasto para as análises costuma ser elevado, principalmente com grande número de amostras para treinamento. Utilizando o conceito de matrizes ortogonais, Chang, Chang e Xu (2000) reduzem drasticamente o número de amostras sem sacrificar a plenitude das amostras. Os resultados são precisos, apesar de não se esperar uma combinação perfeita entre valores medidos e calculados. Lee et al. (2005) validaram a utilização de Redes Neurais na detecção de danos de forma efetiva num modelo de ponte.

Para maior validação dos métodos, Sabamehr, Lim e Bagchi (2018) utilizaram como base o método de atualização de matriz para comparar sua eficácia em relação às Redes Neurais e Algoritmo Genético. Nos casos estudados, o método matricial é mais adequado, pois é necessário definir muitos parâmetros para utilização do Algoritmo Genético, enquanto no método de Redes Neurais, é importante possuir muitos grupos, o que se torna uma tarefa árdua quando aplicado a estruturas mais complexas. Por outro lado, grande robustez no uso de Algoritmo Genético é comprovada por Ferraioli, Miccoli e Abruzzese (2018). Foi possível perceber vários ajustes em variados tipos de variáveis, que alcançaram bons resultados devido à boa escolha do modelo estrutural inicial, à quantidade de informações modais experimentais e a aplicação desses dados na atualização.

A presença de danos na estrutura altera fortemente as frequências naturais das estruturas devido à diminuição da rigidez de flexão na região do dano (Altunişik, Okur e Kahya, 2017). A utilização do método da sensibilidade para atualização local de uma subestrutura para detecção de dano é apresentada por Chen et al. (2014), diminuindo a dimensão dos cálculos e consequentemente aumentando a eficiência da atualização. Yang et al. (2007) provam, a partir de um modelo com seis graus de liberdade, que a utilização de funções de sensibilidade pode ser utilizada para detectar, localizar, classificar e quantificar danos na estrutura. Já Jaishi e Ren (2006) utilizaram uma viga em concreto armado para validar o algoritmo de detecção de danos, mesmo sob presença de ruídos. Por fim, com o intuito de aumentar a estimativa de vida útil em estruturas pouco danificadas, Kompalka, Reese e Bruhns (2007) sugerem a utilização da dimensão e orientação da fissura como um parâmetro de atualização.

Em relação aos parâmetros a serem atualizados, tem-se no trabalho de Conde et al. (2017) que, para a estrutura estudada, a coesão dos materiais de preenchimento e as tensões não lineares da alvenaria são os parâmetros que mais influenciam nas respostas dinâmicas da estrutura. A segurança da ponte

considerada é validada graças às análises numéricas tridimensionais em conjunto com o método de atualização. Ferraioli, Miccoli e Abruzzese (2018) mostram que a relação solo-estrutura necessita de um monitoramento durante a atualização, pois as constantes de mola que representam as estruturas vizinhas são menos sensíveis, podendo ser negligenciadas durante a atualização. Elementos de mola nos apoios também são utilizados de forma paramétrica por Jung e Kim (2013b), resultando numa melhoria significativa nas propriedades dinâmicas da estrutura, porém sem melhoria considerável nos deslocamentos estáticos.

A seleção intuitiva de poucos parâmetros permite a atualização do modelo. Segundo Jaishi e Ren (2007), muitos parâmetros para atualização resultam num mal condicionamento do modelo. A escolha dos apoios também influencia diretamente na precisão do método, sendo que a utilização de apoios de rolamento não consegue simular os comportamentos dinâmicos para o tipo de ponte estudada. Algumas alternativas podem ser para seleção de parâmetros. O agrupamento dos parâmetros disponíveis, utilizado por Prananta et al. (2016), conseguiu diminuir de 800 parâmetros a serem atualizados para 40 variáveis, mantendo a melhoria do método. A diminuição do tempo de processamento se torna ainda mais válida quando se pretende testar estratégias de otimização em mais de uma análise. O agrupamento foi realizado diretamente, relacionando cada componente e os parâmetros envolvidos.

Além da diminuição da quantidade de parâmetros, Mackerle (2000) verificou que atribuindo variações máximas e mínimas nos parâmetros aumenta a precisão do procedimento de atualização. Os valores iniciais dos parâmetros também possuem um importante valor na modelagem. A partir do método da sensibilidade, Jiang et al. (2014) demonstram que a convergência se torna mais difícil quando o erro inicial possui um valor muito grande.

A atualização de modelos também possui funcionamento satisfatório em materiais não homogêneos. A validação do método na atualização do módulo de elasticidade, densidade, massa e rigidez de uma torre histórica, com variação acima de 50% dos valores iniciais, é feita por Foti et al. (2012). Os resultados são satisfatórios em se tratando de uma torre construída com materiais altamente heterogêneos (pedra e concreto cíclico). A densidade do concreto, na ponte avaliada por Jaishi et al. (2007), varia ao longo do arco, o que pode ser justificado pela relação de água-concreto ao longo da construção, entre outras incertezas. Essa característica é verificada ao longo do processo de atualização, onde a estimativa inicial corresponde à densidade considerada pelas normas vigentes.

5. CONCLUSÕES

Avaliando de forma geral, percebe-se que o tema de atualização de modelos numéricos consiste numa linha de pesquisa recente, que apesar de possuir métodos clássicos, está se popularizando nas últimas duas décadas devido ao acesso a tecnologias de instrumentação de estruturas.

A aplicação desses métodos é possível em variados tipos de estruturas, porém existe um grande número de aplicações em estruturas de engenharia civil. As análises de vibração ambiente facilitam a identificação destes modelos estruturais, não necessitando de indução de forças externas para caracterização dinâmica satisfatória. Além disso, a possibilidade de utilização para detecção e caracterização de danos nas estruturas justifica a grande utilização em pontes e edifícios, uma vez que estas obras necessitam de avaliação estrutural devido aos riscos que pequenos danos podem trazer à vida útil da estrutura.

Não foram encontrados estudos comparativos considerando o tipo de aplicação do carregamento ou método utilizado para atualização dos modelos, indicando que estas escolhas dependem do estudo de caso específico que está sendo realizado. Um estudo dessa lacuna pode resultar em referência para trabalhos futuros quanto às decisões de projeto, auxiliando na escolha da melhor técnica de atualização e tipo de teste de vibração.

Por fim, é possível perceber que as pesquisas estão encaminhando para o monitoramento remoto de estruturas, com utilização de aparelhos remotos para medição e de algoritmos robustos, o que possibilita um monitoramento contínuo das estruturas em situações normais de utilização.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALTUNIŞIK, A. C.; OKUR, F. Y.; KAHYA, V. **Automated model updating of multiple cracked cantilever beams for damage detection**. Journal Of Constructional Steel Research, v. 138, p.499-512, nov. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.08.006>
- ALTUNIŞIK, A. C.; KARAHASAN, O. Ş.; GENÇ, A. F.; OKUR, F. Y.; GÜNAYDIN, M.; ADANUR, S. **Sensitivity-Based Model Updating of Building Frames using Modal Test Data**. Ksce Journal Of Civil Engineering, v. 22, n. 10, p.4038-4046, 31 maio 2018a. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12205-018-1601-6>
- ALTUNIŞIK, A. C.; OKUR, F. Y.; GENÇ, A. F.; GÜNAYDIN, M.; KARAHASAN, O. **Automated Model Updating Effect on the Linear and Nonlinear Dynamic Responses of Historical Masonry Structures**. Experimental Techniques, v. 42, n. 6, p.605-621, 6 set. 2018b. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40799-018-0271-0>
- ARAÚJO, I. G.; MALDONADO, E.; CHO, G. C. **Ambient vibration testing and updating of the finite element model of a simply supported beam bridge**. Frontiers Of Architecture And Civil Engineering In China, v. 5, n. 3, p.344-354, set. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11709-011-0124-8>
- BAILEY, J.; BUDGEN, D.; TURNER, M; KITCHENHAM, B; BRERETON, P; LINKMAN, S. **Evidence relating to Object-Oriented software design: A survey**. First International Symposium On Empirical Software Engineering And Measurement (esem 2007), [s.l.], p.482-484, set. 2007. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). DOI: <https://doi.org/10.1109/ESEM.2007.58>
- BANERJI, P.; CHIKERMANE, S. **Condition assessment of a heritage arch bridge using a novel model updation technique**. Journal of Civil Structure Health Monitoring, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s13349-011-0013-9>
- CASTRO-TRIGUERO, R.; GARCIA-MACIAS, E.; FLORES, E. S.; FRISWELL, M. I.; GALLEGO, R. **Multi-scale model updating of a timber footbridge using experimental vibration data**. Engineering Computations, v. 34, n. 3, p.754-780, 2 maio 2017. DOI: <https://doi.org/10.1108/EC-09-2015-0284>
- CHANG, C. C.; CHANG, T. Y. P.; XU, Y. G. **Adaptive neural networks for model updating of structures**. Smart Materials And Structures, v. 9, n. 1, p.59-68, 1 fev. 2000. DOI: <https://doi.org/10.1088/0964-1726/9/1/306>
- CHEN, S.; LIN, W.; YU, J.; QI, A. **Free-Interface Modal Synthesis Based Substructural Damage Detection Method**. Shock And Vibration, v. 2014, p.1-13, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/741697>
- CHOUKSEY, M.; DUTT, J. K.; MODAK, S. V. **Model updating of rotors supported on ball bearings and its application in response prediction and balancing**. Measurement, v. 46, n. 10, p.4261-4273, dez. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.08.009>
- CONDE, B.; RAMOS, L. F.; OLIVEIRA, D. V.; RIVEIRO, B.; SOLLA, M. **Structural assessment of masonry arch bridges by combination of non-destructive testing techniques and three-dimensional numerical modelling: Application to Vilanova bridge**. Engineering Structures, v. 148, p.621-638, out. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.07.011>
- DING, Y.; LI, A. **Finite Element Model Updating for the Runyang Cable-Stayed Bridge Tower Using Ambient Vibration Test Results**. Advances In Structural Engineering, v. 11, n. 3, p.323-335, jun. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1260/136943308785082599>
- FERRAIOLI, M.; MICCOLI, L.; ABRUZZESE, D. **Dynamic characterisation of a historic bell-tower using a sensitivity-based technique for model tuning**. Journal Of Civil Structural Health Monitoring, v. 8, n. 2, p.253-269, 14 fev. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13349-018-0272-9>

FOTI, D.; DIAFERIO, M.; GIANNOCCARO, N. I.; MONGELLI, M. **Ambient vibration testing, dynamic identification and model updating of a historic tower.** *Ndt & e International*, v. 47, p.88-95, abr. 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2011.11.009>

HU, J.; LAM, H.-F.; YANG, J.-H. **Operational modal identification and finite element model updating of a coupled building following Bayesian approach.** *Structural Control And Health Monitoring*, v. 25, n. 2, 25 set. 2017. DOI: <http://doi.org/10.1002/stc.2089>

HUANG, Q.; GARDONI, P.; HURLEBAUS, S. **A probabilistic damage detection approach using vibration-based nondestructive testing.** *Structural Safety*, v. 38, p.11-21, set. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2012.01.004>

JAISHI, B.; KIM, H.-J.; KIM, M. K.; REN, W.-X.; LEE, S.-H. **Finite element model updating of concrete-filled steel tubular arch bridge under operational condition using modal flexibility.** *Mechanical Systems And Signal Processing*, v. 21, n. 6, p.2406-2426, ago. 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymsp.2007.01.003>

JAISHI, B.; REN, W.-X. **Damage detection by finite element model updating using modal flexibility residual.** *Journal Of Sound And Vibration*, v. 290, n. 1-2, p.369-387, fev. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2005.04.006>

_____. **Finite element model updating based on eigenvalue and strain energy residuals using multiobjective optimisation technique.** *Mechanical Systems And Signal Processing*, v. 21, n. 5, p.2295-2317, jul. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2006.09.008>

JIANG, D.; ZHANG, P.; FEI, Q.; WU, S. **Comparative study of model updating methods using frequency response function data.** *Journal Of Vibroengineering*, v. 16, n. 5, ago. 2014.

JUNG, D.-S.; KIM, C.-Y. **Finite element model updating of a simply supported skewed PSC I-girder bridge using Hybrid Genetic Algorithm.** *Ksce Journal Of Civil Engineering*, v. 17, n. 3, p.518-529, abr. 2013a. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12205-013-0599-z>

_____. **Finite element model updating on small-scale bridge model using the hybrid genetic algorithm.** *Structure And Infrastructure Engineering*, v. 9, n. 5, p.481-495, maio 2013b. DOI: <https://doi.org/10.1080/15732479.2011.564635>

KOMPALKA, A. S.; REESE, S.; BRUHNS, O. T. **Experimental investigation of damage evolution by data-driven stochastic subspace identification and iterative finite element model updating.** *Archive Of Applied Mechanics*, v. 77, n. 8, p.559-573, 14 fev. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00419-007-0114-4>

LAM, H.-F.; YANG, J.-H.; AU, S.-K. **Markov chain Monte Carlo-based Bayesian method for structural model updating and damage detection.** *Structural Control And Health Monitoring*, v. 25, n. 4, 11 jan. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/stc.2140>

LAM, H. F.; WONG, M. T.; YANG, Y. B. **A feasibility study on railway ballast damage detection utilizing measured vibration of in situ concrete sleeper.** *Engineering Structures*, v. 45, p.284-298, dez. 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.06.022>

LEE, J. J.; LEE, J.-Y.; YI, J.-H.; YUN, C.-B.; JUNG, H.-Y. **Neural networks-based damage detection for bridges considering errors in baseline finite element models.** *Journal Of Sound And Vibration*, v. 280, n. 3-5, p.555-578, fev. 2005. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2004.01.003>

MACKERLE, J. **Finite Element Vibration and Dynamic Response Analysis of Engineering Structures.** *Shock And Vibration*, v. 7, n. 1, p.39-56, 2000. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2000/405046>

MOSAVI, A. A.; SEDARAT, H.; O'CONNOR, S. M.; EMAMI-NAEINI, A.; LYNCH, J. **Calibrating a high-fidelity finite element model of a highway bridge using a multi-variable sensitivity-based optimisation approach.** *Structure And Infrastructure Engineering*, v. 10, n. 5, p.627-642, 19 mar. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1080/15732479.2012.757793>

NTOTSIOS, E.; PAPADIMITRIOU, C.; PANETSOS, P.; KARAIKOS, G.; PERROS, K.; PERDIKARIS, P. C. **Bridge health monitoring system based on vibration measurements.** *Bulletin of Earthquake Engineering*, 7 (2), 2009, pp.469-483. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10518-008-9067-4>

OH, B. K.; KIM, D.; PARK, H. S. **Modal Response-Based Visual System Identification and Model Updating Methods for Building Structures**. Computer-aided Civil And Infrastructure Engineering, v. 32, n. 1, p.34-56, 6 ago. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1111/mice.12229>

PETERSEN, K.; FELDT, R.; MUJTABA, S.; MATTSSON, M. **Systematic Mapping Studies in Software Engineering**. School of Engineering, Blekinge Institute of Technology. University of Bari, Italy, 26 - 27 June. 2008.

PRANANTA, B.; KANAKIS, T.; VANKAN, J.; VAN HOUTEN, R. **Model updating of finite element model using optimisation routine**. Aircraft Engineering And Aerospace Technology, [s.l.], v. 88, n. 5, p.665-675, 5 set. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1108/AEAT-02-2015-0064>

QIN, S.; ZHANG, Y.; ZHOU, Y.-L.; KANG, J. **Dynamic Model Updating for Bridge Structures Using the Kriging Model and PSO Algorithm Ensemble with Higher Vibration Modes**. Sensors, v. 18, n. 6, p.1879, 8 jun. 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/s18061879>

SABAMEHR, A.; LIM, C.; BAGCHI, A. **System identification and model updating of highway bridges using ambient vibration tests**. Journal Of Civil Structural Health Monitoring, v. 8, n. 5, p.755-771, 4 set. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13349-018-0304-5>

YANG, J.; LAM, H. F.; HU, J. **Ambient Vibration Test, Modal Identification and Structural Model Updating Following Bayesian Framework**. International Journal Of Structural Stability And Dynamics, v. 15, n. 07, out. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1142/S0219455415400246>

YANG, C.; ADAMS, D. E.; DERRISO M.; GORDON, G. **Structural Damage Identification in a Mechanically Attached Metallic Panel Using Embedded Sensitivity Functions**. Journal Of Intelligent Material Systems And Structures, v. 19, n. 4, p.475-485, 10 maio 2007. DOI: <https://doi.org/10.1177/1045389X06076187>