

O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS NA ENGENHARIA CIVIL: APLICAÇÕES, PRÁTICAS DE PROJETO E DESAFIOS CONCEITUAIS

O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS NA ENGENHARIA CIVIL: APLICAÇÕES,
PRÁTICAS DE PROJETO E DESAFIOS CONCEITUAIS

O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS NA ENGENHARIA CIVIL: APLICAÇÕES,
PRÁTICAS DE PROJETO E DESAFIOS CONCEITUAIS

Eduardo Cássio Sales dos Santos¹, Thawane Miranda², Júlia Mendonça Leitão Alves³, Joyce Castro Santos⁴, Ícaro Viterbre Debique Sousa⁵, Heron Viterbre Debique Sousa⁶, Iuri dos Santos Manoel⁷, Wilder Pinto Mendes⁸, Alessandro Leonardo da Silva⁹, Tânia Nogueira Fonseca Souza¹⁰, Marcelo Robert Fonseca Gontijo¹¹, Luiz Elpídio de Melo Machado¹²

DOI: 10.54899/dcs.v23i94.6949

Recibido: 07/08/2026 | Aceptado: 01/09/2026 | Publicación en línea: 08/09/2026.

RESUMO

Este artigo apresenta uma revisão bibliográfica que busca avaliar o cenário atual do Método dos Elementos Finitos (M.E.F.) dentro da Engenharia Civil. A pesquisa sintetiza as bases teóricas e a prática diária do método, detalhando como a discretização de modelos resolve desafios analíticos complexos em estruturas, na geotecnia e no projeto de Obras de Arte Especiais. O levantamento da literatura aponta que a ferramenta computacional garante uma precisão indispensável para dimensionar pontes sob cargas dinâmicas e simular o comportamento não linear dos materiais,

¹ Graduando em Engenharia Civil, Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG), Divinópolis, Minas Gerais, Brasil. E-mail: eduardocsales332@gmail.com Orcid: <https://orcid.org/0009-0001-4230-8375>

² Graduanda em Engenharia Civil, Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG), Divinópolis, Minas Gerais, Brasil. E-mail: thawanemiranda@gmail.com Orcid: <https://orcid.org/0009-0009-6093-516X>

³ Graduanda em Engenharia Civil, Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG), Divinópolis, Minas Gerais, Brasil. E-mail: julia.mendoncaleitao@gmail.com Orcid: <https://orcid.org/0009-0006-7782-6080>

⁴ Graduanda em Engenharia Civil, Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG), Divinópolis, Minas Gerais, Brasil. E-mail: joycecsantos16@gmail.com Orcid: <https://orcid.org/0009-0000-8906-9554>

⁵ Doutor em Estatística e Experimentação Agropecuária, Universidade Federal de Lavras (UFLA), Lavras, Minas Gerais, Brasil. E-mail: viterbre@gmail.com Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-4393-5952>

⁶ Doutorando em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. E-mail: heronviterbre@gmail.com
Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-7147-927X>

⁷ Doutor em Estatística e Experimentação Agropecuária, Universidade Federal de Lavras (UFLA), Lavras, Minas Gerais, Brasil. E-mail: iuri.manoel@uemg.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-2018-309X>

⁸ Doutor em Matemática, Universidade Federal Fluminense (UFF), Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
E-mail: wilder.mendes@uemg.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-6344-2258>

⁹ Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Itabira, Minas Gerais, Brasil. E-mail: alessandro.silva@uemg.br

¹⁰ Doutora em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. E-mail: tania.souza@uemg.br

¹¹ Doutor em Engenharia Aeronáutica e Mecânica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, São Paulo, Brasil. E-mail: marcelo.gontijo@uemg.br Orcid: <https://orcid.org/0009-0007-0720-5905>

¹² Doutor em Estatística e Experimentação Agropecuária, Universidade Federal de Lavras (UFLA), Lavras, Minas Gerais, Brasil. E-mail: luiz.machado@uemg.br

como a perda de resistência do concreto. No entanto, o texto alerta para um risco crescente e prático no mercado: a "síndrome da caixa preta". O trabalho mostra a sua relevância justamente ao criticar como a confiança cega na interface visual de softwares comerciais pode gerar erros de projeto, exigindo uma calibração rigorosa baseada nas normas vigentes. Ao avaliar o futuro do setor, nota-se que a integração do cálculo numérico com a modelagem BIM e ferramentas de Inteligência Artificial surge como a principal solução para agilizar etapas e reduzir falhas de malha. Apesar de todos esses avanços otimizarem os fluxos de trabalho, a pesquisa conclui que a segurança estrutural definitiva continua dependendo da validação e do critério analítico do engenheiro.

Palavras-chave: Análise Estrutural. Elementos Finitos. Engenharia Civil. Pontes.

ABSTRACT

This article presents a literature review that seeks to evaluate the current scenario of the Finite Element Method (FEM) within Civil Engineering. The research synthesizes the theoretical foundations and the daily practice of the method, detailing how model discretization solves complex analytical challenges in structures, geotechnics, and the design of special engineering structures. The literature survey indicates that this computational tool ensures an indispensable precision for designing bridges under dynamic loads and simulating the non-linear behavior of materials, such as the loss of concrete strength. However, the text warns of a growing and practical risk in the market: the "black box syndrome." The work demonstrates its relevance precisely by criticizing how blind trust in the visual interfaces of commercial software can lead to design errors, requiring rigorous calibration based on current standards. In evaluating the future of the sector, it is noted that the integration of numerical calculation with BIM modeling and Artificial Intelligence tools emerges as the primary solution to streamline stages and reduce mesh errors. Although all this technology optimizes workflows, the research concludes that definitive structural safety still depends on the engineer's validation and analytical judgment.

Keywords: Bridges. Civil Engineering. Finite Elements. Structural Analysis.

RESUMEN

Este artículo presenta una revisión bibliográfica que busca evaluar el escenario actual del Método de los Elementos Finitos (MEF) dentro de la Ingeniería Civil. La investigación sintetiza las bases teóricas y la práctica diaria del método, detallando cómo la discretización de modelos resuelve desafíos analíticos complejos en estructuras, en geotecnia y en el diseño de Obras de Arte Especiales. La revisión de la literatura señala que esta herramienta computacional garantiza una precisión indispensable para dimensionar puentes bajo cargas dinámicas y simular el comportamiento no lineal de los materiales, como la pérdida de resistencia del hormigón. Sin embargo, el texto advierte sobre un riesgo creciente y práctico en el mercado: el "síndrome de la caja negra". El trabajo muestra su relevancia precisamente al criticar cómo la confianza ciega en la interfaz visual de los softwares comerciales puede generar errores de diseño, exigiendo una calibración rigurosa basada en las normativas vigentes. Al evaluar el futuro del sector, se observa que la integración del cálculo numérico con el modelado BIM y herramientas de Inteligencia Artificial surge como la principal solución para agilizar etapas y reducir errores de malla. A pesar de que toda esta tecnología optimiza los flujos de trabajo, la investigación concluye que la

seguridad estructural definitiva sigue dependiendo de la validación y del criterio analítico del ingeniero.

Palabras clave: Análisis Estructural. Elementos Finitos. Ingeniería Civil. Puentes.



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución- NoComercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

INTRODUÇÃO

A engenharia estrutural moderna passou por uma profunda transformação com a transição dos métodos analíticos clássicos para as soluções numéricas computadorizadas. Nesse contexto, o Método dos Elementos Finitos, ou simplesmente M.E.F., tornou-se a técnica mais eficaz e sólida para solucionar equações diferenciais com condições de contorno complexas, visto que sua versatilidade permite que ele seja aplicado a uma vasta gama de problemas na Engenharia Civil, estendendo-se desde a análise de superestruturas de edifícios até interações geotécnicas. Ao discretizarmos um meio contínuo em subdomínios interconectados por nós, processo fundamental que examinaremos em detalhes ao tratarmos da fundamentação teórica do M.E.F., o método nos permite contornar as limitações de simplificações geométricas e materiais, viabilizando representações tridimensionais que se aproximam substancialmente do comportamento físico real das estruturas.

O projeto e a execução de Obras de Arte Especiais (OAEs), como pontes e viadutos, passaram por uma mudança importante com a evolução das ferramentas de análise estrutural. Tradicionalmente, o cálculo dessas estruturas dependia de métodos analíticos que, por simplificarem o comportamento da ponte a modelos bidimensionais, frequentemente resultavam em estimativas conservadoras, superdimensionando esforços e ignorando a complexidade da interação espacial entre os elementos. O uso do Método dos Elementos Finitos (M.E.F.) alterou esse cenário, permitindo que o projetista discretize o tabuleiro e os pilares em sistemas tridimensionais, obtendo uma distribuição de tensões e deslocamentos muito mais alinhada ao comportamento físico da estrutura. Essa precisão é determinante à medida que pontes de maior porte e vãos mais esbeltos se tornam comuns na engenharia moderna, forçando o uso de modelos capazes de lidar com a não linearidade geométrica dos cabos e com a resposta inelástica dos materiais, como a fissuração do concreto e a plastificação do aço. A transição para projetos mais

arrojados também exige que o cálculo estrutural acompanhe as etapas construtivas da obra, já que o estado de tensão final de uma ponte estaiada, por exemplo, depende diretamente da sequência em que os cabos são tensionados e os segmentos são montados. Além disso, a prática de projeto atual incorporou a interação solo-estrutura, abandonando a premissa simplista de apoios perfeitamente rígidos para considerar a rigidez real das fundações em relação ao maciço. Ao integrar esses fatores o M.E.F. deixa de ser apenas uma ferramenta de verificação para se tornar a base principal do dimensionamento, fornecendo os parâmetros necessários para avaliar desde a resistência à fadiga das ligações até a estabilidade da estrutura frente a ventos e ações sísmicas.

Contudo, a facilidade de modelagem oferecida por essa ferramenta digital exige cautela. Embora a proliferação de softwares de alta capacidade, como o TQS, tenha democratizado o uso do M.E.F., surge na prática profissional a necessidade de mitigar riscos conceituais. Tais riscos são, muitas vezes, mascarados por mapas coloridos de tensões e distorcidos pela chamada "síndrome da caixa preta" — uma preocupação central que será discutida no tópico voltado às ferramentas, desafios normativos e perspectivas de integração tecnológica.

Diante desse panorama, este artigo de revisão bibliográfica tem como objetivo principal apresentar e discutir o estado da arte do Método dos Elementos Finitos aplicado à Engenharia Civil. O trabalho estrutura-se a partir da contextualização dos conceitos teóricos de discretização e tipologias básicas de elementos, passando por suas aplicações em concreto, aço e geotecnia. Na sequência, expõe o dimensionamento e simulação de Obras de Arte Especiais (OAEs), e conclui com uma discussão crítica sobre o uso das plataformas computacionais, os desafios de calibração normativa e as perspectivas de inovação com o Building Information Modeling (BIM) e a Inteligência Artificial.

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O presente estudo caracteriza-se como uma revisão bibliográfica de abordagem qualitativa, com caráter exploratório e descritivo, desenvolvida com o objetivo de reunir e analisar contribuições da literatura acerca do Método dos Elementos Finitos (M.E.F.) aplicado à Engenharia Civil. O levantamento bibliográfico foi realizado em plataformas de literatura científica, incluindo Google Scholar (Google Acadêmico), Scientific Electronic Library Online (SciELO) e ScienceDirect, complementado pela consulta a repositórios institucionais de universidades, periódicos especializados, documentos técnicos da National Agency for Finite

Element Methods and Standards (NAFEMS) e normas técnicas pertinentes ao tema.

Para a realização das buscas, foram empregados descritores em português e inglês, entre eles: "Método dos Elementos Finitos", "Análise Estrutural", "Engenharia Civil", "Pontes", "Obras de Arte Especiais", "Interação Solo-Estrutura", "Síndrome da Caixa Preta", "Building Information Modeling (BIM)" e "Finite Element Method". Foram priorizadas publicações com relação direta ao objetivo do estudo, contemplando livros e obras de referência em métodos numéricos e mecânica das estruturas, artigos científicos, trabalhos apresentados em eventos, teses, dissertações, trabalhos de conclusão de curso e documentos técnicos e normativos. Buscou-se, ainda, conciliar referências clássicas, utilizadas na fundamentação conceitual do método, com estudos recentes relacionados às suas aplicações e perspectivas tecnológicas.

A análise do material selecionado foi realizada por meio de leitura exploratória, seletiva e interpretativa, com organização das informações segundo os principais eixos temáticos do artigo: fundamentação teórica do M.E.F., aplicações na Engenharia Civil, análise de pontes e Obras de Arte Especiais (OAEs), interação solo-estrutura e desafios e perspectivas das ferramentas computacionais. Posteriormente, realizou-se uma síntese qualitativa dos principais argumentos e resultados identificados na literatura, buscando estabelecer relações entre os estudos e identificar convergências, limitações e tendências de aplicação do método. Como limitação, destaca-se que o estudo não constitui uma revisão sistemática e, portanto, não pretende esgotar a totalidade da produção científica sobre o tema, restringindo-se às fontes selecionadas conforme os critérios e eixos analíticos estabelecidos.

REFERENCIAL TEÓRICO

Fundamentação Teórica do Método dos Elementos Finitos (M.E.F.)

Primeiramente, devemos compreender a relevância do método dos elementos finitos (M.E.F.), como sendo a ferramenta mais eficiente para a resolução de equações diferenciais com condições de contorno e iniciais, como as que regem os modelos matemáticos dos sistemas físicos contínuos, seja ele da mecânica dos sólidos deformáveis, condução de calor e de massa ou eletromagnetismo (Soriano, 2009).

Quanto ao processo de discretização do modelo matemático contínuo do M.E.F., ainda segundo Soriano (2009), o presente método tem como ponto de partida o arbítrio de leis simples

— principalmente polinomiais — para variáveis dependentes primárias em subdomínios denominados elementos finitos, de modo a substituir as leis exatas de solução do modelo matemático e garantir a continuidade da interface dos elementos. Esses elementos são interconectados por meio de pontos nodais em seus contornos, e, como as leis são estabelecidas tendo como base os parâmetros nodais, os infinitos pontos são substituídos por um número finito de pontos.

As equações do domínio e as condições de contorno são as equações de governo do sistema físico e, apesar de serem resultado de uma aproximação do modelo real, fornecem uma verdade matemática e uma meia-verdade física. Ao considerarmos um sólido com pequenos deslocamentos e rotações, seção transversal plana e apoios indeslocáveis transversalmente, a equação governante de um modelo básico composto por essa estrutura biapoiada, pode ser descrita pela equação (1) (Soriano, 2009).

$$EI \cdot u_{,xxxx} = p \quad (1)$$

onde:

EI = produto do módulo de elasticidade do material pelo momento principal da seção transversal;

u, x = deslocamento no plano de flexão, sendo u a variável primária, x a variável independente medida segundo o eixo geométrico, e a vírgula no índice indica a derivada em relação à variável x .

p = intensidade da força distribuída por unidade de comprimento.

A partir de modelos diferenciais como o da Equação (1), evidencia-se que a formulação matemática adotada está ligada à simplificação mecânica da estrutura real. Conforme abordado pelo mesmo autor, a representação desses sistemas físicos exige a seleção adequada dos modelos estruturais e seus respectivos elementos finitos, que podem ser classificados de acordo com suas dimensões espaciais: os elementos unidimensionais (modelos de linha), os bidimensionais (modelos de superfície) e os tridimensionais (modelos de sólidos). Os unidimensionais são aplicados a componentes cujo comprimento sobressai em relação à seção transversal, como barras de treliças, vigas e pórticos. Já os elementos bidimensionais são empregados em estruturas laminares — como chapas, placas e cascas —, dimensionadas pelas teorias de placa de Kirchhoff e Mindlin. Por fim, os elementos tridimensionais destinam-se a corpos de volume generalizado, nos quais nenhuma das três dimensões espaciais pode ser desprezada sem perda da fidelidade do

estado de tensões, utilizando tipicamente subdivisões em malhas hexaédricas ou tetraédricas. Desse modo, o dimensionamento e a obtenção de resultados fidedignos ao comportamento real do elemento sólido dependem intrinsecamente da escolha do tipo de elemento que permite a correta aplicabilidade computacional do modelo.

Principais Aplicações na Engenharia Civil

Entre as suas principais aplicações na Engenharia Civil, destaca-se a análise estrutural de vigas, pórticos, treliças, lajes, cascas e sólidos. Conforme Santos et al. (2016), o método é empregado para calcular deslocamentos, reações e esforços solicitantes em estruturas planas e tridimensionais. Esse procedimento consiste na análise matricial de uma etapa central para a montagem da matriz de rigidez global e para a obtenção da resposta estrutural. O estudo realizado por Paz et al. (2025), por meio da análise de uma viga em concreto armado, demonstra que o M.E.F. associado ao *software* de simulação Ansys permite comparar resultados numéricos com ensaios experimentais, reforçando sua utilidade na verificação do comportamento real das estruturas e no estudo da fissuração e do desempenho mecânico dos elementos estruturais. O M.E.F. também é empregado na simulação de estruturas de concreto armado e protendido, sobretudo quando se busca representar fenômenos não lineares do material. De acordo com Lazzari (2015), o método permite modelar a fissuração do concreto, a plasticidade do aço e do concreto, além de efeitos dependentes do tempo, como fluência e retração, contribuindo para análises mais próximas do comportamento real da estrutura. Esse tipo de modelagem é eficaz na verificação do desempenho de vigas, lajes e outros elementos estruturais, possibilitando comparar resultados numéricos com ensaios experimentais e avaliar, com maior precisão, o surgimento de fissuras, a redistribuição de tensões e a capacidade resistente do elemento.

A análise de estruturas metálicas de grande porte é outro exemplo de aplicação do Método dos Elementos Finitos na Engenharia Civil. Nesses casos, é feita uma verificação refinada do comportamento global da estrutura. É importante para estudos de estabilidade global e para a análise de flambagem, já que permite investigar modos de instabilidade e identificar regiões críticas sujeitas à perda de rigidez ou ao colapso estrutural. Em estruturas com grandes vãos, elevada esbelteza ou várias combinações de carregamento, o M.E.F. oferece uma base mais forte para a avaliação do comportamento global e, junto da análise do engenheiro projetista, pode prevenir deslocamentos excessivos, concentrações de tensões e possíveis falhas estruturais.

Outra forma importante de aplicação do método está na Geotecnia, principalmente na análise do solo e da interação solo-estrutura. Neste campo, o artigo de Pina Filho et al. (2025) mostra que também pode-se utilizar o Ansys para modelar o comportamento do terreno. Essa aplicação indica que o uso do método não é restrito apenas à análise estrutural, como também é possível sua implementação para avaliar problemas relacionados ao solo com maior nível de detalhes. Isso é significativo para obras como fundações, escavações e sistemas de contenção, pois a resposta do terreno influencia diretamente o desempenho da obra.

Ainda de acordo com Pina Filho *et al.* (2025), o Método dos Elementos Finitos se mostra importante tanto para a análise estrutural como para a análise geotécnica. É evidente também que o método é empregado tanto em análises estáticas quanto em situações mais complexas, como problemas não lineares, dinâmicos e experimentais, sempre com apoio de softwares computacionais que tornam viável a resolução de modelos mais realistas, como será exposto no tópico Ferramentas, desafios e perspectivas. Por isso, o M.E.F. ocupa posição central entre os métodos numéricos aplicados à Engenharia Civil, sendo uma ferramenta indispensável para análise, projeto e interpretação do comportamento das estruturas e dos solos.

Análise e Monitoramento de Pontes (Obras de Arte Especiais)

A aplicação do Método dos Elementos Finitos (M.E.F.) representa um grande avanço na análise e no dimensionamento de pontes e Obras de Arte Especiais (OAEs), superando as limitações dos métodos analíticos clássicos. O primeiro grande diferencial do M.E.F. está na modelagem de cargas móveis e efeitos dinâmicos. Diferentemente de edificações convencionais, o tabuleiro de uma ponte sofre com o posicionamento variável de veículos e trens. O método numérico permite a geração automatizada de linhas de influência e resolve equações de movimento no domínio do tempo para avaliar o impacto dinâmico. A eficácia dessa abordagem é atestada pela literatura: Baierle (2016) e Donin e Machado (2018), que demonstraram que formulações analíticas antigas (como Guyon-Massonnet) falham por superestimar esforços transversais. Resultados idênticos foram obtidos por Wanglon (2019), que, ao comparar o Método de Fauchart com o M.E.F., comprovou que a simulação numérica distribui as ações considerando a real rigidez do conjunto, otimizando materiais. Essa precisão torna-se ainda mais imperativa em projetos contemporâneos, visto que as pontes modernas frequentemente adotam tabuleiros mais flexíveis e um número reduzido de vigas transversais, cenários onde as simplificações

clássicas perdem a validade (Moura *et al.*, 2017).

À medida que os vãos a serem vencidos aumentam e tipologias especiais são adotadas, como em pontes estaiadas e pênséis, a análise esbarra no desafio da não linearidade geométrica. Nesses sistemas estruturais complexos, o comportamento dos cabos de sustentação é governado pelo efeito catenária e pela perda de rigidez à flexão, fazendo com que a rigidez axial do estai varie conforme ele se deforma. O M.E.F. equaciona essa questão por meio de processos iterativos que atualizam a matriz global de rigidez a cada incremento de carga (Lazzari, 2016). Além da geometria complexa dos estais, o método permite dimensionar tabuleiros com propriedades heterogêneas. Conforme investigado por Silva Neto (2021), em pontes vicinais de estrutura mista (concreto e madeira), a discretização do tabuleiro no M.E.F. viabiliza a simulação precisa da interação entre diferentes materiais, garantindo a previsão exata das tensões principais e das deflexões verticais sem o uso de aproximações empíricas.

Conjuntamente à complexidade da superestrutura, o projeto estrutural exige que as cargas sejam transferidas ao terreno de forma segura, o que introduz a necessidade de simular a Interação Solo-Estrutura (ISE). Na prática computacional moderna, a ponte deixou de ser calculada como uma entidade isolada apoiada em vínculos indeformáveis. Através do M.E.F., realiza-se uma análise conjunta em que a superestrutura é conectada aos pilares e às fundações profundas, estacas ou tubulões, imersas em um maciço de solo discretizado. Essa avaliação integrada é crucial para prever recalques diferenciais nas fundações que introduziriam momentos fletores adicionais severos na superestrutura hiperestática. A aplicação dessa modelagem integrada desde as etapas de pré-projeto, conforme aponta Amaro (2019), permite que o projetista mitigue as incertezas estruturais e geotécnicas antes mesmo da concepção final, reduzindo consideravelmente os riscos e custos da obra.

Por fim, a combinação de cargas dinâmicas operando sobre um sistema contínuo por décadas exige que o dimensionamento atenda rigorosamente à avaliação de fadiga e vida útil. Durante a fase de simulação computacional, o M.E.F. atua como a ferramenta primária para mapear zonas de concentração de tensões, com destaque para as ligações metálicas e as ancoragens de cabos de protensão. A partir do histórico de ciclos contínuos de tensão extraído do modelo virtual, o engenheiro aplica modelos de acúmulo de danos, como a regra de Palmgren-Miner, para atestar a resistência à fadiga. Além do desgaste operacional diário, o software permite verificar a resposta estrutural diante de eventos extremos excepcionais, submetendo o modelo virtual a abalos sísmicos e ventos de alta velocidade, a fim de atestar a estabilidade aerodinâmica

da ponte. Assim, o M.E.F. garante o dimensionamento seguro de pontes e OAE diante de todo o seu espectro de solicitações físicas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ferramentas, Desafios e Perspectivas

A consolidação do M.E.F. no mercado de engenharia civil viabilizou-se por meio da comercialização de robustos pacotes computacionais. Segundo Soriano (2019), o ambiente prático divide-se entre softwares de propósito geral, voltados para análises não lineares complexas e pesquisas avançadas, e soluções comerciais dedicadas ao fluxo diário de projetos. No cenário nacional, plataformas específicas, como o TQS, tornam-se fundamentais por integrarem rotinas de elementos finitos e modelos de grelha para lajes e pórticos espaciais, automatizando o dimensionamento estrutural e garantindo a conformidade direta com os critérios da ABNT.

A eficiência dessas análises numéricas, no entanto, é altamente dependente da qualidade geométrica do pré-processamento. A importação de desenhos de arquitetura e estruturas a partir de plataformas de Desenho Auxiliado por Computador (CAD), como o AutoCAD, frequentemente resulta em linhas sobrepostas e nós desconectados. A falha no tratamento prévio dessas geometrias gera malhas com elementos distorcidos (degenerados), o que compromete a matriz de rigidez global do modelo (MacLeod, 2005).

O acesso facilitado a interfaces gráficas introduz um dos maiores desafios na aplicação do M.E.F.: a "síndrome da caixa preta". MacLeod (2005) alerta que projetistas correm o risco de aceitar mapas coloridos de tensões e deformações sem o devido senso crítico ou validação analítica das condições de contorno. A National Agency for Finite Element Methods and Standards (Nafems, 2001) estabelece que a confiabilidade dos resultados está diretamente atrelada à realização de testes sistemáticos de convergência de malha, assegurando que o refinamento dos elementos não mascare concentrações de tensões irreais (singularidades).

Outro desafio urgente é a parametrização de infraestruturas com base em normativas estritas. Em obras de arte especiais e pavimentação, por exemplo, a simulação não deve considerar apenas as leis físicas fundamentais, mas também refletir os cadernos de encargos e manuais técnicos vigentes, como as especificações do DNIT (Departamento Nacional de

Infraestrutura de Transportes). A dificuldade recai em calibrar os modelos constitutivos não lineares de solos, pavimentos e concreto para que o ambiente virtual responda adequadamente aos limites de fadiga e deformação estipulados pelas normas oficiais (Yoder; Witczak, 1975).

A principal perspectiva para a superação das falhas de pré-processamento é a eliminação do desenho 2D no fluxo de análise em favor do Building Information Modeling (BIM). Sacks *et al.* (2018) demonstram que a extração da geometria analítica diretamente de modelos federados tridimensionais minimiza o retrabalho e a perda de dados. Ramaji *et al.* (2019) reforçam que algoritmos capazes de traduzir o modelo físico (arquitetura) para o modelo analítico (nós e elementos) com alta fidelidade representam o próximo salto produtivo do setor.

Além da interoperabilidade visual, a gestão maciça de dados gerados pelas simulações impulsiona o uso de planilhas avançadas (como Excel) e a linguagem de programação para automatizar o pós-processamento, facilitando a extração de envoltórias de esforços de milhares de combinações de carga.

No horizonte científico, a Inteligência Artificial promete redefinir os custos computacionais do método clássico. Karniadakis *et al.* (2021) apontam o desenvolvimento de Physics-Informed Neural Networks (PINNs), que utilizam o aprendizado de máquina para prever as respostas de tensão e deformação sem a necessidade da inversão de matrizes gigantescas. Paralelamente, modelos substitutos (surrogate models) vêm sendo treinados para auxiliar na definição automática de densidade de malha nas regiões críticas, antecipando o comportamento estrutural e reservando o processamento mecânico tradicional apenas para a verificação final de segurança (Brunton; Kutz, 2022).

CONCLUSÃO

A aplicação do Método dos Elementos Finitos (M.E.F.) tornou-se uma ferramenta indispensável para a análise estrutural e geotécnica na engenharia civil contemporânea. Conforme discutido ao longo deste trabalho, a transição de modelos físicos contínuos para formas discretas permitiu superar as limitações dos cálculos analíticos tradicionais, conferindo maior segurança e otimização ao projeto de Obras de Arte Especiais (OAEs), além de permitir uma análise refinada da interação solo-estrutura. O salto para o ambiente numérico não apenas refinou a distribuição de materiais, mas conferiu aos projetos a capacidade de prever respostas a carregamentos

variáveis e fenômenos não lineares, a exemplo da fissuração do concreto e da plastificação do aço, que fogem da previsibilidade das equações de equilíbrio clássicas.

Contudo, a facilidade de acesso a pacotes computacionais traz consigo o risco do uso desmedido dessas ferramentas sem o devido embasamento teórico, fenômeno frequentemente associado à interpretação superficial de resultados gerados por software — a chamada "síndrome da caixa preta". A literatura reforça que a geração automatizada de mapas de tensões não substitui o raciocínio crítico sobre o comportamento da estrutura. Resultados obtidos digitalmente, quando desprovidos de um entendimento claro dos princípios da mecânica, tendem a esconder falhas graves de modelagem. O M.E.F. é, em última análise, um recurso de alta precisão para validação, mas sua eficiência depende inteiramente do controle humano sobre as condições de contorno, a parametrização dos materiais e os testes de convergência da malha.

Olhando para o futuro, as tendências, como a interoperabilidade com o BIM e a automação do pré-processamento, prometem reduzir o retrabalho e otimizar o custo computacional em projetos complexos. Ainda assim, a evolução constante do método reforça uma máxima fundamental da engenharia: a tecnologia não exclui o rigor conceitual. Independentemente de quão sofisticados se tornem os algoritmos de simulação, a segurança e a durabilidade das estruturas civis continuarão sob a responsabilidade do engenheiro, cujo julgamento crítico deve ser o filtro final para validar se os resultados numéricos são, de fato, representativos da realidade física.

A conclusão de um artigo deve sintetizar os principais achados do estudo de forma sucinta, destacando as contribuições significativas para o campo de pesquisa. Deve reiterar os objetivos do estudo e resumir as descobertas mais importantes, enfatizando sua relevância e implicação prática ou teórica.

REFERÊNCIAS

AMARO VILELA, L. F. **Projeto estrutural de ponte em concreto armado via método dos elementos finitos**. 2018. 72 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campo Mourão, 2018.

BAIERLE, F. A. **Contribuições à análise de ponte empregando o Método dos Elementos Finitos**. 2016. 94 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC), Santa Cruz do Sul, 2016.

BRUNTON, S. L.; KUTZ, J. N. **Ciência e engenharia orientadas a dados**: aprendizado de máquina, sistemas dinâmicos e controle. 2. ed. LTC, 2022.

DONIN, C.; MACHADO, G. G. Análise de modelos para a distribuição de ações em ponte rodoviária dotada de múltiplas vigas utilizando método dos elementos finitos. **Engenharia Estudo e Pesquisa**, v. 18, n. 1, p. 34-41, jan./jun. 2018.

KARNIADAKIS, G. E. *et al.* Aprendizado de máquina informado pela física. **Nature Reviews Physics**, v. 3, n. 6, p. 422-440, maio 2021.

LAZZARI, B. M. **Análise por elementos finitos de peças de concreto armado e protendido sob estados planos de tensão**. 2015. 168 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2015.

LAZZARI, P. M. **Simulação numérica das etapas construtivas de pontes estaiadas através do método dos elementos finitos**. 2016. 301 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2016.

MACLEOD, I. A. **Análise estrutural moderna**: processo de modelagem e diretrizes. Rio de Janeiro: LTC, 2005.

MORAES, A. J. O método dos elementos finitos e a engenharia civil. **Revista Online IPOG Especialize**, Goiânia, v. 1, n. 10, p. 1-14, dez. 2015.

MOURA, M. W. *et al.* Comparação do Método de Fauchart e do Método dos Elementos Finitos na avaliação da distribuição de esforços transversais em pontes rodoviárias. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS**, nº 9, 2016, Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro: ABPE, 2016.

NAFEMS. **Como Realizar uma Análise de Elementos Finitos**. Glasgow: National Agency for Finite Element Methods and Standards, 2001.

NASCIMENTO, C. A. C. *et al.* Aplicações do cálculo numérico na engenharia civil – método dos elementos finitos na análise estrutural. **Revista Campo do Saber**, v. 4, n. 3, p. 6-18, abr. 2018.

PAZ, L. M.; COLFERAI, K. N.; LAZZARI, P. M. Análise de uma viga através do método dos elementos finitos e comparativo experimental. In: **SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS**, nº 5, 2025, Porto Alegre. Anais. Porto Alegre: ABPE, 2025.

PINA FILHO, A. P. *et al.* Aplicação do ANSYS no método de elementos finitos para análise de solo. **RECIEC – Revista Científica de Engenharia Civil**, Anápolis, v. 5, n. 1, p. 1-12, jan./jun. 2025.

RAMAJI, I. J.; MEMARI, A. M.; MESSNER, J. I. Aproveitamento de Modelos de Informação da Construção em IFC para Apoiar a Modelagem Analítica Estrutural. **Automation in Construction**, v. 98, p. 105-114, 2019.

SACKS, R. *et al.* **BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers.** 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2018.

SANTOS, M. S.; PELLEGRINO NETO, J. **Análise de estruturas pelo método dos elementos finitos.** 2016. 88 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, 2016.

SILVA NETO, M. A. J. **Análise de uma ponte vicinal com superestrutura constituída de concreto e madeira utilizando o método dos elementos finitos.** 2025. 20 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), Cajazeiras, 2025.

SORIANO, H. L. **Elementos finitos:** formulação e aplicação na estática e dinâmica das estruturas. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2009.

SORIANO, H. L. **Método dos Elementos Finitos em Análise de Estruturas.** Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2019.

YODER, E. J.; WITCZAK, M. W. **Principles of Pavement Design.** 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1975.