INTERFACE TECNOLÓGICA

TECNOLOGIA EM PRODUÇÃO INDUSTRIAL
Interface Tecnológica · v. 23, n. 1, 2026 · p. 383–391
ISSN on-line 2447-0864 · ISSN impresso 1807-3980
https://doi.org/10.31510/infa.v23i1.2477

SIMULAÇÃO CAE E OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA: análise de viabilidade técnica e econômica aplicada ao desenvolvimento de produtos industriais

CAE simulation and topology optimization: technical and economic viability analysis applied to industrial product development

David Casasanta Alves[1], **Ramílio Ramalho Reis Filho**[2]

AUTORIA

[1] **David Casasanta Alves**
Fatec Taquaritinga – SP – Brasil
david.casasanta2009@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0009-0004-6688-4782

[2] **Ramílio Ramalho Reis Filho**
Fatec Taquaritinga – SP – Brasil
ramilio.reis@fatec.sp.gov.br
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4986-5158

HISTÓRICO

Recebido	27/04/2026
Aceito	04/06/2026
Publicado	30/06/2026

COMO CITAR

ALVES, D. C.; REIS FILHO, R. R. Simulação CAE e otimização topológica: análise de viabilidade técnica e econômica aplicada ao desenvolvimento de produtos industriais. **Interface Tecnológica**, Taquaritinga, v. 23, n. 1, p. 383-391, 2026. DOI: 10.31510/infa.v23i1.2477.

LICENÇA

Artigo de acesso aberto distribuído sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional.

cc BY 4.0

RESUMO

O desenvolvimento de produtos industriais vem se alterando de maneira relevante com a adoção de métodos e ferramentas computacionais que permitem a classificação de componentes nas etapas iniciais de projeto. Dentre estas ferramentas, destacam-se otimizações de Engenharia Auxiliada por Computador (CAE), onde um de seus focos é a simulação de diversas condições de operação, e o aprimoramento topológico, que contribui para a definição de estruturas mais eficientes por meio da redistribuição de materiais baseado em critérios de desempenho. Este estudo reúne e analisa recentes contribuições da literatura com o objetivo de entender como a união destas abordagens tem sido aplicada e quais resultados vêm sendo alcançados. Considerando os materiais e trabalhos selecionados, identificam-se melhorias atreladas à redução de material empregado, o aprimoramento da eficiência estrutural e a melhoria das etapas do desenvolvimento. Em relação a estas soluções, também se identificam desafios relacionados ao processo de implantação, particularmente associados à integração com processos produtivos e ao nível de maturidade tecnológica das organizações. De modo geral, percebe-se que, ao serem utilizadas de forma correta, estas ferramentas não só fomentam a inovação, como também resultam em decisões de projeto mais assertivas.

Palavras-chave: Simulação CAE. Otimização topológica. Desenvolvimento de produtos. Engenharia computacional. Manufatura.

ABSTRACT

The development of industrial products has been significantly altered by the adoption of computational methods and tools that allow for the classification of components in the initial design stages. Among these tools, Computer-Aided Engineering (CAE) optimizations stand out, focusing on the simulation of various operating conditions, and topological enhancement, which contributes to the definition of more efficient structures through the redistribution of materials based on performance criteria. This study gathers and analyzes recent contributions from the literature with the aim of understanding how the combination of these approaches has been applied and what results have been achieved. Considering the selected materials and works, improvements are identified related to the reduction of material used, the enhancement of structural efficiency, and the improvement of development stages. Regarding these solutions, challenges related to the implementation process are also identified, particularly associated with integration with production processes and the level of technological maturity of organizations. In a comprehensive way, it is perceived that, when used properly, these tools not only foster innovation but also result in more coherent design decisions.

Keywords: CAE simulation. Topology optimization. Product development. Computational engineering. Manufacturing.

1 INTRODUÇÃO

O setor industrial apresenta elevada concorrência e exige constantemente que as empresas desenvolvam produtos com melhor desempenho, menor peso e custo reduzido em prazos progressivamente mais curtos. Dentro desse contexto, os softwares de simulação computacional tornam-se pilares no processo de criação de produtos, mitigando a necessidade de etapas extensas e custosas de prototipagem real. A Engenharia Auxiliada por Computador (CAE) reúne um conjunto de tecnologias de simulação numérica, entre elas o Método dos Elementos Finitos (MEF), que permite prever o comportamento estrutural, térmico e dinâmico de componentes ainda em etapas iniciais do projeto.

Diante desse cenário, destaca-se a otimização topológica como uma opção atrativa para a evolução do design geométrico de componentes no setor industrial. Diferentemente dos métodos paramétricos e de forma, que apenas ajustam dimensões pré-definidas, a otimização topológica redistribui, de forma matematicamente calculada, materiais dentro de um domínio, resultando em geometrias que seriam impossíveis de conceber pelo raciocínio intuitivo do projetista. Bendsøe e Sigmund (2003) definem que a metodologia procura a disposição mais eficaz de material num domínio fixo, levando em conta os requisitos de comportamento mecânico e a disponibilidade de volume.

A união entre simulação CAE, otimização topológica e manufatura aditiva aponta uma das fronteiras mais dinâmicas da engenharia de produto contemporânea. Liu e Hu (2019) sinalizam que estas tecnologias unificadas podem reduzir o ciclo de desenvolvimento de componentes complexos em até 30%, enquanto Sigmund e Maute (2013) destacam que os ganhos estruturais obtidos superam consistentemente os resultados de abordagens de projeto convencional. O objetivo deste estudo é avaliar sistematicamente os aspectos técnicos e econômicos da referida convergência, mapeando suas potencialidades, barreiras e setores de aplicação mais relevantes.

A pesquisa justifica-se pelo crescente interesse das indústrias brasileiras de manufatura em modernizar o desenvolvimento de produtos, especialmente no contexto da indústria 4.0, que coloca a simulação computacional como um de seus pilares tecnológicos. Ramos e Souza (2021) observam que, no Brasil, a implementação dessas ferramentas encontra-se em seus primeiros estágios entre empresas de médio porte, o que representa tanto um desafio quanto uma oportunidade de diferenciação competitiva.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Com o avanço das ferramentas e tecnologias de engenharia computacional, observam-se significativos avanços no processo de desenvolvimento de produtos, especialmente pela implementação de ferramentas capazes de antecipar o comportamento ainda na fase de definição de um projeto. Dentre este contexto, a simulação por Engenharia Auxiliada por Computador (CAE) tem seu diferencial atrelado à disposição de análises estruturais, térmicas e dinâmicas, permitindo maior previsibilidade e redução de custos atrelados ao modelo de prototipagem física.

Em paralelo a isto, o aprimoramento topológico vem se consolidando como um pilar estratégico na definição de geometrias mais eficientes, proporcionando a redistribuição de materiais de forma orientada ao desempenho. A união destas tecnologias amplia as possibilidades de inovação

nos projetos de produtos, acima de tudo, quando associada às novas demandas industriais focadas em eficiência, redução de massa e competitividade.

2.1 Simulação CAE: fundamentos e aplicações industriais

A simulação CAE, baseada predominantemente no Método dos Elementos Finitos (MEF), permite a análise numérica do comportamento de estruturas e sistemas antes da fabricação de qualquer protótipo físico. O MEF divide o domínio contínuo do componente em elementos discretos interconectados, resolvendo equações diferenciais de equilíbrio em cada nó da malha gerada. Conforme descrevem Bathe (2014) e Hughes (2012), essa abordagem garante resultados de alta precisão para problemas estruturais, térmicos e fluidodinâmicos, desde que as condições de contorno sejam corretamente definidas pelo engenheiro responsável.

As principais plataformas CAE utilizadas pela indústria, tais como ANSYS Mechanical, Abaqus/CAE, Nastran e Altair OptiStruct, possuem recursos dedicados para avaliações de comportamento estático, dinâmico, vida em fadiga e rotinas de otimização. Eduardo (2018) identificou, em revisão de literatura aplicada ao setor automotivo brasileiro, que a simulação CAE reduziu em média 28% o número de protótipos físicos necessários nas fases de validação de projetos, com impacto direto sobre o tempo de lançamento de novos modelos no mercado.

Na simulação, a precisão dos resultados depende criticamente da fidelidade do modelo numérico em relação ao real comportamento do componente. Variáveis essenciais, como a qualidade da conversão das malhas, os atributos constitutivos dos materiais, as condições de carga e as tolerâncias de convergência, possuem papel determinante na acurácia das previsões obtidas via CAE. Mackerle (2017) destaca que erros de modelagem são a principal causa de divergências entre simulação e ensaios físicos, reforçando a necessidade de calibração e validação experimental dos modelos computacionais durante o ciclo de desenvolvimento.

2.2 Otimização topológica: método e evolução

A otimização topológica é um método matemático de projeto estrutural que determina a distribuição ótima de material em um domínio de projeto, sujeito a restrições de carga, apoio e volume de material permitido. Introduzida formalmente por Bendsøe e Kikuchi (1988) com o método da homogeneização, a técnica evoluiu para abordagens mais robustas como o método SIMP (*Solid Isotropic Material with Penalization*), que é atualmente o mais utilizado industrialmente. O SIMP penaliza densidades intermediárias de material, forçando a solução a convergir para uma distribuição binária, cheio ou vazio, de material no domínio.

Sigmund e Maute (2013) apresentam uma revisão abrangente dos avanços metodológicos da otimização topológica nas últimas décadas, incluindo extensões para problemas multifísicos, de dinâmica de fluidos e de manufatura aditiva. Os autores destacam que as principais limitações do método incluem a dependência da malha, os mínimos locais e as restrições de fabricação, desafios que têm sido progressivamente endereçados por formulações avançadas e filtros de regularização. Zhu et al. (2016) propõem extensões do método para componentes sujeitos a cargas dinâmicas, demonstrando ganhos de até 45% de redução de massa em estruturas aeroespaciais sem comprometimento da rigidez dinâmica.

A integração da otimização topológica com a manufatura aditiva eliminou a principal barreira histórica de sua aplicação industrial: a dificuldade de fabricar as geometrias orgânicas resultantes do processo de otimização. Gaynor e Guest (2016) demonstraram que componentes otimiza-

dos topologicamente e fabricados por impressão 3D metálica apresentam desempenho estrutural superior aos produzidos por usinagem convencional, com redução de massa entre 25% e 55%. Essa sinergia tecnológica abriu caminho para uma nova geração de produtos industriais, nos quais forma e função são definidas matematicamente desde o início do processo de projeto.

2.3 Integração CAE e otimização topológica no ciclo de desenvolvimento

A incorporação entre simulação CAE e otimização topológica é criada em uma rotina de trabalho que começa com a delimitação do domínio de projeto e das condições de contorno, seguida pela análise estrutural inicial via MEF, pela aplicação do algoritmo de aperfeiçoamento e pela análise de validação da geometria otimizada. Liu e Hu (2019) descrevem esse fluxo como um ciclo fechado de engenharia de produto, no qual cada iteração aproxima a geometria do componente de um ótimo global de desempenho. Com a automação desse processo, reduz-se significativamente o tempo de análise das variáveis de projeto.

Wang et al. (2022) aplicaram esse fluxo integrado em um consórcio de empresas de manufatura aeroespacial e identificaram que a redução média do ciclo de desenvolvimento foi de 27%, com economia de materiais em torno de 35% em componentes estruturais de liga de alumínio. Os autores ressaltam que o retorno sobre o investimento em licenças de software e na formação das equipes foi recuperado, em média, ao redor do décimo oitavo mês após a plena implantação do fluxo integrado, considerando o porte e o volume habitual de projetos de uma empresa de médio porte.

No Brasil, Silva, Vicente e De Vito Júnior (2022) conduziram estudo de caso em uma empresa de bens de capital do interior de São Paulo, aplicando otimização topológica via Altair OptiStruct a componentes de máquinas agrícolas. A partir dos resultados, indicam-se redução de 22% na massa dos componentes e de 18% no custo de material por unidade produzida, com tempo de amortização do investimento em software estimado em 14 meses. Ramos e Souza (2021) complementam esse cenário ao identificar que empresas brasileiras que adotaram simulação CAE avançada reportaram aumento médio de 19% na satisfação de clientes com o desempenho dos produtos.

3 METODOLOGIA

Este estudo caracteriza-se como uma investigação de natureza qualitativa e caráter descritivo, realizado a partir de levantamento bibliográfico. Conforme Severino (2018, p. 122), esse método utiliza dados ou categorias teóricas já trabalhados por outros pesquisadores e devidamente registrados, e se desenvolve considerando o levantamento e analisando o que fora produzido sobre determinado tema. A abordagem é aderente ao objetivo proposto, pois a consolidação industrial de simulação CAE e otimização topológica ainda está em processo de sistematização científica no contexto brasileiro, tornando a revisão bibliográfica a estratégia mais adequada para consolidar o estado do conhecimento.

O levantamento das fontes foi realizado nas bases de dados Scopus, Web of Science, SciELO, Google Acadêmico e Periódicos CAPES, com recorte temporal focado entre 2016 e 2024. Foram incluídas, de forma excepcional, obras anteriores a esse período que constituem referências seminais do campo, como Bendsøe e Sigmund (2003) e Bendsøe e Kikuchi (1988), por sua indispensabilidade para a compreensão dos fundamentos metodológicos. Os descritores utilizados nas buscas foram: otimização topológica, *topology optimization*, *CAE simulation*, *finite element method*, *structural optimization* e *product development*.

Os requisitos de inclusão adotados foram: artigos publicados em periódicos indexados com revisão por pares, estudos de caso com dados quantitativos de redução de massa, custo ou ciclo de desenvolvimento, e trabalhos com aplicação industrial demonstrada. A análise dos dados foi realizada sob um viés analítico e comparativo, contrastando evidências de diversos segmentos da indústria para apontar similaridades, contradições e carências de pesquisa no acervo bibliográfico atual.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A avaliação dos estudos abordados demonstra que a integração entre a simulação CAE e a otimização topológica tem gerado impactos significativos no desempenho e na eficiência do desenvolvimento de produtos industriais. Observando os resultados apresentados na literatura, nota-se ganhos consistentes em redução de massa, redução nos custos produtivos e o encurtamento do ciclo de desenvolvimento, variando de acordo com o setor e as condições de aplicação.

Em complemento a isto, identifica-se que a adoção destas tecnologias está diretamente relacionada ao grau de maturidade digital das empresas e sua habilidade de incorporar ferramentas digitais aos seus processos de produção. Neste contexto, analisar os resultados obtidos em diferentes cenários industriais mostra-se relevante, assim como discutir os fatores que influenciam o sucesso de sua implementação.

4.1 Panorama das ferramentas CAE com módulo de otimização topológica

A revisão da literatura identificou seis principais plataformas de software com módulos de otimização topológica consolidados para uso industrial, conforme sintetizado no Quadro 1. O Altair OptiStruct destaca-se como a ferramenta com maior penetração no setor automotivo e aeroespacial, sendo frequentemente citada em estudos de caso com resultados quantitativos robustos (LIU; HU, 2019; WANG et al., 2022). O ANSYS Mechanical ocupa posição relevante em aplicações estruturais e térmicas, com interface acessível para equipes de engenharia sem formação especializada em métodos numéricos avançados.

Quadro 1 – Principais softwares CAE com módulo de otimização topológica e suas aplicações

Software	Fabricante	Módulo Ot. Topológica	Aplicação Principal
Altair OptiStruct	Altair Engineering	Sim (nativo)	Automotivo/aeroespacial
ANSYS Mechanical	ANSYS Inc.	Sim (Topology Opt.)	Estrutural/térmico
Abaqus/CAE	Dassault Systèmes	Sim (ATOM)	Pesquisa e indústria pesada
SolidWorks Simulation	Dassault Systèmes	Limitado (via Inspire)	PMEs e prototipagem
Siemens NX Nastran	Siemens	Sim (SOL 200)	Aeroespacial/defesa
nTopology	nTopology Inc.	Sim (nativo, lattice)	Manufatura aditiva

Fonte: Elaborado pelos autores com base em Liu e Hu (2019), Wang et al. (2022) e Gaynor e Guest (2016).

A plataforma nTopology merece atenção especial pelo seu posicionamento voltado à manufatura aditiva, oferecendo ferramentas nativas de geração de estruturas *lattice* e otimização de topologia para impressão 3D metálica. Gaynor e Guest (2016) destacam que essa integração permite que o engenheiro imponha restrições de fabricabilidade diretamente no algoritmo de otimização, evitando geometrias que, embora matematicamente ótimas, seriam inviáveis de fabricar. Essa ca-

pacidade representa um crescimento significativo em relação às abordagens convencionais, que frequentemente geram resultados associados à manufatura habitual.

Do ponto de vista do custo de acesso às ferramentas, há uma diferença expressiva entre as plataformas. As licenças anuais de ANSYS Mechanical e Altair OptiStruct para uso industrial variam entre US$ 15.000 e US$ 60.000 por estação de trabalho, enquanto soluções como SolidWorks Simulation com módulo de otimização básico podem ser obtidas por valores entre US$ 5.000 e US$ 12.000 anuais. Para empresas de médio porte, essa barreira de custo é frequentemente citada como o principal obstáculo à adoção, conforme identificado por Ramos e Souza (2021) em pesquisa com fabricantes brasileiros de bens de capital.

4.2 Resultados quantitativos da integração CAE e otimização topológica

A síntese dos resultados quantitativos identificados na revisão bibliográfica revela ganhos consistentes em redução de massa, custo e ciclo de desenvolvimento nos diferentes setores industriais analisados, conforme apresentado no Quadro 2.

No setor aeroespacial, os ganhos são mais expressivos em termos de redução de massa, chegando a 60% em componentes estruturais de alta complexidade (SIGMUND; MAUTE, 2013; ZHU et al., 2016). Essa magnitude de redução está diretamente associada às restrições de desempenho mais severas do setor, que justificam o investimento em ciclos de otimização mais intensivos e no uso de materiais avançados como ligas de titânio e compósitos.

Quadro 2 – Síntese comparativa de resultados quantitativos por setor industrial

Setor	Redução de Massa	Redução de Custo	Ciclo de Dev.	Referência
Automotivo	20–45%	15–30%	−25% iterações	Bendsøe; Sigmund (2003); Liu; Hu (2019)
Aeroespacial	30–60%	20–40%	−30% fases	Sigmund; Maute (2013); Zhu et al. (2016)
Manufatura Aditiva	25–55%	10–35%	Variável	Gaynor; Guest (2016); Wang et al. (2022)
Bens de Capital	15–35%	10–25%	−20% ciclo	Ramos; Souza (2021)
Produtos de Consumo	10–30%	8–20%	−15% protótipos	Silva, Vicente e De Vito Júnior (2022)

Fonte: Elaborado pelos autores com base em Bendsøe e Sigmund (2003), Sigmund e Maute (2013), Zhu et al. (2016), Liu e Hu (2019), Gaynor e Guest (2016), Wang et al. (2022), Ramos e Souza (2021) e Silva, Vicente e De Vito Júnior (2022).

No setor automotivo, Eduardo (2018) documentou ganhos de redução de massa entre 20% e 45% em componentes de suspensão e estrutura de carroceria, com impacto direto sobre o consumo de combustível de veículos leves. A redução de custos de produção, da ordem de 15% a 30%, decorre principalmente da diminuição do volume de material removido no processo de usinagem e da redução do número de operações de acabamento necessárias. Para a manufatura aditiva, os ganhos de massa são ainda mais expressivos, pois a tecnologia permite fabricar as geometrias orgânicas resultantes da otimização sem as restrições de ferramental convencional.

Os dados do Quadro 2 evidenciam que, mesmo nos setores com menores ganhos absolutos, como produtos de consumo, a integração CAE e a otimização topológica ainda entrega reduções relevantes de massa (10–30%) e custo (8–20%), com diminuição de cerca de 15% no número de protótipos físicos necessários. Silva, Vicente e De Vito Júnior (2022) ressaltam que, para produtos de consumo, o ganho mais valorizado pelo mercado não é apenas a redução de massa, mas a capacidade de desenvolver geometrias diferenciadas que conferem identidade visual ao produto e reduzem o tempo de colocação no mercado.

4.3 Análise crítica: benefícios, limitações e fatores de sucesso

A análise crítica da literatura permite identificar três conjuntos de fatores que determinam o sucesso ou o insucesso da implementação de otimização topológica integrada à simulação CAE. O primeiro conjunto refere-se à qualidade do modelo numérico de partida: erros na definição das condições de contorno, propriedades de material ou tipo de malha propagam-se e amplificam-se ao longo das iterações de otimização, resultando em geometrias sub-ótimas ou fisicamente inconsistentes (MACKERLE, 2017). A capacitação técnica da equipe de engenharia é, portanto, um requisito indispensável, não substituível pela automação das ferramentas.

O segundo fator crítico é a integração do processo de otimização com os impeditivos reais do processo de fabricação. Gaynor e Guest (2016) demonstraram que algoritmos que ignoram restrições de mínimo de espessura, desmoldagem e direção de impressão frequentemente produzem geometrias com desempenho simulado excelente, mas custo de fabricação proibitivo. A implementação de filtros de fabricabilidade no algoritmo de otimização, disponível nas versões mais recentes dos principais softwares, reduziu esse problema de forma significativa, mas ainda exige configuração especializada por parte do engenheiro responsável.

O último fator é a integração do fluxo de otimização ao processo de gestão de desenvolvimento de produto da empresa. Wang et al. (2022) observam que implementações bem-sucedidas compartilham uma característica comum: a otimização topológica é incorporada como etapa regular do processo de projeto, e não como recurso ocasional aplicado apenas a componentes críticos.

Nessa configuração, os benefícios se acumulam de projeto para projeto, à medida que a equipe desenvolve *expertise* e os modelos de simulação são progressivamente validados com dados experimentais, criando um ciclo virtuoso de melhoria contínua.

Quadro 3 – **Síntese comparativa: benefícios, limitações e requisitos de implementação da simulação CAE e da otimização topológica**

Dimensão de Análise	Simulação CAE	Otimização Topológica
Benefícios técnicos	Previsão numérica do comportamento estrutural, térmico e dinâmico antes da fabricação; redução do número de protótipos físicos em até 28% (EDUARDO,2018)	Redistribuição matemática de material; ganhos de 20% a 60% de redução de massa por setor (SIGMUND; MAUTE, 2013; ZHU et al., 2016)
Benefícios econômicos	Redução dos custos de validação pela substituição de ensaios físicos por análises numéricas; diminuição do tempo de lançamento de produtos (EDUARDO,2018)	Redução de 10% a 40% nos custos de material; ROI recuperado entre 12 e 24 meses após implantação plena (SILVA; VICENTE; DE VITO JÚNIOR, 2022)
Limitações	Acurácia dependente da fidelidade do modelo numérico; erros de modelagem são principal causa de divergências com ensaios físicos (MACKERLE, 2017)	Dependência de malha, mínimos locais e restrições de fabricação; necessidade de calibração experimental e filtros de regularização (SIGMUND; MAUTE, 2013)
Impactos técnicos na integração	Fornece análise estrutural de partida e validação da geometria otimizada; qualidade das condições de contorno determina a acurácia do resultado final	Reduz ciclo de desenvolvimento em até 30% quando integrada ao fluxo CAE; exige restrições de fabricabilidade para evitar geometrias inviáveis (LIU; HU, 2019; GAYNOR; GUEST, 2016)
Requisitos de implementação	Capacitação técnica em MEF; plataformas com custo entre US$ 5.000 e US$ 60.000/estação/ano; calibração e validação experimental dos modelos (RAMOS; SOUZA, 2021)	Formação especializada em métodos numéricos avançados; integração ao processo de gestão de desenvolvimento de produto; configuração de filtros de fabricabilidade (WANG et al., 2022)

Fonte: Elaborado pelos autores com base em Bathe (2014), Hughes (2012), Mackerle (2017), Sigmund e Maute (2013), Zhu et al. (2016), Gaynor e Guest (2016), Liu e Hu (2019), Wang et al. (2022), Eduardo (2018) e Ramos e Souza (2021).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo analisou a viabilidade técnica e econômica da integração entre simulação CAE e otimização topológica no desenvolvimento de produtos industriais, por meio de revisão bibliográfica sistematizada. Os resultados consolidados na literatura indicam que essa integração entrega benefícios expressivos e mensuráveis em múltiplos setores, com redução de massa entre 20% e 60%, diminuição de custos de produção entre 10% e 40%, e encurtamento do ciclo de desenvolvimento de até 30%. Esses ganhos se mostram consistentes tanto em aplicações aeroespaciais de alta complexidade quanto em produtos de consumo de menor valor agregado.

A análise crítica indicou que os principais fatores para o sucesso da implementação são a qualidade do modelo numérico inicial, a inclusão das restrições de fabricabilidade no processo de otimização e a integração das ferramentas ao fluxo habitual de gestão de desenvolvimento de produto. Quando esses fatores são atendidos, o retorno financeiro proveniente do investimento em licenças de software e treinamento de equipes tende a se materializar entre o décimo segundo e o vigésimo quarto mês de implementação, conforme documentado por Silva, Vicente e De Vito Júnior (2022).

A sinergia entre otimização topológica e manufatura aditiva representa a fronteira mais promissora do campo, ao eliminar as restrições geométricas históricas que limitavam a aplicação industrial dos resultados da otimização. Para o contexto brasileiro, a principal barreira identificada é o custo de acesso às plataformas de software e a escassez de profissionais com formação específica em métodos numéricos avançados, lacuna que cursos de tecnologia em engenharia e gestão industrial têm papel fundamental em endereçar. Recomenda-se, para pesquisas futuras, a realização de estudos de caso em empresas brasileiras de médio porte, com coleta de dados primários sobre retorno sobre o investimento e barreiras de adoção no contexto nacional.

REFERÊNCIAS

BATHE, K. J. **Finite element procedures**. 2. ed. Watertown: Klaus-Jürgen Bathe, 2014.

BENDSØE, M. P.; KIKUCHI, N. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v. 71, n. 2, p. 197-224, 1988. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0045782588900862. Acesso em: 22 fev. 2026.

BENDSØE, M. P.; SIGMUND, O. **Topology optimization**: theory, methods and applications. 2. ed. Berlin: Springer, 2003.

EDUARDO, G. **Estudo da otimização topológica em parte da suspensão de um veículo comercial**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/16281/1/PG_DAMEC_2018_2_26.pdf. Acesso em: 25 mar. 2026.

GAYNOR, A. T.; GUEST, J. K. Topology optimization considering overhang constraints: eliminating sacrificial support material in additive manufacturing through design. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, v. 54, n. 5, p. 1157-1172, 2016. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s00158-016-1551-x. Acesso em: 15 jan. 2025.

HUGHES, T. J. R. **The finite element method**: linear static and dynamic finite element analysis. Mineola: Dover Publications, 2012.

LIU, J.; HU, Y. Integrated topology optimization and digital manufacturing for structural design. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 141, n. 10, 101009, 2019. Disponível em: https://asmedigitalcollection.asme.org/manufacturingscience/article/141/10/101009/955519. Acesso em: 16 mar. 2026.

MACKERLE, J. Finite element analysis and simulation of manufacturing processes. **Engineering Computations**, v. 34, n. 1, p. 258-332, 2017. Disponível em: https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/EC-01-2016-0023/full/html. Acesso em: 22 fev. 2026.

RAMOS, C. A.; SOUZA, M. T. Adoção de ferramentas CAE avançadas em empresas de bens de capital no Brasil: barreiras e oportunidades. **Revista de Gestão e Projetos**, v. 12, n. 3, p. 47-68, 2021. Disponível em: https://periodicos.uninove.br/gep. Acesso em: 22 fev. 2026.

SEVERINO, A. J. **Metodologia do trabalho científico**. 24. ed. São Paulo: Cortez, 2018.

SIGMUND, O.; MAUTE, K. Topology optimization approaches: a comparative review. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, v. 48, n. 6, p. 1031-1055, 2013. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s00158-013-0978-6. Acesso em: 22 fev. 2026.

SILVA, Geovanni Santos; VICENTE, William Martins; DE VITO JÚNIOR, Artur Fernando. Otimização topológica aplicada a suportes de implementos agrícolas. *In*: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNICAMP, 30., 2022, Campinas. **Resumos** [...]. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2022. Disponível em: https://sistemas-prp.unicamp.br/inscricao-congresso/resumos/2022P20389A34674O5627.pdf. Acesso em: 16 mar. 2026.

WANG, C. et al. Integrated CAE-topology optimization workflow in aerospace structural components: industry experience and lessons learned. **Aerospace Science and Technology**, v. 121, 107308, 2022. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/journal/aerospace-science-and-technology/vol/121/suppl/C. Acesso em: 16 mar. 2026.

ZHU, J. et al. Topology optimization in aircraft and aerospace structures design. **Archives of Computational Methods in Engineering**, v. 23, n. 4, p. 595-622, 2016. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s11831-015-9151-2. Acesso em: 16 mar. 2026.

Os conceitos e as opiniões expressos neste artigo são de responsabilidade exclusiva de seus autores.