Otimização topológica em estruturas de concreto: **avanços tecnológicos e benefícios ambientais**

MATHEUS BARBOSA MOREIRA CEDRIM – DR. PROF. – https://orcid.org/0000-0002-4731-1549 (matheuscedrim@hotmail.com) — **CESMAC**
EDUARDO NOBRE LAGES – DR. PROF. – https://orcid.org/0000-0001-6704-4057 — **UFAL**
ALINE DA SILVA RAMOS BARBOZA – DRª. PROFª. – https://orcid.org/0000-0001-6296-927X — **UFAL**

RESUMO

A otimização topológica (OT) é uma técnica numérica que busca distribuir material de maneira eficiente para maximizar o desempenho estrutural. Este estudo explora os benefícios da OT em elementos de concreto, considerando que o material contribui com cerca de 8% das emissões globais de CO_2. Utilizando o método SIMP (*Solid Isotropic Material with Penalization*), são avaliadas numericamente vigas de concreto reforçado com fibras de aço. Os resultados apontam até 50% de economia no volume de concreto e ganhos de desempenho mecânico e ductilidade devido às fibras, resultando em maior sustentabilidade pela redução de cerca de 300 kg de emissões indiretas de carbono por metro cúbico de concreto. Destaca-se o potencial da integração entre OT e tecnologias digitais, como impressão 3D e BIM, para viabilizar o material estudado em geometrias complexas e inovações construtivas. Contudo, ressalta-se a necessidade de normativas específicas e protocolos de validação experimental. Conclui-se que a OT é uma abordagem viável para promover sustentabilidade na construção civil.

Palavras-chave: concreto com fibras de aço, SIMP, economia circular.

1. INTRODUÇÃO

O setor da construção civil é responsável por aproximadamente 40% do consumo global de recursos naturais e por cerca de 30% das emissões globais de dióxido de carbono (CO_2) [1]. Dentro desse contexto, o concreto, principal insumo utilizado na construção, representa cerca de 8% dessas emissões [2], sendo a etapa de produção do cimento Portland, principal componente para a produção de concreto, o maior fator contribuinte devido à intensa liberação de carbono inerente ao processo de calcinação do clínquer. Diante desse cenário, a busca por estratégias sustentáveis tornou-se urgente, especialmente aquelas que combinem eficiência estrutural e redução de impactos ambientais.

A otimização topológica (OT) é uma poderosa ferramenta computacional que auxilia os projetistas na determinação de configurações estruturais eficientes. Na engenharia civil, a maioria das aplicações da técnica ainda está limitada no campo da análise teórica/computacional e, geralmente, considera o comportamento elástico linear dos materiais. Esta limitação restringe o escopo e a aplicação dos conceitos de otimização topológica para problemas práticos.

Apesar de o potencial da OT, sua aplicação em estruturas de concreto ainda enfrenta desafios, como a resistência cultural a geometrias não convencionais e à escassez de estudos que quantifiquem seus benefícios ambientais de forma sistêmica [3]. Grande parte das pesquisas existentes foca em desempenho mecânico [4, 5], deixando lacunas sobre como a técnica pode contribuir para metas de descarbonização e economia circular na construção, especialmente em países em desenvolvimento, onde o custo do concreto é baixo, mas seu impacto socioambiental é alto.

Nos últimos anos, houve um aumento no uso de materiais heterogêneos de alta performance, tais como: compósitos reforçados por fibras, materiais cimentícios e materiais com fabricação auxiliada pela impressão 3D (Figura 1) [6, 7]. As características físicas e mecânicas de materiais heterogêneos complexos podem ser determinadas pela composição dos seus constituintes; entretanto, pode haver uma drástica mudança nas propriedades do compósito devido à fração volumétrica das inclusões, à sua forma geométrica e à presença de interfaces.

FIGURA 1
Longarina de concreto produzida com auxílio da impressão 3D
Fonte: Vantyghem *et al.* (2020)

Com o objetivo de implementar

estratégias mais eficientes, os avanços na tecnologia dos materiais e os processos de manufatura são alternativas para a sustentabilidade. Existem diversas estratégias para reduzir o uso de cimento em estruturas de concreto enquanto o desempenho mecânico é preservado [5]. Por exemplo, a otimização estrutural enquanto ferramenta matemática pode proporcionar projetos de estruturas mais leves e de elevada resistência.

Da literatura, observa-se que há uma extensa área de pesquisa que enfatiza a OT com material isotrópico e de comportamento elástico linear [4]. Entretanto, há poucos estudos que detalhem as comparações entre o comportamento linear e não linear do material, o que se torna uma lacuna para a análise de resultados e para o campo de aplicação em estruturas.

Nesse contexto, o presente trabalho explora os benefícios da OT, alinhados aos processos de manufatura e à descarbonização da indústria do cimento Portland, em análises numéricas para projetos de vigas de concreto reforçado com fibras de aço, por ser este elemento estrutural representativo para o estudo da flexão, ou seja, comportamento sob tensões normais de tração e compressão.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

A OT representa uma mudança de paradigma no projeto de estruturas de concreto. Ao invés de partir de formas geométricas convencionais, utilizam-se algoritmos matemáticos para distribuir material apenas onde um comportamento estrutural é necessário. Essa abordagem, inspirada em processos naturais como o crescimento ósseo, permite economias de material que variam entre 25% e 50% [8]. O impacto ambiental dessas reduções é significativo, considerando que cada metro cúbico de concreto poupado representa cerca de 300 kg de CO_2 não emitidos na produção do cimento [9]. Adicionalmente, estruturas otimizadas exigem fundações com menores dimensões, cortando emissões indiretas de carbono.

Os avanços computacionais dos últimos anos foram cruciais para viabilizar a OT na prática. Algoritmos como o SIMP (*Solid Isotropic Material with Penalization*) e o BESO (*Bidirectional Evolutionary Structural Optimization*) tornaram-se ferramentas poderosas para engenheiros estruturais [10]. Essa eficiência na distribuição de material tem implicações diretas na sustentabilidade, diminuindo não apenas o consumo de concreto, mas também a demanda por transporte e potência em equipamentos de construção.

Com o avanço das técnicas de impressão 3D e dos processos de manufatura aditiva, tornou-se possível fabricar diretamente materiais projetados a partir de um arquivo numérico, possibilitando a abertura de rotinas para novos projetos [6]. Não é exagero ressaltar que a manufatura aditiva e a otimização topológica são uma ótima combinação. No campo das pesquisas, ainda é necessário um estudo sistemático e compreensivo do projeto de estruturas com auxílio da otimização topológica para as aplicações de engenharia.

Além disso, a otimização está alinhada com os princípios do uso eficiente e responsável dos recursos, buscando minimizar o desperdício ao longo de todo o ciclo de vida das estruturas [5]. Estudos teóricos indicam que as técnicas de otimização podem contribuir significativamente para reduzir impactos desde a extração de matérias-primas até as etapas de operação e manutenção [11]. Isso demonstra que a OT não é apenas uma solução de engenharia, mas também uma estratégia de sustentabilidade aplicada à construção civil.

A aplicação da OT com materiais sustentáveis abre novas fronteiras para a construção ecológica [12]. Pesquisas recentes sugerem que concretos com substituição parcial de cimento por pozolanas ou com agregados reciclados podem ser um bom caminho para associar modelos construtivos baseados no reaproveitamento de materiais e na redução de resíduos [13, 14].

A integração de tecnologias digitais, como o BIM, amplia o potencial sustentável do concreto ao permitir projetos com menor consumo de materiais e geometrias eficientes [15]. Quando combinadas a práticas de economia circular, essas abordagens podem transformar o concreto em um material alinhado aos princípios de neutralidade carbônica, conforme defendido por iniciativas como o *Roadmap Net Zero* da indústria do cimento [1, 2].

Nesse contexto de busca por soluções mais sustentáveis e eficientes para a construção civil, o concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) tem ganhado destaque por sua maior resistência à fissuração, tenacidade e ductilidade em comparação ao concreto convencional. As fibras atuam como armadura descontínua, distribuindo tensões e reduzindo a propagação de fissuras, o que é especialmente vantajoso em elementos estruturais sujeitos a cargas dinâmicas, como pisos industriais e túneis [16].

A combinação do CRFA com OT permite criar estruturas com geometrias leves e eficientes, onde as fibras

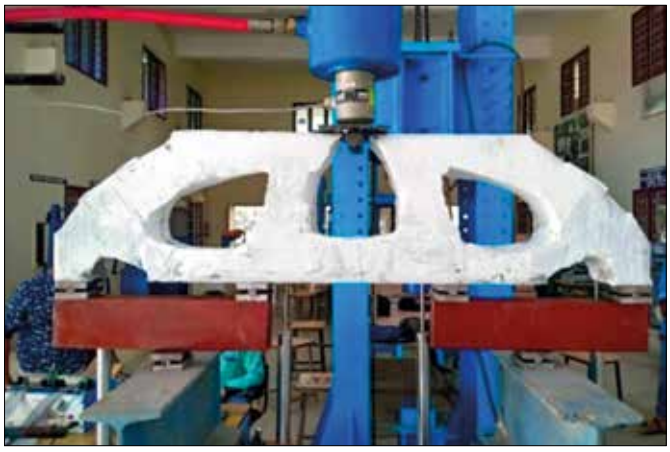

FIGURA 2
Ensaio de flexão para viga otimizada
Fonte: Jaishankar *et al.* (2021)

compensam a redução de massa sem perder resistência. Já a impressão 3D de concreto com fibras (3DCP) abre possibilidades para formas livres e personalizadas, eliminando a necessidade de fôrmas e reduzindo desperdícios. Com um maior controle de qualidade do compósito, um volume de 5% de fibras de aço lisas e retas dispostas na direção da solicitação de tração pode incrementar em até 130% a resistência, enquanto o mesmo volume na direção aleatória apresenta um ganho de 60% [17].

Em uma aplicação da otimização topológica para o projeto de uma viga "cabeça de martelo" (Figura 2) [18], concluiu-se que para o concreto com fibras, o teor de fibras influenciou consideravelmente o aumento da capacidade resistente à flexão. Este fenômeno é atribuído ao efeito de transferência de tensões proporcionado pelo reforço com as fibras, que também confere maior ductilidade. Para a fabricação dos elementos, com o pós-processamento verificado no processo de otimização, os autores consideraram a confecção das vigas por meio de duas etapas, considerando-se inicialmente a mistura de fibras e agregados graúdos, e, posteriormente, a adição de pasta com agregados miúdos.

O conceito do projeto auxiliado por otimização (PAO) é definido pelo projeto e dimensionamento de estruturas e elementos estruturais por meio de métodos de otimização [19]. Por exemplo, para o concreto armado, este conceito abrange a descoberta da melhor forma, a identificação da disposição das armaduras e o uso de seções transversais adequadas (Figura 3). Esta linha de pesquisa propõe uma metodologia de caráter geral, aplicável a distintas áreas de aplicação. Pode-se utilizar este recurso para qualquer tipo de concreto (de resistência normal a ultra alta resistência), além de tipos arbitrários de reforço (aço, carbono e fibras), bem como se pode estender para inúmeros campos da engenharia estrutural, como estruturas de aço, madeira e fundações.

O PAO utiliza o conceito da otimização matemática. Com isto, geralmente, o objetivo é minimizar a função objetivo

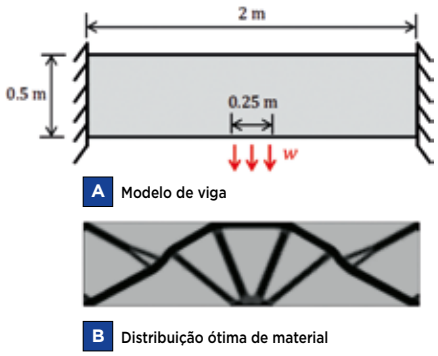

FIGURA 3
EXEMPLO DE OTIMIZAÇÃO DE UMA VIGA
FONTE: AUTORES (2025)

formulada. Esta pode ser relacionada ao peso da estrutura, à quantidade de reforço ou até mesmo à combinação de diversas funções [19]. Conceitualmente, tem-se a seguinte abordagem: buscar soluções de projeto em que se garante a utilização das tensões de forma eficiente e acumular material apenas onde ele é mais efetivo como mecanismo de transferência de carregamento.

A maioria das técnicas de otimização topológica baseia-se na hipótese do modelo constitutivo de material elástico linear. Entretanto, por exemplo, para as estruturas de concreto, identifica-se, em geral, um comportamento profundamente não linear, incluindo efeitos como fissuração, fluência e retração. Com isto, torna-se um desafio otimizar realisticamente este tipo de material [4].

Apesar de os avanços na OT e sua integração com materiais compósitos e técnicas de fabricação digital, ainda persistem lacunas significativas na literatura, sobretudo no que se refere a modelos não lineares e à validação experimental de geometrias otimizadas em escala real. Ademais, observa-se uma carência de estudos sistemáticos que quantifiquem os ganhos ambientais dessa abordagem ao longo de todo o ciclo de vida.

3. METODOLOGIA

O método numérico de otimização topológica baseado em elementos finitos mais conhecido é o método SIMP, que foi desenvolvido na década de 80 [20, 21]. O termo SIMP significa *Solid Isotropic Material with Penalization*. Algumas vezes, o método também é chamado de interpolação material, material artificial, lei de potência ou método da densidade, mas SIMP é a nomenclatura mais utilizada mundialmente. O software ABAQUS® 2019 foi utilizado neste trabalho por permitir uma análise integrada em elementos finitos e realização dos processos de otimização.

Na formulação discreta do problema, minimizando a energia de deformação, tem-se a equação 1:

$$[1] \quad \min c(\boldsymbol{x}) = \boldsymbol{U}^T \boldsymbol{K} \boldsymbol{U} = \sum_{e=1}^{N} (x_e)^p \boldsymbol{u}_e^T \boldsymbol{k}_e \boldsymbol{u}_e$$
$$\text{s.t. } V(\boldsymbol{x}) = f\, V_0$$
$$0 < x_{min} \leq x_e \leq 1$$

Em que:
U e **F** são os vetores de deslocamento e força globais, respectivamente;
K é a matriz de rigidez global:
u_e e k_e são o vetor de deslocamento do elemento e a matriz de rigidez do elemento, respectivamente;
x é o vetor das variáveis de projeto;
x_{min} é a mínima densidade relativa (diferente de zero para evitar singularidade):
N é o número de elementos utilizados para discretizar o domínio:
p é o fator de penalidade;
V(**x**) e V_0 são o volume de material e o volume do domínio de projeto, respectivamente, e;
f é a fração volumétrica prescrita.

Com a formulação do método, as variáveis de projeto definidas no problema são as densidades relativas

TABELA 1
PARÂMETROS DA OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA

Parâmetros do método SIMP	Valor
Densidade mínima (ρ_{min})	0,001
Densidade máxima (ρ_{max})	1
Mudança máxima da densidade por ciclo de projeto	0,25
Fator de penalidade (p)	3
Tolerância máxima para a função objetivo	0,001
Tolerância máxima para a densidade do elemento	0,005

FONTE: AUTORES (2025)

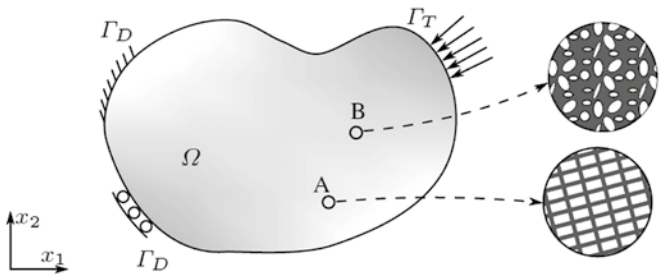

FIGURA 4
Representação de uma estrutura multiescala
Fonte: Wu, Sigmund e Groen (2021)

relacionadas com os elementos finitos ou nós da malha. O objetivo do problema de minimização da flexibilidade ou maximização da rigidez pode ser entendido, então, como um processo iterativo que busca uma melhor distribuição das variáveis de projeto pela malha definida.

Para o processo de otimização no ABAQUS®, a região de aplicação da carga não é considerada. A estratégia de atualização de densidade é do tipo normal. O algoritmo de solução é geral, o filtro de sensibilidade é definido automaticamente de acordo com a dimensão característica da malha, e a técnica de interpolação de material utilizada é o SIMP. Os demais detalhes estão listados na Tabela 1.

O fator de penalidade (p) é um parâmetro importante para evitar instabilidades numéricas. O valor de p pode ser aumentado gradualmente de 1 até 4, o que auxilia na convergência [21]. No entanto, nesse estudo, esta variável é considerada constante durante todo o procedimento de otimização.

O método SIMP, apesar de considerar em sua formulação um material homogêneo e isotrópico, pode ser interpretado como uma aproximação multiescala [22]. Baseado nisto, uma distribuição de material heterogêneo dentro do domínio do elemento pode ser encontrada para densidades intermediárias.

Com um parâmetro do fator de penalidade (p) maior que 3, pode-se convergir para soluções do tipo 0-1, que representaram as estruturas monoescala. Todavia, em um número de abordagem multiescala, quanto menor o p, maior será a quantidade de soluções contendo uma porção de densidades intermediárias, o que propicia uma base para as microestruturas porosas (Figura 4).

Diversos estudos foram desenvolvidos para a elaboração de códigos educacionais para resolver problemas específicos de projeto, tais como: a consideração de múltiplas escalas, problemas multifísicos, abordagem com múltiplos materiais, análise de confiabilidade, critérios de flambagem, restrição em tensões (ou definição como função objetivo), não linearidades físicas e/ou geométricas, controle geométrico local e análise dinâmica [10].

Destaca-se que há um esforço recente para a pesquisa e desenvolvimento de aplicações da otimização topológica para multimateriais (mais de um material considerado no domínio, podendo ter comportamentos mecânicos distintos), o que torna um caminho aberto para projetos aplicáveis para problemas práticos de engenharia [10].

TABELA 2
Propriedades mecânicas do CRFA

Características do CRFA							
f_{cm} (MPa)	v_f	E (MPa)	υ	c (MPa)	ϕ (º)	f_{r1k}/f_{lk} (MPa)	f_{r3k}/f_{r1k} (MPa)
30	0,5%	30832,63	0,2	5,18	56,15	0,82	1,70
50	1,5%	39300,04	0,2	8,54	59,22	1,50	1,41

Fonte: Autores (2025)

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Em um estudo numérico com o modelo de Drucker-Prager, que considera o comportamento elastoplástico do material para diferentes teores de fibra (v_f), a otimização topológica foi aplicada a vigas biengastadas de concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) utilizando o método SIMP, com restrição de 50% da fração volumétrica, com o objetivo de avaliar seu comportamento estrutural após o processo de otimização [23]. As vigas possuem comprimento de 5,0 m e seção transversal com largura de 20 cm e altura de 50 cm. O carregamento aplicado é de 60 kN/m uniformemente distribuído no topo. Propriedades como a resistência média à compressão (f_{cm}), o módulo de elasticidade (E), coeficiente de Poisson (υ), coesão (c), ângulo de atrito (ϕ) e as relações entre as resistências para aplicações estruturais [24] são apresentadas na Tabela 2.

A dimensão característica da malha de elementos em estado plano de tensão é de 60 mm. Com as superfícies extraídas na etapa de pós-processamento, considerando valores de densidade acima de e utilizando uma técnica de filtragem moderada, procede-se à análise do comportamento estrutural das topologias ótimas.

As etapas dos ciclos de otimização são observadas na Figura 5. Com o

TABELA 3
Parâmetros quantitativos por ciclo de otimização

Etapa	Volume da viga (m^3)	Redução na emissão de CO_2 (kg)
Ciclo de otimização 0	0,500	-
Ciclo de otimização 5	0,431	20,78
Ciclo de otimização 10	0,413	26,20
Ciclo de otimização 15	0,365	40,44
Ciclo de otimização 20	0,322	47,67
Ciclo de otimização 25	0,322	53,54
Ciclo de otimização 30	0,320	54,00

Fonte: Autores (2025)

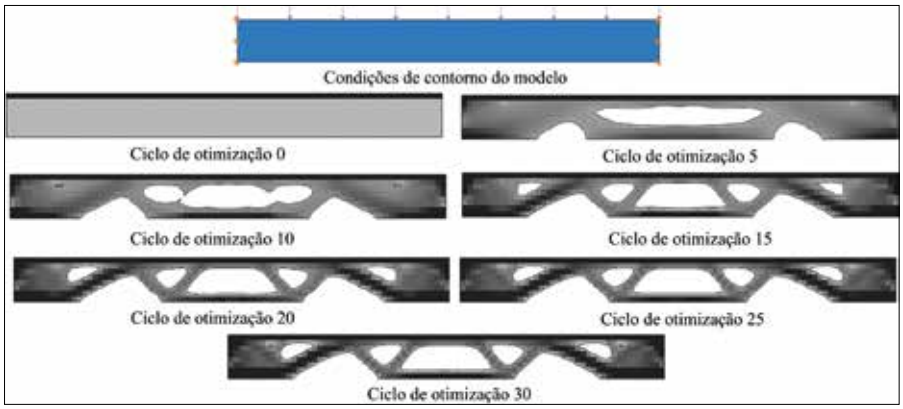

FIGURA 5
Resultados da otimização topológica
Fonte: Autores (2025)

modelo original, antes do procedimento de otimização, a viga possuía um volume de 0,5 m³. A Tabela 3 sintetiza a redução das emissões de dióxido de carbono, em kg, para cada ciclo de otimização. Os volumes foram calculados, por etapa, em relação à distribuição de material ($\rho > 0,25$) nos centroides dos elementos da malha. A diminuição dos volumes observada é um resultado direto da economia de concreto, demonstrando um impacto positivo direto e mensurável na pegada de carbono do projeto.

Após a extração das superfícies, encontram-se os novos volumes em função da resistência do CRFA, que variam de 70% a 75% do volume de referência, em função dos valores de densidade e filtragem adotados [23]. As simulações computacionais permitiram uma análise das deformações plásticas e dos deslocamentos verticais, com o intuito de validar as hipóteses numéricas para as referências de projeto.

O panorama das deformações plásticas pode ser descrito por meio da Figura 6, em que as regiões em azul indicam deformação nula, e, em progressão para o vermelho, identificam-se as maiores deformações. Para concretos de menor resistência (a) f_{cm} = 30 MPa e v_f = 0,5%, as maiores deformações concentraram-se na região central da viga, enquanto em concretos de maior resistência (b) f_{cm} = 50 MPa e v_f = 1,5%, as deformações máximas deslocaram-se para as proximidades dos apoios. Em todos os casos, garante-se que as deformações máximas são menores que a deformação última do CRFA de 10‰.

Os dados obtidos para os deslocamentos verticais (f_{cm} = 30 MPa e v_f = 0,5%) fornecem subsídios relevantes para a compreensão dos efeitos da redistribuição de material em elementos de CRFA, além de servir como indicador de potenciais melhorias no desempenho estrutural e na eficiência do uso de materiais (Figura 7). Na escala de cores, verifica-se o maior deslocamento na região em azul.

As respostas numéricas encontradas por meio da abordagem apresentada podem auxiliar os projetistas no processo de decisão para soluções otimizadas, visto que a distribuição de material é encontrada por um critério matemático rigoroso, possibilitando uma redução de tempo em relação a testes físicos [23]. Na análise específica para o CRFA, as propostas de superfícies otimizadas podem servir como um indicativo de regiões preferenciais de distribuição das fibras.

Apesar de a otimização topológica ser uma ferramenta de apoio ao processo de decisão em projetos de concreto reforçado com fibras de aço, é recomendado que as verificações normativas sejam efetuadas, pois o modelo numérico deve refletir a realidade. Como se constata, apesar de garantir a ductilidade, faz-se necessária a validação do projeto.

De acordo com as diretrizes técnicas para projeto de CRFA [24], deve-se

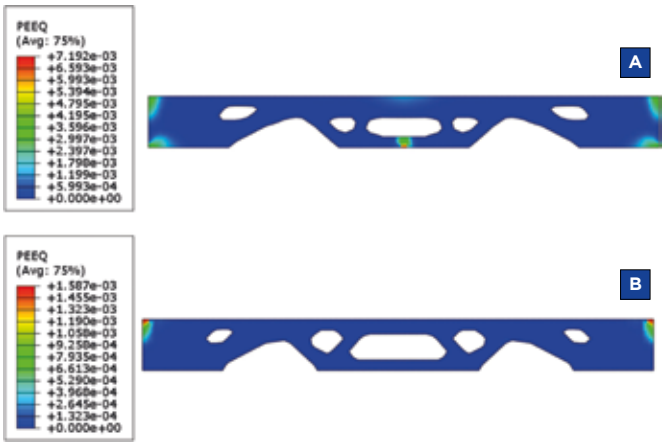

FIGURA 6
Deformações plásticas em vigas otimizadas de CRFA (A) f_{cm} = 30 MPa e v_f = 0,5%; (B) f_{cm} = 50 MPa e v_f = 1,5%
Fonte: Cedrim (2024)

FIGURA 7
Deslocamentos em vigas otimizadas de CRFA
Fonte: Cedrim (2024)

definir os parâmetros de caracterização mecânica, que são utilizados para a classificação do material e o comportamento constitutivo adotado para representar o estágio pós-fissuração.

Uma vez que a relação tensão-deformação é definida, o projeto deve satisfazer simultaneamente as condições de Estado Limite Último (ELU) e Estado Limite de Serviço (ELS), observando-se, necessariamente, os critérios de segurança baseados na abordagem semiprobabilística, para o atendimento dos requisitos de flexão e cisalhamento no ELU e os limites máximos para o estado de fissuração e deslocamentos no ELS [24].

4.1 Benefícios ambientais

A solução obtida por meio de técnicas de otimização permite que a eficiência do dimensionamento independa do processo convencional de tentativa e erro [25]. O presente trabalho priorizou a utilização de um concreto de resistência superior à convencional, incorporando fibras para conferir maior ductilidade ao material. Essa opção demandou, como requisito para a otimização estrutural, a avaliação dos efeitos decorrentes do comportamento não linear do CRFA. Observou-se, contudo, que os princípios fundamentais da OT foram mantidos, particularmente no que tange aos aspectos ambientais citados na literatura [26], os quais consideraram a redução do volume de material associada à métrica de kg de CO_2/m^3.

Para além do objetivo de reduzir as emissões de gases de efeito estufa, a estratégia de otimização topológica promove um alívio direto na pressão por recursos naturais não renováveis. A minimização do volume de concreto implica uma diminuição proporcional na extração de areia e brita, bem como na produção do cimento. Essas atividades estão associadas a intensos processos de mineração, com significativos passivos ambientais, como erosão, assoreamento de corpos hídricos e perda de biodiversidade.

Adicionalmente, a geração de resíduos de construção e demolição pode ser reduzida drasticamente. Dessa forma, a otimização não apenas mitiga impactos relacionados à emissão de dióxido de carbono, como também atua de modo preventivo em toda a cadeia produtiva, conservando recursos naturais e minimizando a degradação ambiental inerente à sua exploração, alinhando-se, portanto, aos princípios de economia circular.

A adoção em larga escala de estratégias de otimização topológica configura-se como uma contribuição ainda pouco explorada para a meta de descarbonização do setor da construção, um dos principais emissores globais de CO_2 [25]. Pesquisas futuras poderiam integrar bancos de dados ambientais mais abrangentes e parâmetros de durabilidade associados aos algoritmos de otimização, permitindo uma tomada de decisão multicritério que equilibre o desempenho mecânico e a mitigação de impactos ambientais.

5. CONCLUSÕES

Os resultados deste trabalho demonstram que a otimização topológica (OT) aplicada a vigas de concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) permite alcançar configurações estruturais mais eficientes, com reduções significativas no volume de material, sem comprometer a capacidade resistente. A análise numérica baseada no método SIMP mostrou que é possível redistribuir o material de forma a concentrar resistência nas regiões críticas, como zonas de elevadas tensões de flexão e cisalhamento. Essa configuração pode levar a uma economia de até 50% no uso de concreto, o que, considerando as emissões associadas à produção de cimento, representa uma redução direta na pegada de carbono das estruturas.

Com uma diminuição de 25% no volume unitário de concreto de uma viga, por meio do processo de otimização, pode-se reduzir cerca de 75 kg de emissão de CO_2 por elemento estrutural. Isto enfatiza que há uma consequente atenuação dos impactos ambientais. Além disso, a introdução de fibras de aço contribui para melhorar a ductilidade e a resistência à fissuração, ampliando a vida útil das estruturas e reduzindo a necessidade de reparos. Com estruturas mais duráveis e com menos manutenções para garantir o desempenho requerido, reduz-se o consumo de recursos naturais e há redução na geração de resíduos associados a processos de construção.

A aplicação apresentada levou em consideração o comportamento elastoplástico do material, de modo a representar os efeitos da interação das fibras com a matriz cimentícia. Os resultados indicaram que as vigas otimizadas mantêm deformações plásticas dentro dos limites seguros (inferiores a 10‰), validando a eficácia do método SIMP mesmo em cenários complexos. Observou-se ainda que a distribuição de deformações varia conforme a resistência do concreto e o teor de fibras, com concentrações distintas próximas aos apoios ou no vão central, dependendo da configuração.

A combinação entre OT e CRFA alinha-se com as demandas por construções mais sustentáveis, pois reduz o consumo de recursos naturais e minimiza resíduos. A técnica mostra-se particularmente promissora quando associada a métodos de fabricação digital, como a impressão 3D de concreto, que permite materializar geometrias complexas, sem o uso de fôrmas convencionais. Além disso, ao substituir o uso de madeira nas fôrmas tradicionais por soluções mais eficientes, é possível reduzir ainda mais o impacto ambiental, promovendo uma construção mais limpa e eficiente. No entanto, para que essa abordagem seja amplamente adotada, é necessário superar barreiras culturais e normativas, além de desenvolver diretrizes específicas para validação de projetos otimizados.

Apesar de os avanços, a aplicação prática da OT em estruturas de concreto ainda enfrenta desafios, como a necessidade de validação experimental em larga escala e a adaptação de normas técnicas para incorporar soluções não convencionais. Futuros estudos devem explorar a integração da OT com análises de ciclo de vida (ACV) para

quantificar seus benefícios ambientais de forma sistêmica e abrangente, incluindo a quantificação das reduções nos custos de materiais, mão de obra e transporte.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o Laboratório de Computação Científica e Visualização (LCCV) do Centro de Tecnologia (CTEC), da Universidade Federal de Alagoas (UFAL), pelo suporte fornecido nesta pesquisa. O segundo autor agradece o suporte do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) para desenvolver este trabalho.

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] WORLD GREEN BUILDING COUNCIL. Global Status Report. Londres: WGBC, 2023, p. 45.

[2] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Cement Technology Roadmap. Paris: IEA, 2022, p. 12-15.

[3] SIGMUND, O. On benchmarking and good scientific practice in topology optimization. Structural and Multidisciplinary Optimization, v. 65, n. 11, p. 315, 2022.

[4] STOIBER, N.; KROMOSER, B. Topology optimization in concrete construction: a systematic review on numerical and experimental investigations. Structural and Multidisciplinary Optimization, v. 64, n. 4, p. 1725-1749, 2021.

[5] PRESSMAIR, N.; XIA, Y.; WU, H.; LANGELAAR, M.; HENDRICKS, M. A. N.; MAJDOUBA, A.; MOGRA, M.; GRISARO, H.; AMIR, O.; KROMOSER, B. Bridging the gap between mathematical optimization and structural engineering: Design, experiments and numerical simulation of optimized concrete girders. Structural Concrete, v. 4, p. 5314-5330, 2023.

[6] DA, D. Topology optimization design of heterogeneous materials and structures. Reino Unido: Wiley, 2019.

[7] VANTYGHEM, G.; BOEL, V.; CORTE, W.; STEEMAN, M. 3D printing of a post-tensioned concrete girder designed by topology optimization. Automation in Construction, v. 112, p. 103084, 2020.

[8] ZHANG, W.; WANG, Y.; DU, Z.; LIU, C.; YOUN, S.; GUO, X. Machine-learning assisted topology optimization for architectural design with artistic flavor. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, v. 413, p. 116041, 2023.

[9] PLEVRIS, V.; ALMUTAIRI, A.; RIOS, A. J. Advancing sustainability through structural optimization: Innovations in material efficiency and environmental impact reduction. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON NET-ZERO CIVIL INFRASTRUCTURES: INNOVATIONS IN MATERIALS, STRUCTURES, AND MANAGEMENT PRACTICES (NTZR), 2024, Cham. Anais do evento. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, p. 1611-1623.

[10] WANG, C.; ZHAO, Z.; ZHOU, M.; SIGMUND, O.; ZHANG, X. S. A comprehensive review of educational articles on structural and multidisciplinary optimization. Structural and Multidisciplinary Optimization, v. 64, n. 5, p. 2827-2880, 2021.

[11] AGRAWAL, A.; TAMSEN, E.; UNGER, J. F.; KOUTSOURELAKIS, P. S. From concrete mixture to structural design – a holistic optimization procedure in the presence of uncertainties. Data-Centric Engineering, v. 5, p. e20, 2024.

[12] ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. Circular economy in construction. Cowes: EMF, 2022.

[13] WU, L.; SUN, Z.; CAO, Y. Modification of recycled aggregate and conservation and application of recycled aggregate concrete: A review. Construction and Building Materials, v. 431, p. 136567, 2024.

[14] GURSEL, A. P.; MASANET, E.; HORVATH, A.; STADEL, A; Life-cycle inventory analysis of concrete production: A critical review. Cement and Concrete Composites, v. 51, p. 38-48, 2014.

[15] AHMED, G. H. A review of "3D concrete printing": Materials and process characterization, economic considerations and environmental sustainability. Journal of Building Engineering, v. 66, p. 105863, 2023.

[16] SINGH, H. Steel fiber reinforced concrete: Behavior, modelling and design. Singapura: Springer, 2017.

[17] BENTUR, A.; MINDESS, S. Fibre reinforced cementitious composites. 2. ed. Reino Unido: Taylor and Francis, 2007.

[18] JAISHANKAR, P.; MURALI, G.; SALAIMANIMAGUDAM, M. P.; AMRAN, Y. H. M.; FEDIUK, R.; KARTHIKEYAN, K. Study of topology optimized hammerhead pier beam made with novel preplaced aggregate fibrous concrete. Periodica Polytechnica Civil Engineering, v. 65, n. 1, p. 287-298, 2021.

[19] GAGANELIS, G.; MARK, P.; FORMAN, P. Optimization aided design: Reinforced concrete. Alemanha: John Wiley & Sons, 2022.

[20] 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.

[21] CHRISTENSEN, P. W.; KLARBRING, A. An introduction to structural optimization. Suécia: Springer, 2009.

[22] WU, J.; SIGMUND, O.; GROEN, J. P. Topology optimization of multi-scale structures: A review. Structural and Multidisciplinary Optimization, v. 63, p. 1455-1480, 2021.

[23] CEDRIM, M. B. M. Fundamentos para o projeto de vigas de concreto reforçado com fibras de aço com suporte de técnicas de otimização topológica. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Alagoas, Brasil, 2024.

[24] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16935: Projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras – Procedimento. Rio de Janeiro, 2021.

[25] ERLACHER, G.; CALENZANI, A. F. G.; ALVES, E. C. Topological optimization of composite trusses considering CO_2 emission via metaheuristics algorithms. IBRACON Structures and Materials Journal. v. 16, n. 6, e16606, 2023.

[26] SANTORO, J. F.; KRIPKA, M. Minimizing environmental impact from optimized sizing of reinforced concrete structures. Computers and Concrete. v. 25, n. 2, p. 111-118, 2020.