

CAPÍTULO 1

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ESTRUTURAL DO REFORÇO COM FIBRA DE CARBONO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO NO BRASIL

Peron Alonso Leite da Silva

Trabalho de Conclusão de Curso 2025/2, curso de Engenharia Civil
Centro Universitário Augusto Motta – UNISUAM, unidade Bonsucesso
peronalonso@souunisuam.edu.br

Rachel Cristina Santos Pires

Mestre em Desenvolvimento Local, Engenheira Civil
Centro Universitário Augusto Motta – UNISUAM, unidade Bonsucesso
rachelpireseng@gmail.com

Everton Rangel Bispo

Professor Doutor em Engenharia de Materiais e Processos Metalúrgicos
Centro Universitário Augusto Motta – UNISUAM, unidade Bonsucesso
evertonbispo@souunisuam.edu.br

Igor Charles Siqueira Leite

Doutor em Engenharia Civil
Centro Universitário Augusto Motta – UNISUAM, unidade Bonsucesso
Igor.leite@unisuam.edu.br

RESUMO

O objetivo geral da presente pesquisa é avaliar o desempenho estrutural de elementos de concreto armado reforçados com sistemas de fibras de carbono, analisando comparativamente a eficiência das técnicas de colagem externa e inserção no cobrimento sob solicitações de flexão e cisalhamento. Foi empreendida uma revisão bibliográfica narrativa, de natureza qualitativa e caráter descritivo, assentada em material já publicado, como livros, artigos científicos, teses, dissertações e legislação pertinente. A presente pesquisa permitiu avaliar o desempenho estrutural de elementos de concreto armado reforçados com sistemas de fibra de carbono, confirmando que esta tecnologia representa um avanço frente às técnicas tradicionais de reabilitação. O uso de PRFC atende eficazmente à demanda por soluções que aliam leveza, resistência à corrosão e rapidez executiva, superando as limitações logísticas e de sobrecarga impostas pelo uso de chapas metálicas ou encamisamento de concreto. Por fim, infere-se que o sucesso da intervenção depende tanto da precisão do cálculo estrutural quanto da qualidade da execução.

Palavras-chave: Concreto Armado. Fibra de Carbono. Análise de desempenho. Engenharia Civil.

INTRODUÇÃO

O concreto armado consolidou-se, ao longo do século XX, como o material construtivo predominante na engenharia civil, permitindo a execução de estruturas de geometria complexa e elevada capacidade de carga (Benjamin; Lamêgo, 2021). Contudo, a despeito de sua versatilidade e durabilidade teórica, as estruturas de concreto também estão sujeitas à ação deletéria do tempo e do meio ambiente. Fatores como a corrosão das armaduras, falhas de projeto ou execução, alterações de uso que implicam em incrementos de sobrecarga não previstos originalmente, e a própria degradação natural dos materiais constituintes, impõem a necessidade premente de intervenções de recuperação e reforço estrutural (Araújo; Silva Júnior, 2018).

Historicamente, as técnicas de reforço, tais como a adição de chapas de aço coladas externamente ou o encamisamento de concreto, foram amplamente utilizadas (Barboza, 2023). No entanto, tais métodos apresentam limitações diversas, tais como o aumento do peso próprio da estrutura, alterações nas dimensões arquitetônicas, suscetibilidade à corrosão e dificuldades executivas em locais de difícil acesso (Benjamin; Lamêgo, 2021).

Surgem, diante disso, os Polímeros Reforçados com Fibras (PRF), especificamente os Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono (PRFC), como uma alternativa tecnológica superior para a reabilitação de estruturas. A utilização destes compósitos na construção civil, iniciada na década de 1980 e impulsionada por demandas sísmicas no Japão, fundamenta-se nas excepcionais propriedades mecânicas das fibras de carbono, que apresentam elevada resistência à tração, alto módulo de elasticidade e imunidade à corrosão eletroquímica (Bronze, 2016; Oliveira, 2020).

Justifica-se a escolha do tema pela crescente demanda no cenário da engenharia brasileira por soluções de reforço que aliem rapidez executiva, durabilidade e mínima interferência na arquitetura existente. Os sistemas compostos estruturados com fibras de carbono destacam-se por sua elevada relação resistência/peso e pela sua excelente resistência à fadiga e a ataques químicos (Ballesteros, 2023).

Embora o uso de PRFC seja crescente, o dimensionamento e a execução desses sistemas no país baseiam-se majoritariamente em diretrizes internacionais, notadamente a norma americana *ACI 440.2R - Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*, devido à ausência de uma norma brasileira específica que regulamente integralmente o reforço com compósitos de fibra de carbono.

Diante disso, o objetivo geral da presente pesquisa é avaliar o desempenho estrutural de elementos de concreto armado reforçados com sistemas de fibras de carbono, analisando comparativamente a eficiência das técnicas de colagem externa e inserção no cobrimento sob solicitações de

flexão e cisalhamento. O estudo visa quantificar os incrementos de capacidade de carga e analisar os modos de ruptura preponderantes.

DESENVOLVIMENTO

O concreto armado é, indiscutivelmente, o material de construção mais utilizado na infraestrutura moderna. Ele não é apenas a soma de dois materiais, mas sim o resultado de uma simbiose física e mecânica entre o concreto, uma mistura de cimento, água, agregados miúdos e graúdos, e eventuais aditivos, e o aço (Schneider et al., 2016).

A premissa básica deste compósito é a compensação de fraquezas. O concreto simples possui uma excelente resistência aos esforços de compressão, mas uma resistência quase desprezível, cerca de 10% da compressão, aos esforços de tração (Barbosa, 2023).

O aço, por sua vez, possui alta ductilidade e resistência à tração. Ao posicionar o aço nas regiões onde a estrutura tende a ser tracionada, cria-se um sistema capaz de vencer grandes vãos e suportar cargas elevadas. Para que essa união funcione efetivamente como uma estrutura única, e não como dois materiais isolados, a engenharia depende de fenômenos fundamentais de aderência e compatibilidade (Schneider et al., 2016).

A aderência mecânica é garantida pelas nervuras das barras de aço (comumente das categorias CA-50 ou CA-60), que travam o metal dentro da massa de concreto endurecido, permitindo a transferência de tensões entre as fases. Simultaneamente, a compatibilidade térmica desempenha um papel crucial e muitas vezes subestimado; o fato de o aço e o concreto possuírem coeficientes de dilatação térmica extremamente próximos evita que variações de temperatura gerem tensões internas destrutivas que poderiam levar ao descolamento das armaduras ou à desagregação do concreto (Araújo; Silva Júnior, 2018).

No entanto, mesmo com essa compatibilidade, o concreto armado não é um material eterno ou imutável. Ele é suscetível a deformações lentas ao longo do tempo, conhecidas como fluência, e a processos de degradação que exigem uma compreensão profunda da patologia das construções para garantir a segurança e a vida útil das edificações (Barboza, 2023).

As patologias no concreto armado surgem de diversas fontes, variando desde falhas na fase de projeto e execução até a agressividade do ambiente onde a obra está inserida. A corrosão das armaduras é, sem dúvida, a manifestação patológica mais frequente e deletéria. Ela ocorre quando a camada de concreto que protege o aço perde sua capacidade de passivação devido à carbonatação ou pela penetração de íons cloreto. Quando o aço oxida, o produto da corrosão ocupa um volume maior que o metal original, gerando tensões internas expansivas que fissuram e destacam o concreto, expondo ainda mais a armadura e acelerando o colapso. Além disso, mudanças no uso da edificação, como o aumento de sobrecargas em lajes ou a instalação de novos equipamentos industriais, podem levar as estruturas a operarem além de seus limites de serviço, exigindo intervenções de reforço

estrutural para restabelecer ou elevar a capacidade de carga original (Benjamim; Lamêgo, 2021).

Historicamente, o reforço de estruturas de concreto armado recorria a técnicas tradicionais, como o encamisamento de pilares e vigas com novas camadas de concreto e aço, ou a colagem de chapas metálicas com resinas epóxi. Embora eficazes, essas soluções apresentam inconvenientes significativos: o encamisamento aumenta as dimensões das peças e o peso próprio da estrutura, o que pode sobrecarregar as fundações, enquanto as chapas metálicas estão sujeitas à mesma corrosão que afeta a armadura interna, além de serem pesadas e de difícil manuseio em locais de acesso restrito (Ballesteros, 2023).

A fibra de carbono revolucionou o conceito de reforço estrutural ao oferecer um material com resistência à tração vastamente superior à do aço, podendo ultrapassar 3.500 MPa em comparação aos 500 MPa do aço convencional, com uma densidade muito menor. Essa alta relação resistência/peso permite que o reforço seja aplicado sem adicionar carga permanente significativa à estrutura existente e sem alterar a geometria dos ambientes, uma vantagem arquitetônica crucial em edificações com limitações de espaço (Bronze, 2016).

A aplicação desses compósitos geralmente ocorre através de mantas ou lâminas coladas externamente às superfícies de concreto, atuando como uma armadura externa que absorve os esforços de tração nas vigas ou promove o confinamento em pilares, aumentando sua capacidade de carga axial por meio do travamento lateral da expansão do concreto sob compressão (Oliveira, 2020).

O comportamento mecânico de uma estrutura reforçada com fibra de carbono difere do concreto armado convencional. Enquanto o aço é um material dúctil que escoa antes de romper, avisando visualmente sobre o colapso iminente através de grandes deformações, a fibra de carbono possui um comportamento elástico-linear até a ruptura. Isso significa que ela não escoa; ela resiste cargas imensas e rompe de forma frágil e súbita. Por essa razão, o dimensionamento de reforços com PRFC exige critérios de segurança rigorosos e uma análise cuidadosa dos domínios de deformação, garantindo que, em caso de falha, a estrutura ainda mantenha uma margem de segurança baseada na armadura de aço interna existente (Ballesteros, 2023).

Materiais e métodos

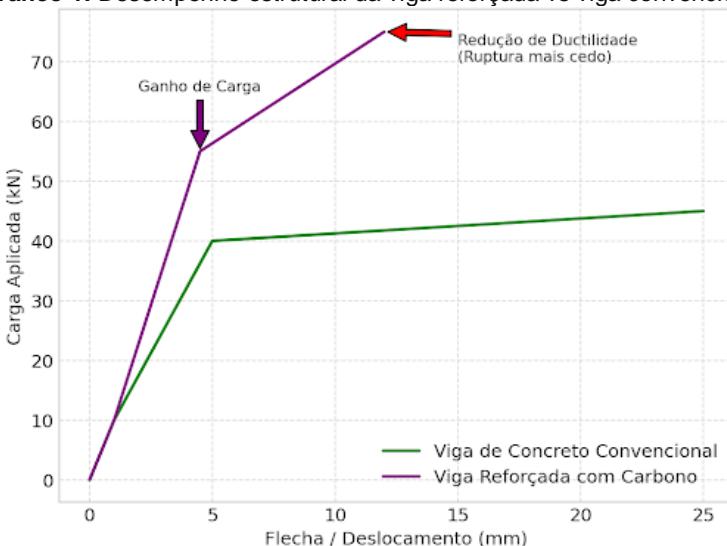
Foi empreendida uma revisão bibliográfica narrativa, de natureza qualitativa e caráter descritivo, assentada em material já publicado, como livros, artigos científicos, teses, dissertações e legislação pertinente, conforme o conceito clássico de pesquisa bibliográfica formulado por Lakatos e Marconi (2003), que a definem como o contato direto do investigador com toda produção disponível sobre o tema.

O levantamento foi conduzido nos seguintes repositórios: SciELO, Capes periódicos, Scopus e Web of Science, utilizando descritores combinados pelos operadores booleanos AND/OR, ajustados à terminologia controlada de cada base. O processo segue as etapas recomendadas por Siena et al. (2024), que passa pela escolha do tema, levantamento preliminar, formulação do problema, plano provisório, busca de fontes, leitura, fichamento, organização lógica e redação.

RESULTADOS

A avaliação do desempenho estrutural de sistemas de reforço com polímeros reforçados com fibra de carbono em estruturas de concreto armado deve considerar mais que a mera verificação do aumento da capacidade de carga imediata. Calcado na literatura, comprehende-se haver a necessidade de uma abordagem que integre o comportamento mecânico sob cargas de serviço e últimas, a durabilidade frente a agentes agressivos e a confiabilidade da aderência interfacial a longo prazo (Chung et al., 2018; Monazami et al., 2022; Ballesteros, 2023):

Gráfico 1: Desempenho estrutural da viga reforçada vs viga convencional



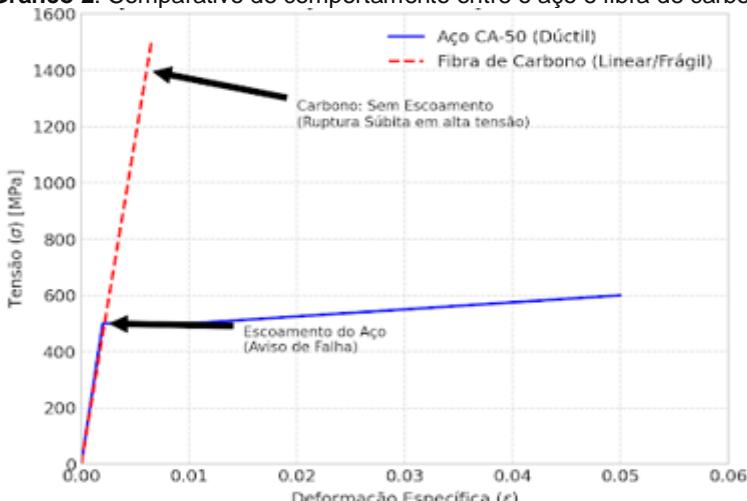
Fonte: Adaptado de Ballesteros (2023, p. 69)

O gráfico 1 apresenta o impacto real do reforço em uma viga, de modo que a curva verde, representando a viga convencional, suporta menos carga e se deforma com maior facilidade antes de falhar. Já a viga reforçada com carbono, representada pela curva roxa, deforma menos para a mesma carga e suporta uma carga final muito maior. No entanto, observe-se que a

viga reforçada possui menor ductilidade, de modo que a viga fica muito mais forte, mas quando atinge seu limite, a falha ocorre com menos deformação total do que na viga original. Por isso, a preparação da superfície é necessária para evitar que essa força arranque o reforço antes da hora (Ballesteros, 2023).

O concreto armado, embora resiliente, sofre com patologias decorrentes de erros na execução, mudanças de uso ou agressividade ambiental. Nesse cenário, o CFRP consolidou-se como uma alternativa leve e de alta resistência, bem como solução capaz de alterar a cinemática de ruína e estender a vida útil de ativos de infraestrutura crítica, desde vigas de edifícios até pavimentos rodoviários e pilares de pontes (Machado, 2006; Araújo; Silva Júnior, 2018).

Gráfico 2: Comparativo de comportamento entre o aço e fibra de carbono



Fonte: Adaptado de Machado (2006, p. 5-9)

O gráfico 2 ilustra a diferença fundamental de segurança entre o concreto armado convencional e o reforçado, de modo que a linha azul representa o Aço, que ao atingir cerca de 500 MPa, ele entra em "escoamento", deformando-se visivelmente antes de quebrar. Isso serve como um aviso visual de perigo. Já a linha vermelha tracejada representa a Fibra de Carbono. Note-se como ela atinge resistência mais alta, contudo, não há o ponto de escoamento. Diante disso, durante o cálculo de reforço, o profissional deve utilizar maiores coeficientes de segurança, visto que o carbono não sofre escoamento, portanto, deve-se trabalhar sempre longe de seu ponto de ruptura (Ballesteros, 2023).

No que tange ao desempenho mecânico imediato, a aplicação de compósitos de carbono altera significativamente o comportamento de elementos fletidos e comprimidos. Conforme estabelecido por Machado

(2006) e validado em estudos comparativos (Bronze, 2016; Ballesteros, 2023), a introdução de lâminas de carbono na zona tracionada de vigas promove um aumento direto na carga de ruptura e no controle da fissuração. No entanto, o ganho de resistência altera o modo de falha.

Enquanto o concreto armado convencional é projetado para ser dúctil, com o aço escoando antes da ruptura do concreto, o sistema reforçado com CFRP tende a um comportamento mais frágil e linear-elástico até a falha. A ruptura pode ocorrer de forma abrupta, seja pela tração excessiva da fibra ou, mais frequentemente, pelo descolamento prematuro do substrato. Portanto, o foco deve estar na força máxima suportada, bem como na capacidade do sistema de manter a aderência sob tensões cisalhantes na interface concreto-adesivo (Schneider; Schultz; Wierzbicki, 2016).

El Maaddawy *et al.* (2007) e Grace; Singh (2005) salientam que a eficácia do CFRP não é estática, mas sensível às condições de exposição. A exposição prolongada a 100% de umidade relativa pode reduzir a resistência do sistema em até 33%, não devido à degradação da fibra de carbono em si, que é inerte, mas devido à plastificação da matriz polimérica e à degradação da interface de colagem (Grace; Singh, 2005).

Em ambientes marinhos ou com presença de sais descongelantes, o desempenho do reforço está ligado à qualidade do envelopamento. O envelopamento contínuo oferece uma proteção superior contra a corrosão das armaduras internas em comparação ao envelopamento intermitente, pois cria uma barreira física que limita o ingresso de oxigênio e cloretos, retardando a perda de massa do aço interno mesmo em vigas já pré-corroídas (Srinivasan *et al.*, 2024).

No Brasil, cuja clima é predominantemente tropical, caracterizado pela elevação da umidade relativa e altas temperaturas médias, a extensa malha urbana costeira do país expõe vastos ativos de infraestrutura à maresia, enquadrando-os nas classes de agressividade III e IV da NBR 6118 (Brasil, 2014), demandando maior rigor na especificação das resinas epóxicas. Portanto, é fundamental que a temperatura de transição vítreia (T_g) do adesivo seja suficientemente alta para suportar o calor local sem sofrer amolecimento (Oliveira, 2020; Barboza, 2023).

Além das vigas e pilares, a aplicação de tecnologias de reforço evoluiu para elementos de infraestrutura viária, como demonstrado por Monazami *et al.* (2007). Nestes casos, a avaliação de desempenho incorpora tecnologias de monitoramento da saúde estrutural. A inserção de sensores, como *strain gauges* e termopares dentro da matriz de concreto ou na linha de cola do reforço permite monitorar, em tempo real, as deformações e a integridade do compósito sob ciclos de carga dinâmicos e variações térmicas (Benjamin; Lâmego, 2021).

Essa abordagem transforma o reforço passivo em um sistema "inteligente", em que o desempenho é avaliado de forma contínua, permitindo a detecção precoce de microfissuras ou falhas de aderência antes que atinjam um estado crítico de colapso, algo que modelos puramente teóricos

muitas vezes falham em prever com precisão (Schneider; Schultz; Wierzbicki, 2016).

Em termos de previsão, a complexidade do comportamento do concreto confinado por CFRP, especialmente em pilares circulares em que o efeito de cintamento aumenta a resistência à compressão axial, tem levado ao uso de ferramentas computacionais avançadas (Ballesteros, 2023). Modelos baseados em lógica Fuzzy (Chung *et al.*, 20018) têm se mostrado mais precisos do que as equações normativas tradicionais para prever a resistência residual e a ductilidade de pilares reforçados, por levar em conta variáveis não lineares e incertezas nos materiais, oferecendo uma avaliação de segurança mais precisa.

Por fim, o sucesso do desempenho estrutural do CFRP é dependente da execução. A preparação do substrato, a mistura correta dos componentes epóxicos e a saturação adequada das fibras são tão importantes quanto o cálculo estrutural (Schneider; Schultz; Wierzbicki, 2016).

A presença de vazios ou áreas sem impregnação na manta atua como indutores de tensão que precipitam o descolamento. A compatibilidade com o concreto base deve ser assegurada; concretos de baixa resistência superficial podem falhar por "arrancamento" da camada de cobrimento antes que a fibra atinja sua capacidade de tração. Portanto, a avaliação de desempenho de uma estrutura reforçada com fibra de carbono é uma avaliação da qualidade da interface criada entre o material existente e o novo compósito (Monazami *et al.*, 2022).

Quando bem projetado e executado, respeitando os limites de deformação e as proteções contra umidade e fogo, o sistema oferece uma recuperação da capacidade portante e uma extensão da vida útil inigualáveis pelas técnicas convencionais (Araújo; Silva Júnior, 2018).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa permitiu avaliar o desempenho estrutural de elementos de concreto armado reforçados com sistemas de fibra de carbono, confirmado que esta tecnologia representa um avanço frente às técnicas tradicionais de reabilitação. O uso de PRFC atende eficazmente à demanda por soluções que aliem leveza, resistência à corrosão e rapidez executiva, superando as limitações logísticas e de sobrecarga impostas pelo uso de chapas metálicas ou encamisamento de concreto.

No que tange ao comportamento mecânico, conclui-se que o reforço com fibras de carbono proporciona um aumento substancial na capacidade de carga última e na rigidez das peças fletidas. Contudo, essa ganho de resistência impõe uma alteração na natureza da falha estrutural, que transita de um comportamento dúctil para um comportamento linear-elástico e frágil. Essa constatação exige uma mudança de paradigma no dimensionamento, demandando a adoção de coeficientes de segurança mais rigorosos para compensar a ausência de avisos prévios de ruptura, como grandes deformações plásticas.

A análise da durabilidade demonstrou que a maior debilidade do sistema não é a fibra em si, mas a interface de aderência e a matriz polimérica. Ficou demonstrado que, no cenário brasileiro, caracterizado por ambientes de alta umidade e temperaturas elevadas, a seleção criteriosa da resina epóxi e a proteção contra radiação UV são mandatórias para evitar a plastificação da matriz e o descolamento prematuro.

O envelopamento contínuo mostrou-se a estratégia mais eficiente para blindar a estrutura contra agentes agressivos, atuando simultaneamente como reforço mecânico e barreira protetora. Por fim, infere-se que o sucesso da intervenção depende tanto da precisão do cálculo estrutural quanto da qualidade da execução.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, Thiago Thielmann de. SILVA JÚNIOR, Wladimir Nascimento. **Reforço estrutural em fibra de carbono para estruturas de concreto armado.** In: grupo de estudos da patologia da construção – PATORREB, 2018. Disponível em: <https://www.nppg.org.br/patorreb/files/artigos/80533.pdf>. Acesso em: 27 nov. 2025.

BALLESTEROS, Augusto Marçal. **Análise de desempenho do reforço com manta de fibra de carbono em concretos de cimento Portland.** Monografia. 72f. [Especialista em Construção Civil]. Belo Horizonte/MG: Universidade Federal de Minas Gerais, 2023.

BARBOZA, Evelyn Lopes. **Análise comparativa entre técnicas de reforço com fibra de carbono em vigas de concreto armado submetidas à flexão simples.** Trabalho de Conclusão de Curso. 96f. [Bacharel em Engenharia Civil]. Rio de Janeiro: Universidade Veiga de Almeida, 2023.

BENJAMIN, Edinéia Alves. LAMÊGO, Geraldo César. Reforço Estrutural com a utilização de Fibra de carbono. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v.7, n.1, p.3914-3927 Jan. 2021

BRASIL. ABNT **NBR nº 6118:** Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Brasília: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014. Disponível em: <https://engcivil20142.wordpress.com/wp-content/uploads/2017/08/nbr-6118-2014-projeto-de-estruturas-de-concreto-procedimento-versc3a3o-corrigida.pdf>. Acesso em: 27 nov. 2025.

BRONZE, Ricardo Alves. **Estudo comparativo:** uso do sistema de fibras de carbono e sistema convencional para reforço de estruturas de concreto. Trabalho de Conclusão de Curso. 93f. [Bacharel em Engenharia Civil]. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.

CHUNG, Lan et al. Performance Evaluation of CFRP Reinforced Concrete Members Utilizing Fuzzy Technique. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 12, n. 78, 2018.

EL MAADDAWY, Tamer et al. Performance Evaluation of Carbon Fiber-Reinforced Polymer-Repaired Beams Under Corrosive Environmental Conditions. **ACI Structural Journal**, v. 104, n. 1, p. 3-11, 2007.

GRACE, Nabil F. SINGH, S. B. Durability Evaluation of Carbon Fiber-Reinforced Polymer Strengthened Concrete Beams: Experimental Study and Design. **ACI Structural Journal**, v. 102, n. 1, 2005.

MACHADO, Ari de Paula. **Manual de Reforço das Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono**. São Paulo: VIAPOL, 2006. Disponível em: <https://www.viapol.com.br/media/97576/manual-fibra-de-carbono.pdf>. Acesso em: 27 nov. 2025.

MONAZAMI, M. et al. Evaluating performance of carbon fiber-reinforced pavement with embedded sensors using destructive and non-destructive testing. **Case Studies in Construction Materials**, v. 12, 2022.

OLIVEIRA, Priscila Duarte de. **Reforço de um pavimento de concreto armado usando fibras de carbono**: estudo de caso. Monografia. 79f. [Bacharel em Engenharia Civil]. Maceió/AL: Universidade Federal de Alagoas, 2020.

SCHNEIDER, Fernanda Heck. SCHULTZ, Jacqueline da Luz. WIERZBICKI, Luísa Rocha. **Análise do desempenho da ancoragem do reforço de fibras de carbono em vigas submetidas à flexão**. Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2016. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/8059/2/CT_COECI_2016_2_13.pdf. Acesso em: 27 nov. 2025.

SIENA, Osmar et al. **Metodologia da Pesquisa Científica e Elementos para Elaboração e Apresentação de Trabalhos Acadêmicos**. Belo Horizonte: Editora Poisson, 2024, 258p.

Srinivasan, Sairam Shankar et al. The structural performance of fiber-reinforced concrete beams with nanosilica. **Revista Matéria**, v. 2, n. 3, 2024.