

ARTIGO DE REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

**Comportamento de fluência e retração de compósitos reforçados com fibras de carbono:
uma revisão**

Creep and shrinkage behavior of carbon fiber reinforced composites: a review

Lidiane do Nascimento Farias¹. Joaquin Humberto Aquino Rocha².

1. Programa de Engenharia Civil, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil.
lidianne.farias@coc.ufrj.br
2. Programa de Engenharia Civil, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil.
joaquin.rocha@coc.ufrj.br

RESUMO

Considerando a relevância dos fenômenos fluência e retração dos concretos, o presente estudo tem como objetivo geral desenvolver uma revisão da literatura sobre estes dois comportamentos em compósitos reforçados com fibras de carbono. Foi realizada uma busca nos bancos de dados “Web of Science” e “Scopus” com combinações específicas de palavras-chave. A seleção foi baseada nos estudos mais relevantes de cada tema, priorizando a propriedade mecânica de fluência. Com base nos estudos apresentados, verificou-se que a fibra de carbono influencia significativamente na capacidade de restringir a fluência e o encolhimento dos concretos. Outro ponto observado no estudo é que fibras com módulo de elasticidade maior do que o de concreto simples têm a capacidade de resistir a fluência, ao contrário das fibras com menor módulo, mesmo em ensaios de fluência com concretos já pré-fissurados. Embora existam vários estudos, ainda não há um entendimento completo do assunto. O comportamento de fluência e retração pode ser explorado em compósitos reforçados com fibras de carbono quando expostos a altas

temperaturas, em concretos de ultra alto desempenho, em pós-fissuração de elementos estruturais, entre outros.

Palavras-chave: Fluência. Matriz cimentícia. Matriz polimérica. Retração. Pré-fissuração.

ABSTRACT

Considering the relevance of the creep and shrinkage phenomena of concrete, this study aims to develop a literature review on these two behaviors in composites reinforced with carbon fibers. A search was performed in the Web of Science and Scopus databases with specific combinations of keywords. The selection was based on the most relevant studies of each theme, prioritizing the mechanical property of creep. Based on the studies presented, it was identified that carbon fiber significantly influences the ability to restrict creep and shrinkage of concrete. Another point observed in the study is that fibers with a higher modulus of elasticity than plain concrete can resist creep, unlike fibers with a lower modulus, even in creep tests with pre-cracked concrete. Although there are several studies, there is still not a complete understanding of the subject. The creep and shrinkage behavior can be explored in composites reinforced with carbon fibers when exposed to high temperatures, in ultra-high-performance concretes, in post-cracking of structural elements, among others.

Keywords: Cement matrix. Creep. Pre-cracking. Polymeric matrix. Shrinkage.

1. INTRODUÇÃO

Como forma de proporcionar um reforço adicional eficiente aos concretos, as fibras são amplamente utilizadas (Domski *et al.*, 2017; Raj *et al.*, 2020). A adição de fibras no concreto ajuda em um maior alcance das propriedades mecânicas, principalmente, quando se trata do controle de fissuração da estrutura, pois confere ao material uma capacidade de carga de pós-fissuração (Granju & Balouch, 2005).

Dentre os vários tipos de fibras, o efeito do aço e das fibras sintéticas tem sido pesquisado no que diz respeito às propriedades do concreto (Sadrinejad *et al.*, 2018; Guerini *et al.*, 2018). E entre os tipos de fibras, a fibra de aço é a mais comumente utilizada (Bolat *et al.*, 2014; Mousavi *et al.*, 2019; Eisa *et al.*, 2020). No entanto, um aspecto dos concretos que se utilizam das fibras de aço é

frequentemente citado como potencialmente problemático: a presença do aço gera a existência potencial de campos elétricos dentro do compósito, o que, conseqüentemente lhe é atribuído um potencial de corrosão. Isso é considerado um problema com relação a durabilidade e vida útil das estruturas (Mosavinejad *et al.* 2020; Pyo *et al.* 2017; Yoo *et al.*, 2020a; Yoo *et al.* 2020b).

Entre as fibras que podem ser utilizadas como reforço, tem-se também a fibra de carbono. Com uma alta resistência à tração, baixo coeficiente de expansão linear, propriedades favoráveis em relação à corrosão e características mais leves, estruturas com utilização de fibra de carbono também podem proporcionar uma redução no seu peso próprio, pois o peso unitário do carbono é inferior ao do aço (Kromoser *et al.*, 2019). Somado a esses fatores, as fibras de carbono podem ser um atrativo para confecção de concretos, pois aumenta a condutividade e as propriedades mecânicas, como tenacidade à fratura e capacidade de deformação (Azhari & Banthia, 2012).

Dessa forma, como um potencial reforço em compósitos e concretos, é necessário verificar quanto às características mecânicas de fibras de carbono (Banthia *et al.*, 1992; Sun *et al.*, 2015). Em destaque, com análises da fluência e retração de compósitos que utilizam as fibras de carbono como reforço, pois estas deformações afetam diretamente a durabilidade e resistência mecânica das estruturas.

Em um ensaio de fluência, a amostra é submetida a uma força de tração ou compressão constante e seu alongamento é monitorado ao longo do tempo. Na primeira parte do ensaio, um fenômeno conhecido como fluência primária, pode ser investigado. Nessa etapa, o alongamento elástico é caracterizado por deformações de crescimento rápido. Posteriormente, o alongamento continua em uma taxa constante por um período maior, significando a fluência secundária. Porém, se os valores de tensão ou temperatura se tornarem muito altos, a amostra pode chegar a falha ou se quebrar, atingindo a fluência terciária (Ascione *et al.*, 2008).

Outro fenômeno conhecido, este devido às mudanças de umidade e perda de água incorporada na matriz, é a retração (Tang *et al.*, 2021). Os efeitos provenientes da retração podem avançar e incluem o aparecimento de micro e macro fissuras na estrutura. Nesse sentido, considerando que as fibras de carbono possuem alta capacidade de deformação e uma das principais vantagens da

sua utilização é o reforço adicional que controla a propagação de fissuras e proporciona maior vida útil as estruturas, a utilização destas fibras como reforço pode ser uma boa alternativa ao comportamento de deformação do concreto. O presente estudo buscou o que tem sido estudado sobre a incorporação de fibras de carbono quanto às propriedades de fluência e retração. Existem alguns questionamentos a serem investigados: os diferentes volumes, comprimentos e tipos de fibras de carbono têm efeitos sobre estes comportamentos? O reforço é eficiente quanto à propagação de fissuras quando se trata da fluência em concretos pré-fissurados?

Portanto, o estudo tem como objetivo desenvolver uma revisão da literatura e fornecer uma visão geral sobre a influência das fibras de carbono no desempenho à fluência e retração de compósitos. Ao apresentar as principais investigações dos pesquisadores sobre o tema, o estudo também pretende impulsionar novas pesquisas.

2. METODOLOGIA

2.1. Critérios de pesquisa

Este trabalho consiste numa revisão bibliográfica sobre fluência e retração de compósitos com fibras de carbono (FC). Foi realizada uma busca nos bancos de dados “*Web of Science*” e “*Scopus*” com combinações específicas de palavras-chave. No entanto, foi difícil mensurar o período, pois houve uma quantidade limitada de estudos relacionados ao tema. A Figura 1 exhibe os critérios de pesquisa utilizados para elaboração desta revisão.

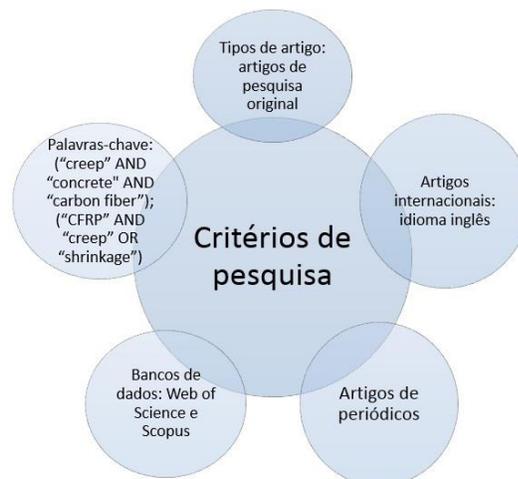


Figura 1. Critérios de pesquisa
Fonte: Elaboração própria (2021).

A Figura 2 apresenta a combinação das palavras-chave mais encontradas nos estudos de concretos e compósitos reforçados com fibras de carbono realizado com o programa computacional de pesquisa bibliométrica *VOSviewer*.

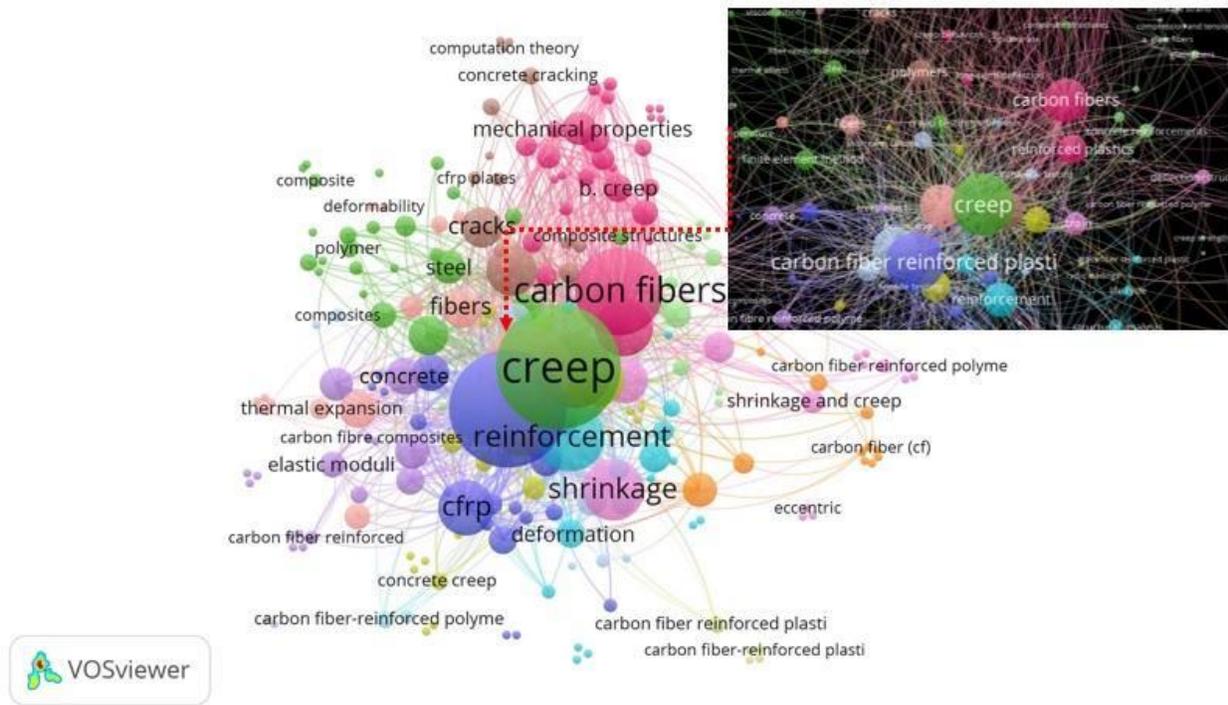


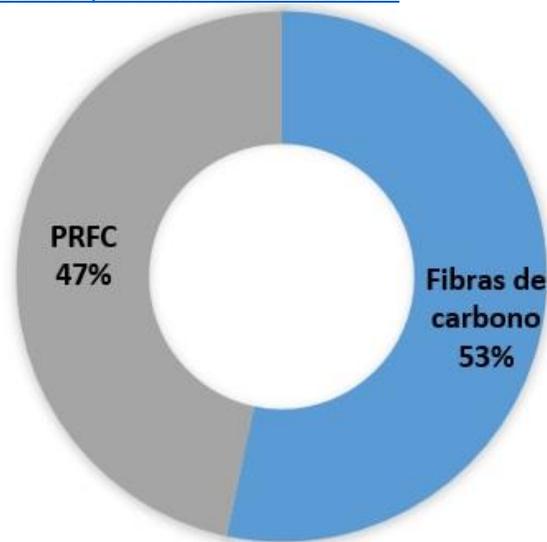
Figura 2. Combinação de palavras-chave encontradas

Fonte: Elaboração própria (2021).

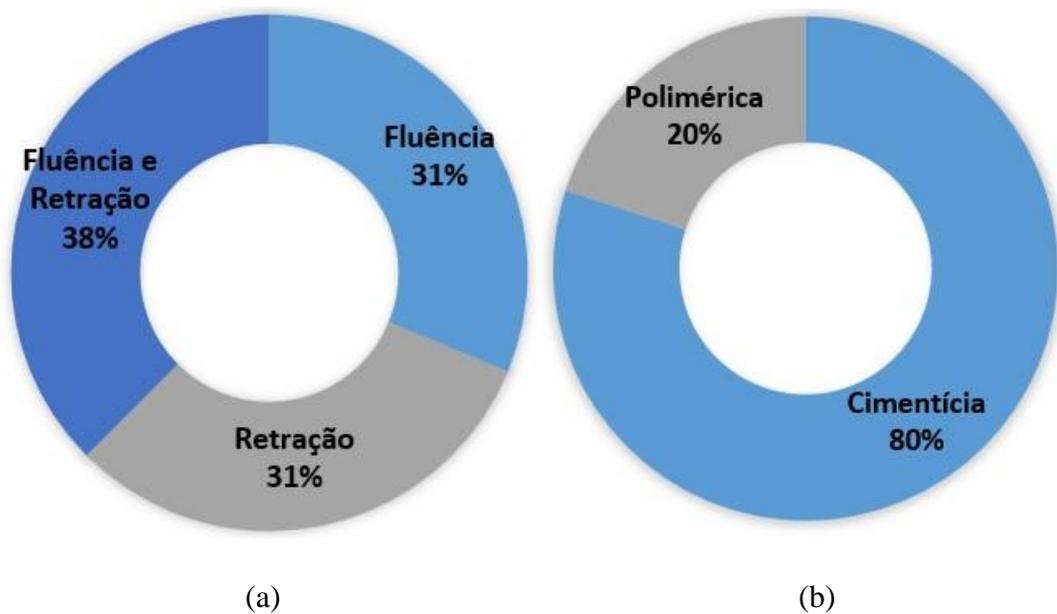
2.2. Seleção e quantificação dos estudos

Esta revisão analisou os estudos feitos com base na utilização de fibras de carbono (53%) e Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono (PRFC), que são fibras de carbono em laminados poliméricos, com 47% dos estudos.

A Figura 3 apresenta a proporção de estudos com base na relevância de pesquisa e os critérios da busca utilizados que foram selecionados. A Figura 4 mostra a proporção dos estudos para cada propriedade discutida e apresenta as matrizes correspondentes que foram utilizadas.



*Figura 3. Quantitativo de estudos relevantes com base no critério de pesquisa
Fonte: Elaboração própria (2021).*



*Figura 4. Quantitativo dos estudos. a) Propriedades avaliadas, b) Matrizes
Fonte: Elaboração própria (2021).*

3. EFEITOS DA INCORPORAÇÃO DE FIBRAS DE CARBONO NO COMPORTAMENTO À FLUÊNCIA E RETRAÇÃO DE COMPÓSITOS

A Tabela 1 apresenta uma síntese sobre os estudos de fluência e retração que foram selecionados. Não foi possível obter uma maior padronização devido às diferenças nos métodos, tipos de fibras e matrizes utilizadas. A maioria dos trabalhos experimentais selecionados avaliaram a fluência e retração dos materiais em conjunto. Os estudos não informam muitos detalhes sobre o formato de ensaio realizado, principalmente quanto às diferenças da fluência básica ou secagem. O ensaio de fluência básica consiste em corpos de prova selados para que se evite a troca de umidade com o meio ambiente, diferente do ensaio de fluência por secagem, o que pode ser ou não possível analisar apenas através das imagens do ensaio. Em relação à retração, as pesquisas se concentraram em avaliações de retração por secagem e autógena.

Um dos primeiros estudos a realizar ensaios de retração para compósitos reforçados com fibras de carbono, Park *et al.* (1991) utilizaram fibras de carbono com 3 mm, 6 mm, 10 mm e 12 mm de comprimento e realizaram o ensaio de retração entre 2 semanas até 6 meses de idade dos compósitos. O encolhimento linear foi de 4×10^{-4} mm para amostras curadas em autoclave, o que indicou que a autoclave é um método eficaz para minimizar a retração por secagem de compósitos reforçados com fibras de carbono, com redução de 25% (cura ao ar) e 16% (cura em água). Compósitos com fibras de 3 mm apresentam menor encolhimento do que aqueles com fibras de 10 mm. Isso é explicado pela maior densidade de compósitos de FC de 3 mm antes da secagem, devido ao empacotamento com cimento por causa da proporção menor da fibra de carbono.

Mais tarde, Park & Lee (1993) investigaram os efeitos da FC em compósitos em ensaios de fluência, além da propriedade de retração. O ensaio de fluência seguiu a ASTM C39-72 para cimento reforçado com fibra de carbono (CRFC) curado sob diferentes condições sob duas cargas diferentes (15 e 30% da resistência final) por 1 ano. Os autores avaliaram o tipo (fibras de carbono à base de Poliacrilonitrila - PAN ou pitch), comprimento (3, 6, 10 e 20 mm) e volume de fibra de carbono no CRFC. Os resultados mostraram que a resistência à fluência foi quase quatro vezes maior para compósito com fibras à base de PAN com 3% do que para compósito sem fibras PAN. Também foi observado que a deformação de fluência foi um pouco maior para o

compósito curado em ar de 90% de umidade relativa (UR) do que aqueles curados ao ar de 60% UR. Acredita-se que devido a uma maior densidade do compósito curado ao ar de 60% UR. Um aumento na deformação de fluência foi mostrado quando a carga aplicada foi maior. Ensaio sob 30% da resistência final aumentou entre 10 - 40% a deformação de fluência em comparação com a aplicação de 15% da carga, em 12 meses. Estes demonstram que a influência de FC é uma função não apenas da carga aplicada, mas também condição de cura.

Arockiasamy *et al.* (2000) apresentaram as mudanças no comportamento de longo prazo das vigas reforçadas com barras PRFC sob carregamento sustentado uniforme. A previsão experimental das deformações da viga reforçada com PRFC foi comparada com a previsão analítica baseada na expressão para coeficiente de fluência e retração do concreto do Comitê ACI 209 (1992):

$$\varphi(t, t_0) = (t - t_0)^{0.6}10 + (t - t_0)^{0.6}\varphi_u\varepsilon_{cs}(t, t') = t - t'35 + (t - t')(\varepsilon_{cs})_u \quad (1)$$

Onde $\varphi(t, t_0)$ indica o coeficiente de fluência no tempo t para a idade no carregamento t_0 ; $\varepsilon_{cs}(t, t')$ é a retração livre que ocorre entre t' e qualquer tempo t ; φ_u é o coeficiente de fluência final; $(\varepsilon_{cs})_u$ é a deformação de retração final em tempo infinito. Dessa forma, com base nos estudos experimentais e analíticos, os autores relataram que as deformações experimentais observadas nas vigas estiveram em razoável concordância com as deformações analíticas baseadas no coeficiente ACI 209. As deformações previstas também levaram em consideração a umidade relativa, as características do material utilizado, a resistência mecânica, o tamanho do elemento, e por fim, a intensidade da carga sustentada e sua duração. Foi analisado que as taxas de deformações e deflexões sob carregamento sustentado é maior no período inicial e tende a diminuir com o decorrer do tempo. Esse estudo é importante pois a aplicação de PRFC como elemento de reforço é ideal para uso em tabuleiros de pontes e vigas, principalmente quando expostas a ambientes marinhos hostis devido às boas características em relação a corrosão (Arockiasamy *et al.*, 2000).

Autores	Fibra de carbono	Matriz	Aplicação	Propriedade	Avaliação
Park <i>et al.</i> (1991)	Fibra de carbono	Cimentícia	Compósitos	Retração por secagem	Avaliação da retração de secagem. Alterações: fibras de carbono com comprimentos de 3, 6, 10 e 12 mm. Período: 2 semanas até 6 meses.
Park & Lee (1993)	Fibra de carbono	Cimentícia	Compósitos	Fluência e Retração por secagem	Investigação dos efeitos do tipo, comprimento (3, 6, 10 e 20 mm), volume da fibra de carbono e condições de cura no desempenho de fluência e retração do cimento reforçado com fibras de carbono. Período: 12 meses
Deskovic, Meier & Triantafillou (1995)	Fibra de carbono (PRFC)	Cimentícia	Compósitos híbridos reforçados com fibras de carbono e vidro	Fluência à compressão e Retração por secagem	Avaliação de fluência e retração do concreto através da análise do comportamento de vigas reforçadas com polímero reforçado com fibra de vidro (PRFV) e fibra de carbono (PRFC) como reforço de tensão adicional.
Chen & Chung (1996)	Fibras curtas de carbono	Cimentícia	Concreto	Retração por secagem	Avaliação da retração por secagem em concretos (com agregados finos e grossos) reforçados com fibras curtas de carbono em baixo volume.
Arockiasamy <i>et al.</i> (2000)	Fibra de carbono (PRFC)	Cimentícia	Concreto	Fluência e Retração	Avaliação do comportamento de longo prazo de vigas reforçadas com barras de polímero com fibras de carbono. Período: cerca de 2 anos.
Goertzen & Kessler (2006)	Fibra de carbono (PRFC)	Matriz Époxi	Compósitos de fibras de carbono/ matriz epóxi	Fluência à tração e Fluência à flexão	Investigação da fluência de tração e flexão em ensaios de curto prazo (menos de 1600 h) à temperatura ambiente com cargas de até 77% da resistência à tração.
Wongtanakitch aroen & Naaman (2007)	Fibras curtas de carbono	Cimentícia	Concreto	Retração de secagem	Influência das fibras na retração e evaporação de água de compósitos reforçados com fibra. Alteração: fibras de carbono em volumes de 0,1%, 0,2%, 0,3% e 0,4%.
Ascione (2008)	Fibra de carbono (PRFC)	Matriz polimérica	Compósitos poliméricos de fibras de carbono	Fluência à tração	Foi avaliado o comportamento de fluência à tração. Período: cerca de 500 dias.
Al Chami	Fibra de carbono (PRFC)	Cimentícia	Vigas de concreto armado	Fluência à	Investigação de fluência em altos níveis

Autores	Fibra de carbono	Matriz	Aplicação	Propriedade	Avaliação
(2009)			(100 x 150 x 1800 mm) reforçada com laminados de fibras de carbono	flexão	de carga sustentada para determinação da carga sustentada máxima que pode ser aplicada sem qualquer risco de falha por fluência à longo prazo. Período: 1 ano.
Khadraoui (2012)	Fibra de carbono (PRFC)	Cimentícia	Argamassas com fibras de carbono (PRFC)	Fluência à compressão e Retração por secagem	Avaliação da fluência de curto prazo e retração por secagem com aplicação de 30% da resistência final. Período: 2, 7 e 28 dias.
Kim <i>et al.</i> (2018)	Fibra de carbono e nanotubo de carbono	Cimentícia	Pastas de cimento e argamassas	Retração autógena	Avaliação da retração autógena.
Song <i>et al.</i> (2019)	Fibra de carbono	Cimentícia	Concretos com fibras de carbono e escória de alto forno	Fluência à compressão e Retração por secagem	Investigar os efeitos da fibra de carbono (0,1% e 0,2%) e escória de alto forno (10% e 20%) no desempenho de retração por secagem e de fluência. Período: 180 dias.
Wang <i>et al.</i> (2019)	Fibra de carbono reciclada tratada com álcali	Cimentícia	Argamassa	Retração por secagem	Avaliação da retração por secagem com superfície de fibras de carbono tratadas com solução de NaOH como reforço de argamassas.
Gailitis <i>et al.</i> (2020)	Fibras curtas de carbono	Cimentícia	Cimento de geopolímero simples e reforçado com fibras de carbono	Fluência à compressão e Retração por secagem	Corpos de prova com 1% em peso de fibras de carbono foram investigados em relação aos efeitos do comportamento de fluência e retração ao longo prazo. Período: 150 dias.
Zhang <i>et al.</i> (2021)	Fibra de carbono curta (PRFC)	Matriz polimérica	Compósitos poliméricos	Fluência à tração	O comportamento de fluência de tração de compósitos reforçados com fibra curta de carbono é investigado em temperatura ambiente por ensaio de fluência de curto e longo prazo.

Tabela 1. Síntese dos estudos
Fonte: Elaboração própria (2021).

O reforço de fibras de carbono em vigas de concreto armado também foi avaliado por Al Chami (2009). Níveis de carga foram aplicados nas vigas para que se analisassem o risco de fluência (Figura 5). Para as diferentes vigas ensaiadas, o momento de fissuração variou de 1,40 a 1,45 kN.m. As larguras das fissuras eram medidas imediatamente após o carregamento e foram monitoradas durante o ensaio. Nos ensaios de fluência de longo prazo, a largura da fissura variou de 0,1 a 0,7 mm para vigas com reforço de fibras de carbono. Para as vigas sem o reforço, a largura chegou a 2,5 mm. No entanto, embora o PRFC reduza as deflexões imediatas, sua influência sobre deflexões de longo prazo será proporcional ao nível de aplicação da carga. Neste caso, conclui-se que o reforço de vigas de concreto com PRFC resulta em um ligeiro aumento na rigidez. Este aumento em rigidez influencia principalmente o curto prazo, sendo insignificante o comportamento de fluência de longo prazo. Já para Deskovic; Meier; Triantafillou (1995) um dos principais efeitos do carregamento sustentado para comportamento de estrutura híbrida é a redução da rigidez efetiva com o decorrer do tempo, o que pôde ser atribuído principalmente à transferência de tensões da fibra de vidro (PRFV) para a fibra de carbono (PRFC), em seu estudo.



Figura 5. Estrutura montada para medições das deformações de fluência de longo prazo em vigas. Fonte: Al Chami (2009).

Song *et al.* (2019) realizaram um estudo para avaliar a influência de fibras de carbono (0,1% e 0,2%) e escórias de alto forno (em substituição ao cimento) no concreto. Os autores verificaram que o concreto com adição de fibras de carbono apresentou uma boa resistência à fluência. Já a escória aumentou o coeficiente de fluência. Comparado ao concreto de referência, os concretos com reforço FC com 0,1% e 0,2% obtiveram reduções na deformação de fluência de 7,8% e 14,7%, respectivamente. Apesar da fibra de carbono ter ocasionado uma diminuição na resistência à compressão, a mesma ajudou a restringir a deformação, portanto, ocasionou menores coeficientes de fluência. Neste estudo, o maior teor utilizado (0,2% em volume) obteve a maior redução no coeficiente de fluência, no entanto, mais estudos devem ser realizados para que se compreenda sobre a utilização de volumes maiores de fibras de carbono.

Song *et al.* (2019) também estudaram o comportamento à retração durante 180 dias de ensaio. Assim como na fluência, a FC com 0,2% de volume do concreto proporcionou uma maior redução na retração de secagem, em 29%, e com 0,1% de fibra foi obtido uma média de 19,7% de redução em relação ao concreto com 0% de fibra. Uma boa dispersão das fibras de carbono na matriz do compósito é necessária para que se restrinja a deformação de volume, o que ocasiona menor tensão de fluência e menor retração, pois as FC são capazes de introduzir mais poros às matrizes cimentícias.

Segundo Baldenebro-Lopez *et al.* (2014), as propriedades de compósitos cimentícios são melhoradas com a adição de fibra de carbono. Entretanto, com um alto volume de fibras de carbono há um provável índice de vazios maior no concreto, o que afeta diretamente suas propriedades. Além disso, uma vez que seu comportamento mecânico se dá principalmente pela estabilidade da interface fibra-matriz, que é responsável por transferir a tensão da matriz para a fibra, para o uso eficaz da fibra de carbono é necessária uma dispersão uniforme por toda a mistura, o que caracteriza a melhoria da adesão. As características microestruturais da interface são a principal influência das propriedades macroscópicas destes compósitos (Cui *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2013).

Conforme o estudo feito por Khadraoui (2012), a presença de fibras de carbono tornou possível limitar a propagação de fissuras, reduzindo assim a cinética de fluência. Aos 2 dias de idade, a deformação de fluência foi reduzida em 41%; em 7 dias, 67% e para a observação de 28 dias, 73% de redução. Chen & Chung (1996) verificaram que a utilização de baixos teores de fibras podem ser importantes para o alcance de avaliações satisfatórias. Fibras curtas de carbono (5 mm) em 0,5% do peso do cimento (0,19% em volume do concreto), juntamente com sílica ativa, foram utilizadas em concretos. Os autores relataram que o reforço de fibras de carbono ajudou muito na redução da retração pelo aumento da tenacidade à flexão dos concretos. Foi obtida uma diminuição de 84% da retração de secagem aos 14 dias, em comparação ao concreto referência, sendo a tensão de retração de apenas $1,9 \times 10^5$ mm. O ensaio se baseou na norma ASTM C490-83a (ASTM, 1983). Além disso, a utilização das fibras de carbono e da sílica ativa (em 0,15% do peso de cimento), além de diminuir a retração de concretos, aumentou a resistência à flexão, resistência gelo-degelo e durabilidade, com boa resistência aos ataques químicos.

Tratamentos realizados nas superfícies das fibras de carbono também podem ser eficazes para a boa adesão com a matriz cimentícia. Wang *et al.* (2019) realizaram um tratamento na FC com solução NaOH 1mol/L anterior a incorporação nos compósitos. Os autores verificaram uma redução de 32,5% na retração por secagem em relação às argamassas tradicionais. A redução da secagem com a incorporação das fibras foi explicada pela forma que elas são distribuídas de maneira aleatória na matriz, com apenas algumas das fibras sendo paralelo à distribuição de tensão. Dessa forma, quando o compósito encolhe, essas fibras orientadas paralelamente à tensão suprimem as tensões da retração. Neste caso, a fibra inibe o encolhimento através do cisalhamento da interface fibra-matriz. Como resultado, a retração de secagem é reduzida quando as fibras de carbono são adicionadas às matrizes.

Ascione (2008) propôs um estudo sobre FC em matrizes poliméricas, os dados experimentais relativos às primeiras horas do ensaio de fluência mostraram uma limitação na deformação nos corpos de prova ensaiados, revelando que para fluência primária, este estado é desprezível. O percentual de variações de deformações longitudinais de tensão final para as especificações superior, média e inferior são iguais a 1,66%; 1,71% e 1,93%, respectivamente. Esses dados confirmam a eficácia das fibras de carbono em limitar fluência primárias de laminados PRFC,

caracterizadas por alto módulo de elasticidade e fração de alto volume de fibra. Os dados experimentais foram registrados até cerca de 500 dias, porém não exibiu qualquer aumento mais relevante a ser considerado quanto às deformações longitudinais das amostras.

Assim como Ascione (2008); Zhang *et al.* (2021) e Goertzen & Kessler (2006) também avaliaram os efeitos de fibras de carbono em matrizes poliméricas, Zhang *et al.* (2021) avaliaram os compósitos até elevadas temperaturas e os resultados mostraram que o tratamento térmico da superfície da fibra leva a uma resistência à fluência relativamente alta. Os autores relataram que um maior teor de fibra de carbono pode aumentar a resistência à fluência, quando se admite a fluência de curto prazo. Enquanto isso, o tratamento térmico de superfície de fibra de carbono não só aumenta a resistência mecânica de tração, mas também a resistência à fluência, fortalecendo as interações da interface fibra-matriz. Quando a temperatura é superior a 195°C, a ruptura por fluência pode ser observada após uma hora e meia em um estado de baixa tensão. Os autores concluíram que a temperatura de 30°C pode ter uma influência de redução quanto ao coeficiente de fluência.

O cimento de geopolímero reforçado com 1% em peso de fibras curtas de carbono foi investigado por Gailitis *et al.* (2020) em relação aos efeitos da deformação de longo prazo, com ensaios de retração e fluência durante 150 dias. As deformações de fluência foram submetidas à compressão constante e uniforme, os corpos de prova foram submetidos a uma carga de 20% de sua resistência à compressão final. Placas de alumínio (10 x 15 mm) foram coladas aos corpos de prova, além dos indicadores de deformação para a realização dos ensaios (Figura 6). As análises indicaram que a deformação de fluência foi maior para os espécimes reforçados com FC, com um aumento de 12% em relação aos espécimes de referência (cimento geopolímero simples). A resistência à compressão das amostras foi avaliada antes e depois dos testes de fluência e retração. Os autores relataram que FC em até 1% não modificou muito a fluência dos compósitos em relação ao longo prazo, visto que havendo dois grupos (fluência a partir de 30 e 62 dias), amostras com 30 dias de idade obtiveram um aumento de 8% em relação à resistência à compressão dos espécimes que realizaram ensaios de fluência a partir de 62 dias. Mudanças microestruturais durante o carregamento de longo prazo podem explicar estes resultados, porém

os autores deixam lacunas abertas para que pesquisas mais profundas expliquem tais fenômenos e o comportamento de compósitos após ensaios de longo prazo de fluência.



Figura 6. Estrutura para ensaio de fluência com os indicadores de deformação ajustados.

Fonte: Gailitis et al. (2020).

Wongtanakitcharoen & Naaman (2007) avaliaram a adição de microfibras para controle de retração. No entanto, os autores realizaram comparativos entre fibras de carbono, polipropileno e PVA como reforço de vigas de concretos armado, alterando os volumes de 0,1%, 0,2%, 0,3% e 0,4%. Observou-se que alguns parâmetros da fibra como módulo de elasticidade, aspecto da fibra e interface fibra-matriz não pareceu ter efeitos significativos sobre a retração do concreto durante as primeiras 24 horas de idade. A adição de FC e as demais fibras utilizadas, em até 0,4% em volume, levaram uma diminuição média de 34% na retração livre até as 24 horas de idade. Na fração de volume de 0,1% a diminuição média da retração foi de cerca de 30%. Desse modo, tal estudo chegou a conclusão que a relação entre retração e a perda cumulativa de água devido à evaporação não é muito influenciada devido à adição de fibras, no entanto, a presença de fibras reduz a sua tensão de encolhimento.

Já para Kim *et al.* (2018), os resultados do ensaio de retração mostraram que a adição de fibras de carbono inibe a reação de hidratação durante o estágio inicial de cura, reduzindo assim o encolhimento autógeno de pastas e argamassas. No entanto, o efeito da incorporação das fibras é mais eficaz em argamassas de baixa relação água/cimento e quando houve dispersão das fibras e nanotubos de carbono de forma eficiente pela matriz cimentícia. Os agentes de dispersão utilizados pelos autores para o desenvolvimento das propriedades mecânicas foram superplastificante do tipo policarboxilato e sílica ativa.

4. COMPORTAMENTO DE FLUÊNCIA EM CONCRETOS PRÉ-FISSURADOS

Com base na literatura consultada, foi observado que o estudo de fluência de concretos pré-fissurados reforçados com fibras (Figura 7) ainda é limitado, e não foram encontrados estudos com utilização das fibras de carbono como reforço.

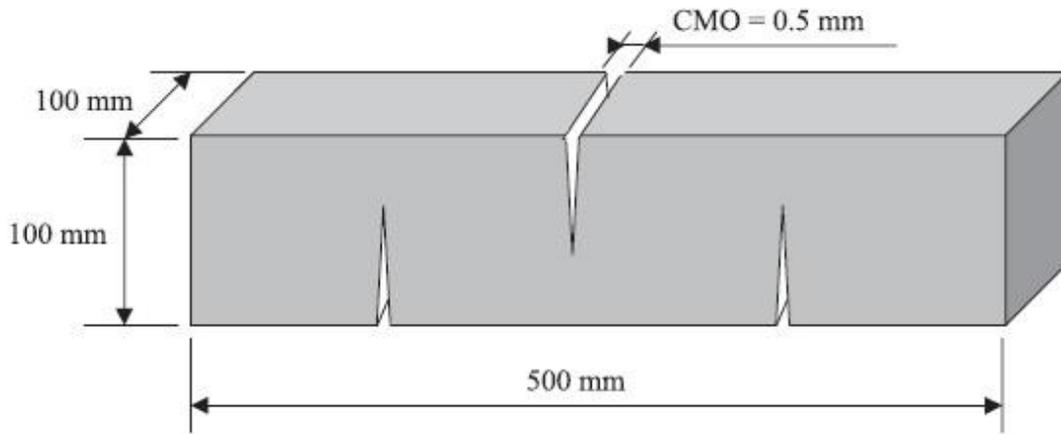


Figura 7. Posições de fissuras
Fonte: Granju & Balouch (2005).

Nesse sentido, devido à falta de estudos sobre o comportamento de fluência em compósitos pós-fissurados com FC, o estudo pretendeu identificar algumas contribuições com base em outros tipos de fibras poliméricas.

Pujadas *et al.* (2017) exploraram a fluência pós-fissuração de vigas de concreto armado reforçada com fibras de plástico estabelecendo um comparativo com as vigas de fibras de aço. As vigas (150 mm x 150 mm x 600 mm) pré-fissuradas estavam com 3 aberturas de fissuras (0,25 mm, 1,5 mm e 2,5 mm) e foram submetidas a um ensaio de fluência à flexão durante 5 meses em duas condições diferentes de ambiente (sala com e sem temperatura controlada). Os resultados mostraram que o coeficiente de fluência do compósito com fibras de plástico é 2 vezes maior do que o do compósito com fibras de aço.

Foi relatado por Pujadas *et al.* (2017) que o aumento da largura da fissura causada pela fluência em vigas com fibras de plástico foi entre 6 e 10 vezes maior quando comparadas com vigas com fibras de aço. Isso pode ser causado pelo próprio deslocamento da fibra de plástico dentro da matriz. Por exemplo, para larguras maiores (2,5 mm), o dano induzido pelo pré-fissuramento em conjunto com a carga aplicada de fluência favoreceu ao enfraquecimento da ligação fibra-matriz, dessa forma foi observado um dano severo na matriz de fibra de plástico.

Pujadas *et al.* (2017) explicaram que as fibras não chegaram quebrar durante a análise, porém o aumento da largura da fissura no momento de ensaio de fluência favoreceu o deslocamento e arrancamento da fibra, e reduziu progressivamente a resistência à tração fornecida. Um aumento adicional da abertura da fissura gerou um efeito de acumulação que acelerou a taxa de fluência causando a sua falha, fenômeno explicado pela fluência terciária. Os autores recomendaram que o uso de fibras plásticas como reforço de vigas de concreto não deve ser rejeitado, mas para sua utilização é necessário que uma fluência adicional seja considerada em projeto e que as larguras das fissuras sejam limitadas para reduzir o risco do alcance da fluência terciária (Figura 8).



Figura 8. Falha causada pelo estágio de fluência terciária

Fonte: Pujadas et al. (2017)

Boshoff *et al.* (2009) relataram resultados de ensaio de fluência para compósitos cimentícios do tipo SHCC (*strain hardening cementitious composites*), estes compósitos são reforçados com fibras poliméricas e possuem como principal vantagem ganho de resistência pós-fissuração. Neste caso, foi importante realizar ensaios de fluência à tração de SHCC com fibras de PVA fissurados, pois o principal benefício destes concretos é dado após esta condição e tem esse uso pretendido. Os espécimes foram carregados com cargas de 30%, 50%, 70% e 80% da resistência final. Os autores verificaram que o pull-out da fibra é dependente do tempo e é uma fonte significativa de deformação, juntamente com a formação de novas fissuras no SHCC sob a carga sustentada. As fibras se retraem da matriz, não contribuindo significativamente na fluência à tração. Com o tempo de ensaio, o SHCC tende a formar novas fissuras que é devido ao arrancamento (*pull-out*) da fibra na ligação fibra-matriz.

Se tratando de fluência de concretos com fibras, em geral, Zhao *et al.* (2016) relataram que fibras com módulo de elasticidade maior do que o concreto simples pode restringir à fluência do concreto, como fibras de aço e carbono. No entanto, aquelas com módulo de elasticidade menor do que o do concreto simples tendem a enfraquecer a interface fibra-matriz e, portanto, aumentar sua fluência. Isso pode acontecer com utilização de fibras de PVA e polipropileno. Desse modo, o módulo de elasticidade das fibras pode ser um fator muito significativo, o qual influencia a fluência de concretos reforçados com fibras.

5. OPORTUNIDADES DE PESQUISA

Há algumas lacunas de conhecimento com relação ao comportamento de fluência e retração quando se trata do reforço com fibras de carbono. Observou-se que ainda é um fenômeno complexo, pouco estudado no meio técnico-científico, principalmente no que diz respeito à fluência.

De forma geral, na presente revisão de literatura foram identificados estudos que avaliaram a influência de aspecto do tamanho da fibra (mm), tipo de fibra (Pitch e PAN), e percentual (volume) da fibra utilizada nos compósitos; aspectos do tipo de fluência; aspectos do tipo de compósito: fluência de concretos reforçados com laminados de carbono (PRFC); fluência de compósitos poliméricos e compósitos cimentícios (concreto simples, argamassas e pastas de cimento); aspectos de condições de cura e níveis de carga aplicada; também foram identificados estudos que avaliaram a retração, por secagem e autógena, de compósitos cimentícios reforçados com fibras de carbono.

Como sequência do estudo destas propriedades, há algumas lacunas que podem ser solicitadas como sugestões para trabalhos futuros. Quais são apresentadas a seguir:

- i. Avaliação da fluência pós-fissuração de vigas de concreto reforçadas com fibras de carbono;
- ii. Análise do comportamento de fluência e retração de compósitos após exposição em temperaturas elevadas;
- iii. Comportamento de fluência e retração em concretos de ultra alto desempenho (CUAD) reforçados com fibras de carbono;
- iv. Investigação da fluência em estruturas de concreto reforçados com fibras de aço e carbono sob carga sustentada expostas ao ambiente marinho.

6. CONCLUSÃO

Com algumas características semelhantes às fibras de aço, quais são as mais comercialmente utilizadas, as fibras de carbono possuem boa resistência à tração, alto módulo de elasticidade e boa resistência à deformação, e devem ser cada vez mais utilizadas como reforço em estruturas de concreto, inclusive em concretos de alto desempenho que são utilizados em ambientes hostis.

Com base no presente estudo, observou-se que em relação às propriedades de fluência e retração de concretos com fibras de carbono, todos os autores aqui apresentados indicaram uma redução do coeficiente de fluência e retração. O reforço de FC possivelmente influencia nestas reduções devido ao aumento da tenacidade à flexão dos concretos. Mas também é importante ressaltar a influência do volume utilizado. A FC é capaz de introduzir mais poros à matriz cimentícia, os estudos observados relataram boas condições de uso para baixos teores de fibras, mais pesquisas devem ser realizadas para que se compreenda sobre a utilização de volumes maiores (acima de 0,5% de peso do cimento). O mesmo ocorre em relação ao tamanho das fibras, os compósitos com fibras curtas tendem a apresentar menor encolhimento, no entanto, ainda faltou uma maior exploração com as fibras mais longas, principalmente em relação à fluência.

Alguns estudos relataram que a fibra de carbono tem grande influência na capacidade que o compósito resiste à fluência, principalmente quando a fibra utilizada possui um módulo de elasticidade maior do que o do concreto. No entanto, em alguns casos poderão existir defeitos internos na fibra que irão diminuir a sua capacidade de resistência à deformação. Também foi observado que para o uso eficaz das fibras de carbono no concreto há necessidade de boa dispersão na matriz cimentícia. Algumas medidas para a dispersão foram a inclusão de sílica ativa, uso de aditivos do tipo superplastificante na mistura e tratamentos na superfície das fibras são muito indicados.

Foi observado que o estudo de fluência de concretos pré-fissurados reforçados com fibras também é bastante limitado, e não foram encontrados estudos com utilização das fibras de carbono como reforço. Dessa forma, a presente revisão de literatura mostra que o comportamento de fluência e retração de compósitos reforçados com fibras de carbono e PRFC ainda busca avanços pertinentes ao tema.

REFERÊNCIAS

- American Concrete Institute – ACI (1992). *Prediction of creep, shrinkage, and temperature effects in concrete structures*. Committee 209, American Concrete Institute, Detroit.
- Al Chami, G., Thériault, M., & Neale, K. W. (2009). Creep behaviour of CFRP-strengthened reinforced concrete beams. *Construction and Building Materials*, 23(4), 1640-1652. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.09.006>
- American Society for Testing and Materials – ASTM (1983). *ASTM C490*, Revision 83A, May 27, 1983 - Standard specification for use in measurement of length change of hardened cement paste, mortar, and concrete. ASTM International.
- Ascione, F., Berardi, V. P., Feo, L., & Giordano, A. (2008). An experimental study on the long-term behavior of CFRP pultruded laminates suitable to concrete structures rehabilitation. *Composites Part B: Engineering*, 39(7-8), 1147-1150. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2008.03.008>
- Arockiasamy, M., Chidambaram, S., Amer, A., & Shahawy, M. (2000). Time-dependent deformations of concrete beams reinforced with CFRP bars. *Composites Part B: Engineering*, 31(6-7), 577-592. [https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(99\)00045-1](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(99)00045-1)
- Azhari, F., & Banthia, N. (2012). Cement-based sensors with carbon fibers and carbon nanotubes for piezoresistive sensing. *Cement and Concrete Composites*, 34(7), 866-873. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.04.007>
- Baldenebro-Lopez, F. J., Castorena-Gonzalez, J. H., Baldenebro-Lopez, J. A., Velazquez-Dimas, J. I., Ledezma-Sillas, J. E., Martinez-Sanchez, R., & Herrera-Ramirez, J. M. (2014). Cement-matrix composites reinforced with carbon fibers as a multifunctional material. *Microscopy and Microanalysis*, 20(S3), 1880-1881. <https://doi.org/10.1017/S1431927614011131>
- Banthia, N., Djeridane, S., & Pigeon, M. (1992). Electrical resistivity of carbon and steel micro-fiber reinforced cements. *Cement and Concrete research*, 22(5), 804-814. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(92\)90104-4](https://doi.org/10.1016/0008-8846(92)90104-4)
- Bolat, H., Şimşek, O., Çullu, M., Durmuş, G., & Can, Ö. (2014). The effects of macro synthetic fiber reinforcement use on physical and mechanical properties of concrete. *Composites Part B: Engineering*, 61, 191-198. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.01.043>
- Boshoff, W. P., Mechtcherine, V., & van Zijl, G. P. (2009). Characterising the time-dependant behaviour on the single fibre level of SHCC: Part 1: Mechanism of fibre pull-out creep. *Cement and Concrete Research*, 39(9), 779-786. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.06.007>

- Chen, P. W., & Chung, D. D. L. (1996). Low-drying-shrinkage concrete containing carbon fibers. *Composites Part B: Engineering*, 27(3-4), 269-274. [https://doi.org/10.1016/1359-8368\(95\)00020-8](https://doi.org/10.1016/1359-8368(95)00020-8)
- Cui, H., Jin, Z., Zheng, D., Tang, W., Li, Y., Yun, Y., Lo, T., & Xing, F. (2018). Effect of carbon fibers grafted with carbon nanotubes on mechanical properties of cement-based composites. *Construction and Building Materials*, 181, 713-720. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.049>
- Deskovic, N., Meier, U., & Triantafillou, T. C. (1995). Innovative design of FRP combined with concrete: long-term behavior. *Journal of Structural Engineering*, 121(7), 1079-1089. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1995\)121:7\(1079\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1995)121:7(1079))
- Domski, J., Katzer, J., Zakrzewski, M., & Ponikiewski, T. (2017). Comparison of the mechanical characteristics of engineered and waste steel fiber used as reinforcement for concrete. *Journal of Cleaner Production*, 158, 18-28. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.165>
- Eisa, A. S., Elshazli, M. T., & Nawar, M. T. (2020). Experimental investigation on the effect of using crumb rubber and steel fibers on the structural behavior of reinforced concrete beams. *Construction and Building Materials*, 252, 119078. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119078>
- Gailitis, R., Sliseris, J., Korniejenko, K., Mikula, J., Lach, M., Pakrastins, L., & Sprince, A. (2020). Long-Term Deformation Properties of a Carbon-Fiber-Reinforced Alkali-Activated Cement Composite. *Mechanics of Composite Materials*, 56(1), 85-92. <https://doi.org/10.1007/s11029-020-09862-w>
- Goertzen, W. K., & Kessler, M. R. (2006). Creep behavior of carbon fiber/epoxy matrix composites. *Materials Science and Engineering: A*, 421(1-2), 217-225. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.01.063>
- Granju, J. L., & Balouch, S. U. (2005). Corrosion of steel fibre reinforced concrete from the cracks. *Cement and Concrete Research*, 35(3), 572-577. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.032>
- Guerini, V., Conforti, A., Plizzari, G., & Kawashima, S. (2018). Influence of steel and macro-synthetic fibers on concrete properties. *Fibers*, 6(3), 47. <https://doi.org/10.3390/fib6030047>
- Khadraoui, F. (2012). Creep and shrinkage behaviour of CFRP-reinforced mortar. *Construction and Building Materials*, 28(1), 282-286. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.048>
- Kim, G. M., Yoon, H. N., & Lee, H. K. (2018). Autogenous shrinkage and electrical characteristics of cement pastes and mortars with carbon nanotube and carbon fiber.

- Kromoser, B., Preinstorfer, P., & Kollegger, J. (2019). Building lightweight structures with carbon-fiber-reinforced polymer-reinforced ultra-high-performance concrete: Research approach, construction materials, and conceptual design of three building components. *Structural Concrete*, 20(2), 730-744. <https://doi.org/10.1002/suco.201700225>
- Mosavinejad, S. G., Langaroudi, M. A. M., Barandoust, J., & Ghanizadeh, A. (2020). Electrical and microstructural analysis of UHPC containing short PVA fibers. *Construction and Building Materials*, 235, 117448. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117448>
- Liu, B., Liu, Z., Wang, X., Zhang, G., Long, S., & Yang, J. (2013). Interfacial shear strength of carbon fiber reinforced polyphenylene sulfide measured by the microbond test. *Polymer testing*, 32(4), 724-730. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2013.03.020>
- Mousavi, S. M., Ranjbar, M. M., & Madandoust, R. (2019). Combined effects of steel fibers and water to cementitious materials ratio on the fracture behavior and brittleness of high strength concrete. *Engineering Fracture Mechanics*, 216, 106517. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2019.106517>
- Park, S. B., & Lee, B. I. (1993). Mechanical properties of carbon-fiber-reinforced polymer-impregnated cement composites. *Cement and Concrete Composites*, 15(3), 153-163. [https://doi.org/10.1016/0958-9465\(93\)90004-S](https://doi.org/10.1016/0958-9465(93)90004-S)
- Park, S. B., Lee, B. I., & Lim, Y. S. (1991). Experimental study on the engineering properties of carbon fiber reinforced cement composites. *Cement and concrete research*, 21(4), 589-600. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(91\)90110-4](https://doi.org/10.1016/0008-8846(91)90110-4)
- Pujadas, P., Blanco, A., Cavalaro, S., De la Fuente, A., & Aguado, A. (2017). The need to consider flexural post-cracking creep behavior of macro-synthetic fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 149, 790-800. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.166>
- Pyo, S., Tafesse, M., Kim, H., & Kim, H. K. (2017). Effect of chloride content on mechanical properties of ultra high performance concrete. *Cement and Concrete Composites*, 84, 175-187. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.09.006>
- Raj, B., Sathyan, D., Madhavan, M. K., & Raj, A. (2020). Mechanical and durability properties of hybrid fiber reinforced foam concrete. *Construction and Building Materials*, 245, 118373. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118373>
- Sadrinejad, I., Madandoust, R., & Ranjbar, M. M. (2018). The mechanical and durability properties of concrete containing hybrid synthetic fibers. *Construction and Building Materials*, 178, 72-82. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.145>

- Song, W., Yi, J., Wu, H., He, X., Song, Q., & Yin, J. (2019). Effect of carbon fiber on mechanical properties and dimensional stability of concrete incorporated with granulated-blast furnace slag. *Journal of Cleaner Production*, 238, 117819. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117819>
- Sun, M. Q., Li, J., Wang, Y. J., & Zhang, X. Y. (2015). Preparation of carbon fiber reinforced cement-based composites using self-made carbon fiber mat. *Construction and Building Materials*, 79, 283-289. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.060>
- Tang, S.; Huang, D., & He, Z. (2021). A review of autogenous shrinkage models of concrete, *Journal of Building Engineering*, 103412. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103412>
- Wang, Y., Zhang, S., Li, G., & Shi, X. (2019). Effects of alkali-treated recycled carbon fiber on the strength and free drying shrinkage of cementitious mortar. *Journal of Cleaner Production*, 228, 1187-1195. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.295>
- Wongtanakitcharoen, T., & Naaman, A. E. (2007). Unrestrained early age shrinkage of concrete with polypropylene, PVA, and carbon fibers. *Materials and structures*, 40(3), 289-300. <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9106-z>
- Yoo, D. Y., Gim, J. Y., & Chun, B. (2020a). Effects of rust layer and corrosion degree on the pullout behavior of steel fibers from ultra-high-performance concrete. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(3), 3632-3648. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.01.101>
- Yoo, D. Y., Shin, W., & Chun, B. (2020b). Corrosion effect on tensile behavior of ultra-high-performance concrete reinforced with straight steel fibers. *Cement and Concrete Composites*, 109, 103566. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103566>
- Zhang, Y. Y., Sun, Z., Li, Y. Q., Huang, P., Chen, Q., & Fu, S. Y. (2021). Tensile creep behavior of short-carbon-fiber reinforced polyetherimide composites. *Composites Part B: Engineering*, 212, 108717. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108717>
- Zhao, Q., Yu, J., Geng, G., Jiang, J., & Liu, X. (2016). Effect of fiber types on creep behavior of concrete. *Construction and Building Materials*, 105, 416-422. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.149>

Fontes de financiamento: Esta pesquisa foi financiada pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Declaração de conflito de interesses: Os autores declaram não haver conflito de interesses.



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia - Texto completo de la licencia](#)