



REFORÇO ESTRUTURAL DE PILARES UTILIZANDO COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM FIBRAS

SANTANA, Luana Godinho L. de (1); MAGALHÃES, Margareth da Silva (2)

(1) Universidade Federal do Rio de Janeiro, luana_ladeira@hotmail.com

(2) Universidade Federal do Rio de Janeiro, margarethsm@yahoo.com.br

RESUMO

Neste artigo serão abordados aspectos relacionados a reforços estruturais em pilares de concreto armado utilizando materiais compósitos cimentícios reforçados com fibras com o objetivo de estudar teoricamente suas principais características. A utilização do compósito polimérico reforçado com fibras (PRF) teve como objetivo eliminar problemas de corrosão que existiam em técnicas de colagem de chapas de aço após longo período de exposição. No entanto, o PRF apresenta algumas desvantagens, como a incompatibilidade da resina com o substrato de concreto e pouco desempenho em altas e baixas temperatura. O uso de compósitos cimentícios têxteis e os compósitos cimentícios de alto desempenho com fibras curtas dispersas na matriz como reforço de elementos estruturais foi iniciado com o objetivo de melhorar algumas destas desvantagens do PRF, assim, com a utilização da matriz cimentícia o reforço apresentou melhor compatibilidade com a superfície de concreto além de trabalhar melhor em elevadas temperaturas e em superfícies molhadas, apresentando um eficiente desempenho. Ambos os sistemas de reforços estruturais com compósito cimentícios reforçados com fibra melhoram a resistência e a capacidade de deformação da estrutura. Sendo assim, este artigo, tem como objetivo a apresentação das singularidades do uso de compósitos cimentícios têxteis e compósitos cimentícios de alto desempenho para entender melhor qual método é mais viável como reforço de pilares confinados

Palavras-chave: Reforço estrutural, Concreto armado, Compósitos cimentícios reforçados com fibras.

ABSTRACT

This article will address aspects related to structural reinforcement in reinforced concrete pillars using fiber-reinforced cementitious composites materials in order to theoretically study their main characteristics. The use of fabric-reinforced polymers (FRP) aimed to eliminate corrosion problems that existed in steel sheet bonding techniques after a long period of exposure. However, FRP has some disadvantages, such as the incompatibility of the resin with the concrete substrate and poor performance at high and low temperatures. The use of textile cementitious composites and high performance cementitious composites with short fibers dispersed in the matrix as reinforcement of structural elements was initiated with the objective of improving some of these disadvantages of FRP, thus, with the use of the cementitious matrix the strengthening showed better compatibility with the concrete surface and work better at high temperatures and on wet surfaces, presenting an efficient performance. Both systems of structural reinforcements with cementitious composite reinforced with fiber improve the strength and deformation capacity of the structure. Thus, this article aims to present the singularities of the use of high performance textile and cementitious composites to better understand which method is more viable as reinforcement of confined columns.

Keywords: Structural Reinforcement, Reinforced concrete, Fiber reinforced cementitious composite.

1 INTRODUÇÃO

O concreto é um material compósito composto por uma matriz cimentícia, a pasta, e outras fases como areia e brita. Sua maior desvantagem é o seu comportamento frágil, baixa resistência à tração e ao impacto e baixa deformação (Banthia, N. et al., 2013). Devido a estas características, é comum a formação de fissuras na sua superfície seja devido à retração, variação de temperatura, carregamentos atuantes ou outros fatores, fazendo com que a degradação seja um caminho natural e por consequência disso, a necessidade de reparos.

Para solucionar diversos problemas de degradação ou falhas das estruturas de concreto armados vários métodos de reparos e reforços estruturais começaram a ser desenvolvidos. Segundo, Awani et al. (2017), desde os anos oitenta, o compósito polimérico reforçado com fibra tem ganhando popularidade como material de reforço para estruturas de concreto.

O sistema de reforço com a utilização do polímero reforçado com fibra (PRF ou do inglês *Fabric-Reinforced Polymers* - FRP) é uma técnica que utiliza um tecido imerso em uma matriz polimérica, geralmente a resina epóxi. Segundo diversos autores (Awani et al., 2016; Donnini et al., 2019; Hajirasouliha e Thermou, 2018, Colajanni et al., 2014 e Shang et al., 2019), este sistema tem como vantagem, a alta resistência à corrosão, elevada resistência a tração, grande rigidez, excelente durabilidade, alta relação resistência-densidade, alta versatilidade, relativa facilidade e velocidade de aplicação, adaptabilidade da técnica a diferentes tipos de elementos estruturais e seu custo-benefício. Ela é aplicada em um processo de conformação por laminação manual envolvendo a aplicação por camadas.

Apesar de suas vantagens, o sistema de PRF apresenta alguns inconvenientes que são citados por diversos autores (Zhuge & Al-Gemeel, 2018, Awani et al., 2017, Donnini et al., 2019, Hajirasouliha e Thermou, 2018, Colajanni et al., 2014 e Shang et al., 2019) como a incompatibilidade da resina epóxi com o substrato do concreto gerando a delaminação do compósito e a perda da eficiência do reforço, inaplicabilidade em superfícies molhadas ou vapor, baixa respirabilidade, seus escombros podem ser classificados como materiais perigosos podendo ser descartados sem as devidas precauções, pouco desempenho em altas e baixas temperaturas e incompatibilidade térmica com o substrato.

Devido aos problemas encontrados com o uso do PRF como reforço, começou-se a estudar novos materiais para reforço de estruturas como o sistema de reforço com a matriz cimentícia reforçada com tecido (do inglês *Fabric-Reinforced Cementitious Matrix* - FRCM) e os compósitos cimentícios de alto desempenho (do inglês *strain hardening cementitious composite* - SHCC). Awani et al. (2017) e Colajanni et al. (2014), citam que o FRCM (também chamado de *Textile-Reinforced mortar* - TRM, Mineral-

Based Composite - MBC ou Textile– Reinforced Concrete - TRC) surgiu como uma alternativa para evitar problemas associados ao polímero reforçado com fibra (PRF).

O FRCM é um compósito de base cimentícia (geralmente argamassa) reforçado com um tecido, no entanto Donnini et al. (2019) ponderam que a matriz inorgânica do FRCM não necessariamente é à base de cimento, mas também pode consistir em argamassa à base de cal ou geopolímero. Neste sistema é importante o tipo de tecido utilizado, de forma que não ocorram problemas de penetração da argamassa no tecido prejudicando o intertravamento mecânico e melhor interação dos dois materiais.

De acordo com Donnini et al. (2019) e Awani et al. (2017), o reforço com FRCM garante melhor compatibilidade com o substrato de concreto, melhor resistência ao calor e ao fogo e pode ser aplicado em superfícies molhadas.

Awani et al. (2017), citam que o sistema é aplicado em um processo de laminação manual da mesma forma que o PRF, aplicando a camada de argamassa e depois a camada do tecido sendo importante que cada camada seja aplicada antes da pega da camada anterior para melhor aderência. Os autores também ressaltam a possibilidade de realizar a ancoragem do reforço utilizando um encaixe no substrato de concreto com fios de PRF para melhorar a ligação do reforço de FRCM com a superfície de concreto. A ancoragem apropriada pode aumentar o travamento do reforço no concreto e retardar a ruptura por descolamento na interface tecido-matriz e concreto-reforço resultando em um maior ganho de resistência.

Assim, este artigo tem como objetivo apresentar uma revisão da literatura sobre os sistemas de reforços estruturais para pilares confinados com compósitos cimentícios reforçados com fibras tendo em vista os seus benefícios em relação aos métodos mais tradicionais de reforço que são com chapas de aço e o compósito de PRF.

2 SISTEMAS DE REFORÇO COM COMPÓSITO TÊXTEL (FRCM)

Wu e Teng (2003) empregaram FRCM reforçado com tecido unidirecional de carbono para confinamento de amostras de concreto cilíndricas e encontraram alta resistência à compressão e ductilidade do material confinado.

Triantafilou et al. (2006) usaram o FRCM para confinamento de amostras de concreto com seção transversal cilíndricas e retangular. Os autores encontraram alta resistência à compressão e ductilidade. Porém, comparado ao sistema de confinamento com PRF o sistema FRCM utilizado pelos autores foi menos efetivo, apresentando uma redução de aproximadamente 80% para resistência e 50% para a deformação última.

Redução desta ordem também foi encontrada no trabalho de Colajanni et al. (2012). No entanto, Triantafilou et al. (2006) ressaltam que esta redução no desempenho foi mais pronunciada nas amostras cilíndricas que em amostras com seção transversal retangular e que também depende do tipo de compósito utilizado.

Na pesquisa de Donnini et al. (2019), foi utilizado um tecido unidirecional de PBO (*Polyparaphenylene-benzo-bisthiazole*) e tecidos unidirecional e bidirecional de carbono. O FRCM apresentou uma eficiência ligeiramente inferior ao PRF, devido à dificuldade da matriz cimentícia penetrar entre os filamentos do reforço fazendo com que a aderência desenvolvida na interface entre o tecido e a matriz fosse reduzida. Eles esclarecem que a aderência desenvolvida na interface entre o tecido e a argamassa não é alta como no caso do sistema de PRF, que utiliza o tecido com a resina epóxi, pois a viscosidade e a granulometria da argamassa podem prejudicar a sua penetração completa no tecido.

Donnini et al. (2019), verificaram que a resistência à compressão dos cilindros confinados com sistema de FRCM utilizando tecido de carbono foram cerca de 30% inferiores que os sistemas com a resina epóxi (PRF) e tecido de carbono e 17% inferior quando foi utilizado tecidos PBO. Concluíram que o tecido de carbono foi menos eficiente que o tecido de PBO para o sistema de FRCM, pois a superfície lisa da fibra de carbono, a ausência de ligações químicas fortes na interface da fibra com a matriz e o deslizamento relativo das fibras no tecido de carbono não permitiram a total eficiência do compósito. No caso do tecido de PBO, foi observado o comportamento de enrijecimento (*strain-hardening*) durante o deslizamento da fibra enquanto com o tecido de carbono, a tensão foi quase constante e a curva foi quase uma reta constante próximo da ruptura. Como alternativa para tecidos com fibras com menor aderência, ele cita que podem ser utilizados revestimentos ou promotores de adesão aplicados em sua superfície para aumentar a aderência da fibra com a matriz.

2.1 Fatores que afetam a capacidade de colunas reforçadas com FRCM

Colajanni et al. (2014), ao estudar corpos-de-prova cilíndricos com FRCM-PBO, observaram que o desempenho do concreto confinado com FRCM depende da relação volumétrica de fibras no compósito, como era de se esperar. No estudo foi utilizado diferentes razões volumétricas ($\rho = 0,354\%$ e $\rho = 0,236\%$) de fibras de PBO no compósito, para corpos de prova cilíndricos e quadrados. Para uma maior relação volumétrica ($\rho = 0,354\%$) foi observado um comportamento de strain hardening do concreto confinado com FRCM e um aumento da resistência à compressão de 51% em relação à amostra sem reforço. Para o concreto confinado com FRCM de menor relação volumétrica de fibras ($\rho = 0,236\%$) foi observado um comportamento de amolecimento após a primeira fissura e um aumento

da resistência à compressão de aproximadamente 23% em relação à amostra sem o reforço

Colajanni et al. (2014), explicam que a eficiência do sistema de confinamento com FRCM está estreitamente relacionada a rigidez do conjunto argamassa com o tecido utilizado, de acordo com os seguintes parâmetros: a espessura e rigidez da fibra, número de camadas utilizadas, a aderência entre a fibra e a argamassa, o qual é relacionada com as suas propriedades mecânicas, e a espessura da camada de argamassa.

Segundo Triantafillou et al. (2006), e Trapko (2013), quando uma ou duas camadas de tecido com mesma relação volumétrica de confinamento da fibra é utilizada, a resistência a compressão e capacidade de deformação aumenta mais para o sistema de PRF do que para o sistema de FRCM, devido a problemas de aderência da fibra com a matriz do compósito. Contudo o FRCM foi capaz de promover um aumento significativo na resistência e ductilidade utilizando três camadas de tecido, atribuído ao efeito favorável provocado pela influência da argamassa em aumentar a rigidez da camada e a sua habilidade de transportar carga, principalmente se utilizar argamassa de alta resistência.

Uma das desvantagens da utilização de PRF é a baixa resistência a elevadas temperaturas, a qual provoca a degradação do compósito (Colajanni et al., 2014), redução da sua capacidade de carga e da sua aderência com o concreto (Kaminski et al., 2008, Qin-Yong et al., 2007, Issa, 2007 e Al-Salloum et al., 2011).

Trapko (2013) em sua pesquisa verificou que o reforço com FRCM-PBO aumentou a capacidade de suporte de carga para elementos não expostos a temperatura em aproximadamente 44%, enquanto naqueles expostos a temperatura (60°C, 120°C e 180°C) o aumento médio foi de 47%. Para elementos confinados com PRF, o aumento da capacidade de carga foi de 135% para elementos não expostos a temperatura, enquanto a média para aqueles expostos à temperatura foi de 126%.

2.1.1 Tipo de tecido.

As fibras do tecido utilizadas no concreto, segundo a norma ACI 544.1R (1997), no que diz respeito a seus materiais, são divididas em quatro grupos básicos: aço, vidro, fibras sintéticas e naturais. Para o sistema de reforço com PRF e FRCM, os tecidos mais utilizados são os de carbono, aramida, PBO, basalto e de vidro. Segundo Barros (2004), o tecido de carbono se destaca por apresentar melhores propriedades mecânicas, maior resistência à ação de agentes químicos, imunidade à corrosão e não absorvem água. Araújo (2002) complementa que eles se destacam pela durabilidade, leveza e alto módulo de elasticidade que pode chegar a 800GPa. Contudo, elas podem possibilitar corrosão do tipo galvânica se em contato com metais.

Araújo (2002), explica ainda que os tecidos são responsáveis pela rigidez do compósito. Eles variam em função do tipo, tamanho, grau de concentração das fibras do tecido e disposição das mesmas na matriz. Sua direção principal leva ao valor máximo de resistência e rigidez. Triantafillou et al. (2006), Bournas et al. (2007), Colajaninni et al. (2014), Trapko (2014) citam que o aumento do número de camadas de tecido no FRCCM aumenta o ganho da resistência das colunas confinadas.

Ombres (2014) mostrou que o método convencional para o encamisamento de colunas com FRCCM com as fibras dispostas na direção perpendicular ao eixo axial da coluna apresentou maior eficiência que as fibras dispostas em ângulos de 30° ou 45° em relação ao eixo axial. Trapko (2014) estudou colunas de seção transversal quadrada e também verificou a maior eficácia da fibra de FRCCM direcionada perpendicular ao eixo axial. Dessa maneira, as fibras do tecido devem ser dispostas na direção dos esforços a tração, isto vale tanto para o sistema de FRCCM quanto para o sistema de PRF.

Os tecidos de alto módulo de elasticidade aumentam a resistência do compósito. Arquez (2010), cita que para o reforço estrutural devem ser utilizadas as fibras de alto módulo de elasticidade, pois quando a matriz atinge seu limite, a fibra está mais tensionada, suportando um aumento de carga para pouca deformação, desde que também tenha resistência mecânica e adequada aderência para este aumento.

Nos ensaios de Bournas et al. (2009), foi comparado a utilização do tecido de carbono e o tecido de vidro no reforço de FRCCM e apesar de ter sido comprovado a eficiência dos dois tecidos, com a melhora na capacidade axial e deformação, foi verificado que a utilização do reforço com a fibra de vidro obteve a ruptura do encamisamento antes do esmagamento do concreto e flambagem das barras de aço. Já nos ensaios com a utilização do tecido de carbono, o reforço permaneceu intacto até a carga máxima alcançada pelo equipamento. Desta forma, foi possível observar uma melhor resposta do tecido de carbono em comparação com o de vidro, devido à baixa resistência a tração das fibras de vidro.

2.2 Comportamentos de colunas reforçadas com FRCCM

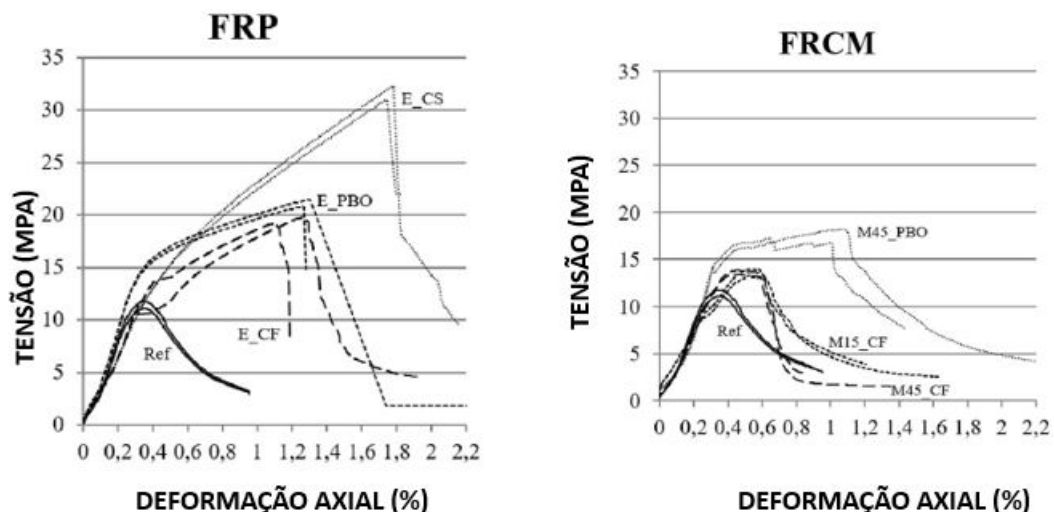
2.2.1 Curva tensão-deformação

Segundo Donnini et al. (2019), o concreto confinado com o PRF apresenta três estágios diferentes na curva tensão-deformação; um estágio inicial, governado pelo concreto, onde o reforço não é solicitado. Neste estágio a curva tensão – deformação é praticamente linear, semelhante a de um concreto não confinado. Uma vez que o concreto é fissurado, no segundo estágio, o reforço externo é solicitado, fazendo com que a curva tensão - deformação mude de inclinação devido ao reduzido módulo de elasticidade do concreto fissurado e torne-se linear até a ruptura.

Já a curva do concreto com FRCCM, foi dividida pelos autores em quatro estágios: Após o dano no concreto no primeiro estágio, o material permanece com alta rigidez devido ao reforço com o FRCCM. Neste estágio a tensão é transferida para o compósito FRCCM que se deforma até o limite de resistência da matriz de argamassa do compósito (segundo estágio). Ao fim deste estágio a tensão é transferida para o tecido. A terceira fase é caracterizada pelo deslizamento do tecido na matriz inorgânica. Vale ressaltar que o deslizamento do tecido dependerá da intensidade da aderência fibra-matriz. Por fim, é iniciada a ruptura do concreto confinado.

A Figura 1 mostra um exemplo da curva tensão-deformação realizada na pesquisa de Donnini et al. (2019), onde é possível perceber o comportamento descrito anteriormente para cilindros de concreto confinados com PRF e FRCCM para diferentes fibras estudadas, sendo E_CS reforço com resina epóxi e tecido de carbono unidirecionais, E_PBO reforço com resina epóxi e tecido de PBO, E_CF reforço com resina epóxi e tecido bidirecional de carbono, M45_PBO reforço com a argamassa de alta resistência (50 MPA) e tecido de PBO, M15_CF reforço com uma argamassa de baixa resistência (17 MPA) e tecido bidirecional de carbono, M45_CF reforço de argamassa de alta resistência (50 MPA) e tecido bidirecional de carbono e Ref sendo o concreto de referência, sem o reforço.

Figura 1 - Curvas tensão - deformação de ensaios de compressão uniaxial em cilindros confinados com PRF e FRCCM



Fonte: Donnini et al. (2019).

2.2.2 Modos de ruptura

Para colunas confinadas com o sistema de FRCCM, Awani et al. (2017), mostram que existem quatro modos de ruptura típicos que são: o descolamento do reforço, a ruptura do tecido do compósito, o

deslizamento das fibras do tecido e o esmagamento do concreto, sendo à ruptura do tecido o modo de ruptura predominante para este caso.

Donnini et al. (2019), apontam que no sistema de PRF a aderência fibra matriz é maior e o deslizamento da fibra é prevenido pela resina, já no sistema de FRCC, conforme dito também por Colajanni et al. (2014), quando a matriz inorgânica começa a fissurar o deslizamento da fibra pode começar a acontecer dependendo do atrito entre a matriz e a fibra. Além disso, os autores verificaram que cilindros de concreto confinados com PRF romperam devido à ruptura das fibras, enquanto o tipo de ruptura observada nos corpos de prova confinados com FRCC foi devido ao deslizamento do tecido dentro da matriz inorgânica. Este fenômeno foi justificado por eles como devido a diferente habilidade da matriz orgânica (resina epóxi) ou inorgânica (argamassa cimentícia) de penetrar nos tecidos de carbono ou PBO.

3 SISTEMA DE REFORÇO COM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS DE ALTO DESEMPENHO DO TIPO SHCC

O sistema de reforço com compósito cimentício de alto desempenho abrange todos os compósitos que apresentam o comportamento de endurecimento na tração, do inglês *strain-hardening*. O compósito cimentício de engenharia (ECC) e o compósito reforçado com fibras de alto desempenho (do inglês *high-performance fiber-reinforced cementitious composite* - HFRCC) são dois tipos de SHCC (do inglês *Strain Hardening Cementitious Composites*).

O SHCC forma uma classe de compósitos em que a resposta tensão x deformação na tração exibe um comportamento de enrijecimento acompanhado de múltipla fissuração (*strain hardening*) e a resistência pós-fissuração na tração uniaxial é maior ou igual à resistência de fissuração.

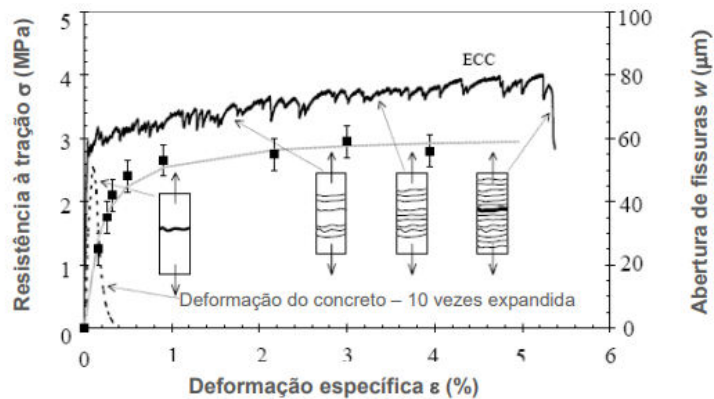
Segundo Magalhães, 2010, o HFRCC apresenta o comportamento de enrijecimento na tração (*strain hardening*) por apresentar altos teores de fibras (tipicamente >5%) e o ECC devido a dosagem baseada nos princípios da micromecânica, que estabelecem relações entre o comportamento mecânico macroscópico dos compósitos e as propriedades individuais da fibra, matriz e da interface fibra-matriz

Li, 2006, ressalta que o ECC sob tração uniaxial exibe comportamento dúctil com deformações de até 5%. Sua tensão de tração máxima pode ser superior a 3%, ou até mesmo 8%, equivalente a 300 a 800 vezes maior do que o concreto reforçado com fibras comuns (Wang et al., 2019 e Li et al., 2001). No comportamento de *strain-hardening* o enrijecimento é alcançado por meio de múltiplas finas fissuras, com abertura inferior a 100µm (Wang & Li, 2005; Li et al., 2001), limitada pela resistência ao arrancamento das fibras. Devido a este fenômeno, que acontece com todos os materiais do tipo SHCC, surgem outras fissuras que distribuem a

deformação por tração, o que distingue o comportamento destes materiais de outros compósitos reforçados com fibras (FRCC) os quais concentram toda a deformação na abertura de uma só fissura. Este comportamento é interessante, pois a formação dessas pequenas múltiplas fissuras garante uma maior durabilidade, já que a abertura de fissura é reduzida.

A figura 2 mostra uma curva típica tensão-deformação do ECC submetido a esforços de tração, onde é possível observar a sua grande capacidade de deformação e reduzida abertura de fissura.

Figura 2 - Curva tensão-deformação à tração do ECC convencional



Fonte: Li, 2006.

Zhuge & Al-Gemeel, 2018, estudaram os sistemas de confinamento de colunas de concreto de seção transversal quadrada com diferentes materiais: compósito do tipo ECC, compósito têxtil com tecidos de basalto (FRCM) e um novo sistema composto de ECC e tecido de basalto. Como resultado eles observaram que o novo sistema de confinamento de tecido de basalto aderido ao ECC apresentou um aumento da resistência a compressão da coluna entre 54% e 77% enquanto que o sistema com FRCM apresentou um aumento de 41%. O ECC sozinho, sem a fibra de basalto, apresentou de uma forma geral o melhor desempenho, em relação ao aumento da resistência e ductilidade. Segundo os autores, o ECC sozinho obteve resistência ao confinamento 8,7% maior que o ECC combinado com tecido de basalto. Este resultado foi atribuído, provavelmente, a dificuldade de penetração da matriz de ECC no tecido de basalto, afetando a aderência do tecido a matriz de ECC e do reforço ao concreto.

Xiuling Li et al. (2017), estudaram o comportamento cíclico de compósito reforçado com fibra de alto desempenho (HPFRCC) para reforços de pilares submetidos a abalos sísmicos para diferentes alturas de reparo. Verificaram que para corpos-de-prova reparados com HPFRCC, a capacidade de carga foi reduzida em 1% quando utilizado um reparo com altura de 300mm e foi aumentada em 12% quando foi utilizado um reparo com 500mm de altura. Além disso, os aumentos observados na

ductilidade foram de 14% (para reparo de 300 mm) e 20% (para reparo de 500 mm). Os autores também estudaram o efeito de reparo em pilares submetidos a carregamento constante. Para os corpos-de-prova reparados sob carga axial, os aumentos de carga foram de 9% e 14%, e os aumentos de ductilidade foram de 21% e 29% correspondentes às alturas de reparação de 300 e 500 mm, respectivamente. Concluíram que os reparos dos danos realizados sob carga axial resultaram em um melhor desempenho cíclico devido ao controle da deformação pelo HPFRCC, em comparação com aqueles reparados sem o carregamento constante e recomendaram, a partir de suas análises, que a altura ideal de reparação do HPFRCC seja 1,5 vezes superior à profundidade ou largura da coluna danificada para um melhor desempenho.

Deng et al. (2018), ao estudarem o sistema de reforço com ECC submetido a cargas cíclicas, verificou que seu modo de ruptura foi muito mais dúctil que corpos-de-prova de controle reforçados com ferrocimento (consiste em uma malha de arame presa em uma estrutura de barras de aço e argamassa). Zhu e Wang (2016), investigaram o ECC e o PRF e constatou que a combinação dos dois pôde proporcionar uma efetiva tensão lateral de confinamento nos pilares além de retardar o escoamento da armadura longitudinal no concreto armado.

Shang et al. (2019), estudaram o sistema de reforço com ECC e verificaram que a aderência entre o ECC e o concreto é forte o suficiente (para a mistura estudada) para transferir os esforços da estrutura original para a camada de reforço, observando que a força de aderência aumenta com a rugosidade da superfície. Também ressaltaram que a combinação do ECC com o PRF ou barras de aço é uma técnica adequada para reforços de colunas de concreto, tendo como objetivo o seu confinamento, permitindo o aumento significativo da sua capacidade de carga, rigidez, capacidade de deformação e capacidade de absorção de energia.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pôde ser observado ao longo deste estudo que os dois tipos de sistemas de reforços estruturais utilizando compósitos cimentícios reforçados com fibra contribuem significativamente para o ganho de resistência e ductilidade de pilares danificados, melhorando ainda suas propriedades em relação à durabilidade e segurança após o reparo.

De acordo com a bibliografia estudada, foi observado que os sistemas de reforço com SHCC, em geral, apresentam melhor desempenho em relação a sua resistência e ductilidade quando comparado com os reforços de PRF e FRCC devido ao seu comportamento de enrijecimento na tração direta. Foi verificada a importância da interação fibra-matriz para o desempenho dos sistemas de reforço utilizando compósitos cimentícios reforçados com fibras e que as propriedades das fibras e da

matriz influenciam diretamente no seu comportamento. Em relação ao sistema de PRF, foi constatado que os seus inconvenientes devem ser levados em consideração, podendo o sistema de FRCM apresentar grande vantagem competitiva em relação a ele. Contudo, tanto o sistema de reforço com SHCC quanto com FRCM são tecnologias novas que possuem poucos estudos a respeito de suas propriedades e seu comportamento, sendo necessário mais pesquisas para melhor compreensão dos seus mecanismos.

REFERÊNCIAS

- ACI 544.1R-96**, State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete, ACI, 1997.
- AI-SALLOUM YA; ELSANADEDY, HM; ABADEL AA. **Behavior of FRP-confined concrete after high temperature exposure**. Constr Build Mater, 2011.
- ARAÚJO, CAROLINE MAIA. **Reforço de vigas de concreto à flexão e ao cisalhamento com tecidos de fibra de carbono**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Tese (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil),2002.
- ARQUEZ, ANA PAULA. **Aplicação de laminado de polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC) inserido em substrato de microconcreto em fibras de aço para reforço à flexão de vigas de concreto armado**. Escola de Engenharia de São Carlos, USP. Tese (Mestrado em Engenharia de Estruturas), 2010.
- AWANI, O.; EL-MAADDAWY, T.; ISMAIL, N. **Fabric-reinforced cementitious matrix: A promising strengthening technique for concrete structures**. Construction and Building Materials, p. 18., 2017.
- BANTHIA, N. et al. **Fiber Synergy in Hybrid Fiber Reinforced Concrete (HyFRC) in flexure and direct shear**. Cement & Concrete Composites, v. 48, p. 91-97, nov. 2013.
- BARROS, J; ANTUNES, A. **Reforço de pavimentos de edifícios industriais com laminados de fibras de carbono**. In: Encontro Nacional Betão Estrutural. 2004.
- BOURNAS, D. A., TRIANTAFILLOU, T. C., ZYGOURIS, K., & STAVROPOULOS, F. **Textile-reinforced mortar versus FRP jacketing in seismic retrofitting of RC columns with continuous or lap-spliced deformed bars**. Journal of Composites for Construction, 360-371., 2009.
- BOURNAS, D.A.; LONTOU, P.V.; PAPANICOLAOU, C.G.; TRIANTAFILLOU, T.C. **Textile reinforced mortar versus fiber-reinforced polymer confinement in reinforced concrete columns**. ACI Struct. J., 2007.
- COLAJANNI, P., DI TRAPANI, F., MACALUSO, G., FOSSETTI, M., & PAPIA M. . **Cyclic axial testing of columns confined with fiber reinforced**

- cementitious matrix.** Proceedings of the 6th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE '12), 13-15 p., 2012.
- COLAJANNI, P., DOMENICO, F. D., RECUPERO, A., & SPINELLA, N. **Concrete columns confined with fibre reinforced cementitious mortars: experimentation and modelling.** Construction and Building Materials, 375-384., 2014.
- DENG, M.K.; ZHANG YX; LI, Q.Q. **Shear strengthening of RC short columns with ECC jacket: Cyclic behavior tests.** Eng. Struct., 2018.
- DONNINI, J., SPAGNUOLO, S., & CORINALDESI, V. **A comparison between the use of FRP, FRCM and HPM for concrete confinement.** Composites Part B, 10 p., 2019.
- HAJIRASOULIHA, I., & THERMOU, G. E. **Compressive behaviour of concrete columns confined with steel-reinforced grout jackets.** Composites Part B.,2018.
- ISSA, C. **The effect of elevated temperatures on CFRP wrapped concrete cylinders.** In: Proceedings of the 8th international symposium on fiberreinforced polymer reinforcement for concrete structures (FRPRCS-8). Patras, Greece, 2007.
- KAMINSKI, M; TRAPKO, T; MUSIAL, M; BYWALSKI, CZ. **Rheological strains of the compressed concrete elements strengthened with CFRP sheets subjected to cyclically changeable temperature. Creep, shrinkage and durability mechanics of concrete and concrete structures.** In: Proceedings of the eighth international conference, Ise-Shima, Japan, 2008.
- LI, M., LI, V. C., **Behavior of ECC/Concrete Layered Repair System under Drying Shrinkage Conditions.** Journal for Restoration of Buildings and Monuments, v. 12, n. 2, p. 143 – 160., 2006.
- LI, V.C.; WANG, S.; WU, C. **Tensile strain-hardening behavior of PVA-ECC.** ACI Mater. J., 2001.
- MAGALHÃES, M. S. **Caracterização experimental de compósitos cimentícios reforçados com fibras de PVA: Processo de fratura, propriedades térmicas, deformações diferidas e estabilidade térmica.** COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), 2010.
- OMBRES, L. **Concrete confinement with a cement based high strength composite material.** Composite Structures, Pages 294-304, 2014.
- QIN-YONG, MA, MA; XIAO-YU, LU;ZHI-YI,TU; FA-MING,LIU. **Experimental investigation of square concrete columns strengthened with carbon fiber reinforced plastics sheets at low temperatures.** In: Proceedings of the 8th international symposium on fiber-reinforced polymer reinforcement for concrete structures (FRPRCS-8). Patras, Greece, 2007.

- SHANG, XING - YAN; YU, JIANG-TAO; LI, LING-ZHI; LU, ZHOU-DAO. **Strengthening of RC Structures by Using Engineered Cementitious Composites: A Review.** College of Civil Engineering, Shandong Jianzhu University., 2019.
- TRAPKO, T. **Fibre Reinforced Cementitious Matrix confined concrete elements.** *Materials and Design*, 10 p., 2013.
- TRAPKO, T. **Effect of eccentric compression loading on the strains of FRCM confined concrete columns,** *Constr. Build. Mater.*, 2014.
- TRIANTAFILLOU, T. C., PAPANICOLAOU, C. G., ZISSIMOPOULOS, P., & LAOURDEKIS, T. **Concrete confinement with textile-reinforced mortar jackets.** *ACI Structural Journal*, 28-37, 2006.
- WANG, S., LI, V. C. **Polyvinyl Alcohol Fiber Reinforced Engineered Cementitious Composites: Material Design and Performances,** In: Proceedings of Int'l workshop on HPRCC in structural applications, Honolulu, Hawaii, USA, May pp. 23- 26, 20.,2005.
- WANG, Y.; WEI, L.; YU, J.; YU, K. **Mechanical properties of high ductile magnesium oxychloride cement-based composites after water soaking.** *Cem. Concr. Compos.*, 2019.
- WU, H., & TENG, J. **Concrete confined with fiber reinforced cement based thin sheet composites.** Editor. FRPRCS-6 Fiber reinforced polymer reinforcement for concrete structures, vol. 1. World Scientific Publishing Co., 591–600 p.2003.
- XIULING, L., WANG, J., BAO, Y., & CHEN, G. **Cyclic behavior of damaged reinforced concrete columns repaired with high-performance fiber-reinforced cementitious composite.** *Engineering Structures*, 10 p., 2017.
- ZHU, Z.F.; WANG, W.W. **Experimental study on mechanical behaviour of circular reinforced concrete columns strengthened with FRP textile and ECC.** *J. Southeast Univ.*, 2016
- ZHUGE, Y., & AL-GEMEEL, A. N. **Experimental investigation of textile reinforced engineered cementitious composite (ECC) for square concrete column confinement.** *Construction and Building Materials*, p. 9., 2018.