

Vigas de concreto armado reforçadas segundo a técnica TRM: Revisão sistemática da literatura

M. H. M. Moraes^{1*}, H. M. Francklin¹, G. M. Dalfré¹, B. Ghiassi²

*Autor de Contato: matheus.h.h@hotmail.com

¹ Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, Brasil

² Faculty of Engineering, University of Nottingham, Nottingham, UK

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo apresentar uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) sobre a técnica de reforço TRM (*Textile Reinforced Mortar*, em língua inglesa). A RSL foi realizada por meio a consulta de artigos científicos e de material acadêmico relativo ao tema, resultando em um total de 611 artigos, dos quais 100 foram considerados aderentes a vigas de concreto armado reforçadas segundo a técnica TRM. Os principais métodos de caracterização do material de reforço foram apresentados, assim como alguns estudo comparativos da técnica TRM com as técnicas EBR e NSM. Verificou-se que a técnica TRM, quando comparada a técnica predecessora e dependendo dos materiais utilizados na confecção do compósito argamassa-grelha, pode apresentar resultados similares as técnicas predecessoras. Os resultados também apresentaram que os materiais de reforço estão menor suscetíveis a agressividade do meio e ações térmicas que nas técnicas convencionais de reforço com FRPs.

Palavras-chave: *Textile Reinforced Mortar* (TRM); Reforço; Viga de concreto armado; Capacidade de carga; Revisão Sistemática da Literatura (RSL)

1. INTRODUÇÃO

Com o passar das décadas, os edifícios sofrem um processo natural de envelhecimento onde estão sujeitos a deterioração, degradação devido a exposição aos ambientes agressivos e a falta de manutenção preventiva. Além da ação do tempo soma-se a possibilidade de se projetar ou executar de forma incorreta (não respeitando as prescrições normativas), a modificação no uso do edifício impondo cargas de utilização mais elevadas ao que foi posteriormente dimensionado, maior densidade de tráfego em pontes, ou até mesmo com a atualização das normas que resultam em critérios mais rigorosos para os critérios de dimensionamento. Com isso torna-se fundamental o estudo de novas técnicas de reforço e recuperação de elementos de concreto armado. Dentre as possibilidades de reforço com materiais reforçados ou estruturados com fibras (FRP, da língua inglesa *Fiber Reinforced Polymer*) citam-se, as não tão conhecidas, técnicas TRM (*Textile Reinforced Mortar*)¹ ou TRC (*Textile Reinforced Concrete*), as quais combinam a ação de fibras de alta resistência (apresentadas na configuração de grelhas bidirecionais ortogonais) com matrizes inorgânicas tal como argamassas a base de cimento ou cal-hidráulica, a norma ACI 549.4R (2020) estabelece parâmetro e procedimentos para execução e dimensionamento do reforço. A técnica TRM/TRC foi proposta para resolver alguns problemas das técnicas NSM (*Near-Surface Mounted*) e EBR (*Externally Bonded Reinforcement*). Neste sentido, Younis *et al.* (2020) afirmam que a técnica TRM mostrou-se com capacidade de superar alguns problemas que foram identificadas nas técnicas predecessoras. Citam-se, por exemplo, a sensibilidade ao fogo e ações térmicas no FRP (Gao *et al.*, 2016), dificuldade de aplicação em superfícies molhadas ou exteriores irregulares (colunas, arcos e paredes de alvenaria) que requerem preparação da superfície (Bakis *et al.*, 2002), incompatibilidade da resina epóxi com o substrato de concreto, muitas vezes levando ao descolamento precoce do material de reforço (Buyukozturk *et al.*, 2004; Ebead e Saeed, 2013), a exposição da resina epóxi e o FRP a ação da umidade, raios UVA e UVB, que levam a degradação (Ferreira, 2019; Sarti Junior, 2020) como alguns tipos de problemas enfrentados pela técnica EBR. Além disso, o custo do TRM em relação ao FRP é relativamente mais baixo, além de sua fácil aplicação dispensando uma mão de obra qualificada para implementação. Segundo Koutas *et al.* (2019), o TRM tem mais fácil aplicação em superfícies molhadas e baixas temperaturas. Assim como, para altas temperaturas, o TRM apresenta maior resistência a calor e temperatura comparado com a resina epóxi do sistema FRP (Tetta e Bournas, 2016; Raoof e Bournas, 2017). Além disso, o TRM é baseado numa matriz de argamassa-grelha que é mais compatível com o substrato original do concreto (Ebead e Younis, 2019; Younis e Ebead, 2019). Adicionalmente, o TRM é passível de aplicação de materiais recicláveis apresentando vantagens na perspectiva de sustentabilidade (Awani *et al.*, 2017).

Assim, a técnica TRM tem se mostrado uma técnica de reforço promissor sendo atrativa para a área de reforço de estruturas de concreto armado tais como lajes (Koutas e Bournas, 2017; Aljazaeri e Myers, 2018), pilares (Bournas *et al.*, 2007; Ombres, 2014), vigas reforçadas a flexão (Ebead *et al.*, 2017; Raoof *et al.*, 2017; Ebead *et al.*, 2019), cisalhamento (Younis *et al.*, 2017; Tetta *et al.*, 2018; Wakjira e Ebead, 2018, 2019) e torção (Alabdulhady e Sneed, 2019; Kandekar e Talikoti, 2019), geralmente indicando a melhora no comportamento dos elementos reforçados em comparação aos não reforçados.

Neste sentido, o presente trabalho tem como intuito apresentar a técnica de reforço TRM/TRC, suas vantagens e limitações para aplicação em vigas de concreto armado, por meio de uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL), validando seu emprego para futura aplicação em estudos experimentais.

¹ A técnica TRM possui alguns sinônimos apresentado na literatura tal como *Textile-Reinforced Concrete* (TRC) e *Fabric-Reinforced Cementitious Matrix* (FRCM)

2. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste trabalho foi desenvolvida uma Revisão sistemática da Literatura (RSL) com apresentação do estado da arte no que se refere a sistemas de reforço à flexão em vigas de concreto armado e aplicabilidade com o uso da técnica TRM. Assim, será apresentada a RSL feita com base em um levantamento do atual estado da arte do tema.

Para elaboração da Revisão bibliográfica foi realizada uma revisão sistemática da literatura visando identificar e selecionar pesquisas relevantes, recolhendo e analisando os dados obtidos (Biolchini *et al.*, 2007). Para isto utilizou-se a metodologia proposta por Brereton (2007), a qual é baseada em três etapas: Planejamento, Execução e Extração de dados. Abaixo são apresentados os critérios de busca adotados para a RSL:

- Qual o comportamento a flexão de vigas reforçadas segundo a técnica *Textile Reinforced Mortar* (TRM) ou *Textile Reinforced Concrete* (TRC)?
- Qual é o comportamento da Matriz de argamassa e grelha?

Assim, para a consulta dos bancos de dados científicos utilizou-se a *String (Textile reinforced concrete OR TRC) OR (Textile Reinforced Mortar OR TRM) AND (Beam) AND (Strengthen* OR Retrofit*) OR ((Load carrying capacity) OR (Strain*) OR (Stress*)) AND NOT (Masonry OR Slab OR Column* OR Wall*)*.

2.1 Planejamento da RSL

O planejamento foi baseado na definição do método de seleção de trabalhos. Assim, foi necessário avaliar o problema da pesquisa a fim de se obter uma visão geral das pesquisas em andamento e o atual estado da arte do tema em fontes disponíveis, identificadas por meio de uma análise exploratória preliminar. As principais base de dados, mundialmente reconhecidas pela alta qualidade e selecionadas na RSL são abaixo apresentadas:

- SCOPUS Digital Library (<https://www.scopus.com>);
- Web of Science Digital Library (<https://www.webofknowledge.com>);
- Engineering Village Digital Library (<http://www.engineeringvillage.com>).

Os critérios de inclusão e exclusão em revisão sistemática tiveram como objetivo limitar a seleção de trabalhos com base em avaliações qualitativas relevantes dentro do objetivo da pesquisa. A fim de definir quais artigos devem ser incluídos na revisão estabeleceu-se os critérios de inclusão (I) e exclusão (E) apresentados na Tabela 1, os quais foram realizados para publicações realizadas entre 2006 e maio de 2021.

Tabela 1. Critérios de inclusão (I) e exclusão (E) dos artigos

Critério	
Inclusão (I)	Exclusão (E)
Trabalhos disponíveis integralmente em bases de dados científicas ou em versões impressas	Trabalhos indisponíveis integralmente em bases de dados científicas ou em versões impressas
Trabalhos que apliquem as técnicas TRC ou TRM (em vigas) e analisem de maneira geral seu comportamento	Trabalhos que falem sobre a técnica TRC ou TRM não aplicado em vigas
Análises numéricas de técnicas TRC ou TRM	Trabalhos fora do escopo TRC ou TRM
Trabalho de revisão da literatura sobre a técnica TRC ou TRM	Trabalhos TRC ou TRM, porém, fora do escopo da pesquisa

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base nos critérios de busca, as plataformas indicaram um total de 611 resultados, os quais foram limitados a documentos na língua inglesa, e a artigos de revisão e documentos oriundos de periódicos científicos. Com aplicação desses filtros a quantidade de resultados foi reduzida para 405 documentos, cuja distribuição é apresentada na Figura 1.

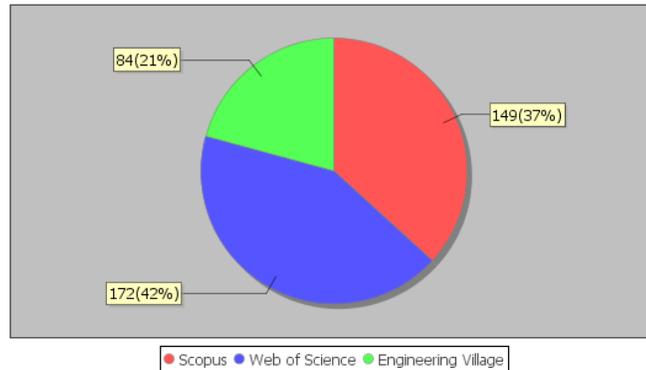


Figura 1. Distribuição de resultados por plataforma de busca

3.1 Extração de dados

Após a execução da RSL foram selecionados os trabalhos aderentes ao tema da pesquisa, resultando em um total de 100 artigos aderentes a pesquisa. A Figura 2 apresenta a evolução da produção anual de artigos relacionados ao tema, indicando uma certa tendência de crescimento das publicações entre os anos de 2014 e 2019, sendo que a partir de 2011 houve um aumento de 66,37% no cenário encontrado, com evolução de 2 artigos publicados em 2013 para 17 em 2019.

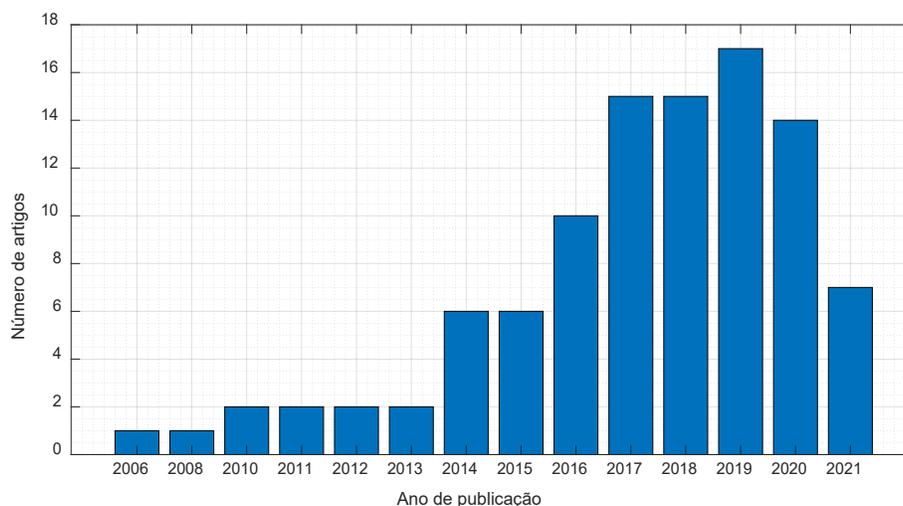


Figura 2. Evolução anual dos artigos de acordo com as *strings* de busca

Foi possível, também, identificar a existência dos 39 periódicos mais relevantes sobre a temática nas bases analisadas, os quais são apresentados na Figura 3, destacando-se a *Construction and Building Materials*, *Journal of Composites for Construction*, *Engineering Structures*, *Composites Part B* e *Composite Interfaces*, os quais correspondem por 58% das publicações entre os 100 artigos relacionados.

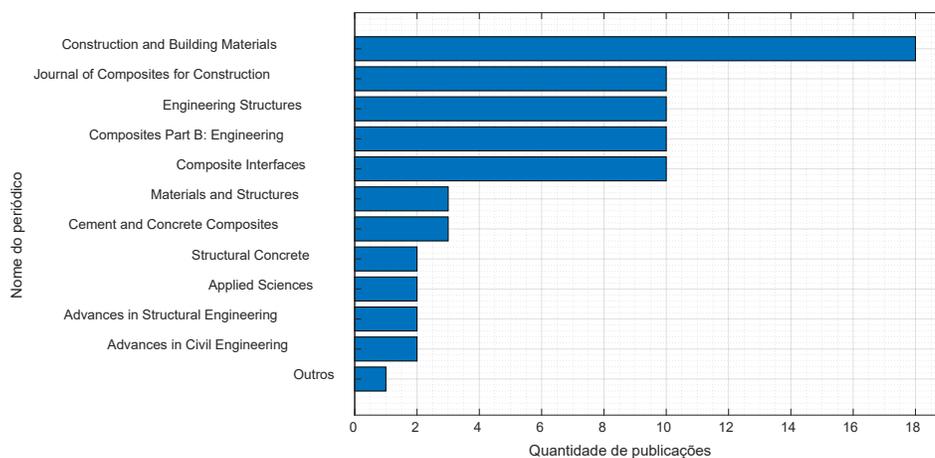


Figura 3. Resumo do número de publicações por periódico

A Figura 4 apresenta um resumo da quantidade de publicações sobre a temática TRC/TRM por país. Dentre os 100 trabalhos selecionados e baseando-se na localização da instituição onde o primeiro autor está vinculado, foi possível identificar a existência de 23 países com maior produção, destacando-se a China, França, Reino Unido, Catar e Itália, os quais são responsáveis por 55% das publicações sobre o tema. Note-se que o Brasil ocupa o 11º lugar, com um total de 3 artigos publicados nas bases avaliadas até a presente data. Neste sentido, verifica-se que este é um tema que demanda pesquisa nacional e cujos resultados podem ser utilizados para a escrita de práticas recomendadas e normas brasileiras.

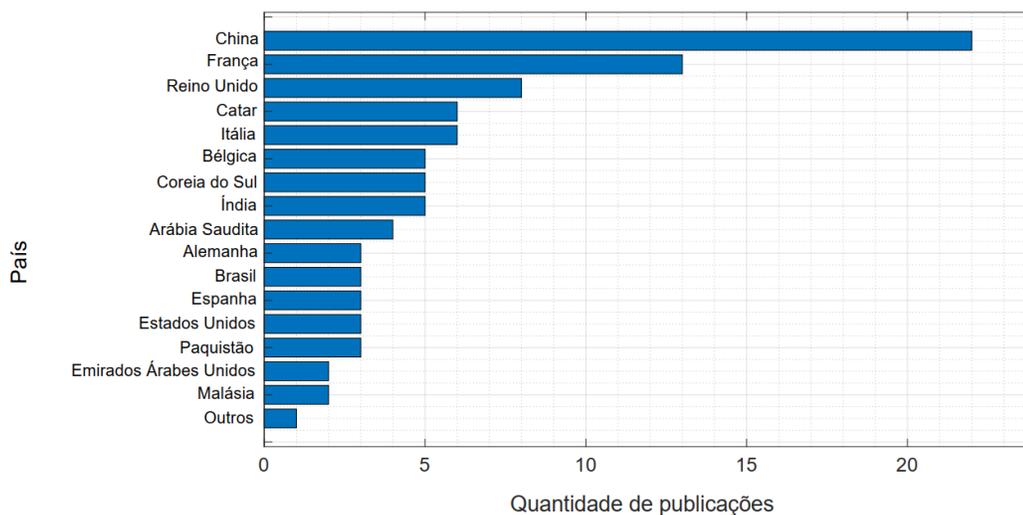


Figura 4. Resumo do número de publicações por país

3.2 Comportamento Mecânico do TRM

Para aplicação da técnica TRM em viga de concreto armado é necessário conhecer o comportamento mecânico da matriz argamassa-grelha. Assim, esta seção apresenta um resumo dos trabalhos obtidos que avaliam o comportamento do composto argamassa-grelha à tração e à flexão.

3.2.1 Comportamento à tração do TRM

Pela pesquisa realizada percebe-se que vários autores avaliaram o comportamento a tração da matriz argamassa-grelha (Hartig *et al.*, 2008; Contamine *et al.*, 2011; Si Larbi *et al.*, 2012;

Contamine *et al.*, 2014; Larrinaga *et al.*, 2014; Mobasher *et al.*, 2014; Contamine e Si Larbi, 2016; Rambo *et al.*, 2017; Kong *et al.*, 2017; D'Antino e Papanicolaou, 2018; Munck *et al.*, 2018; Ortlepp, 2018; Kim *et al.*, 2018; Ebead e El-Sherif, 2019; Li *et al.*, 2019; Younis *et al.*, 2020; El Kadi *et al.*, 2020). Este ensaio é utilizado para determinação do diagrama tensão versus deformação do compósito e, também, para obtenção do módulo de elasticidade.

Diversas geometrias de corpos de prova de tração foram encontradas, entretanto, o formato de placa de TRM retangular é a mais amplamente utilizada (Hartig *et al.*, 2008; Larrinaga *et al.*, 2014; Contamine e Si Larbi, 2016; Ebead *et al.*, 2017; Younis *et al.*, 2020). Verificou-se, também, que diversos métodos para fixação dos corpos de prova de TRM à máquina de ensaio são utilizados. Para execução do ensaio de tração aplica-se o carregamento com taxa de deslocamento de 1mm/min. O registro do deslocamento ao longo do ensaio pode ser realizado com o uso de um *Linear Variable Differential Transformer* (LVDT) ou *clip-gauge* (Figura 5a).

Verificou-se que o comportamento típico do TRM quando submetido à tração apresenta as etapas apresentadas na Figura 5b, onde (1) concreto com comportamento até o início de fissuração; (2) desenvolvimento de múltiplas fissuras e transferência de carga do concreto para a grelha; e (3) comportamento elástico-linear até a ruptura das fibras (Koutas *et al.*, 2019).

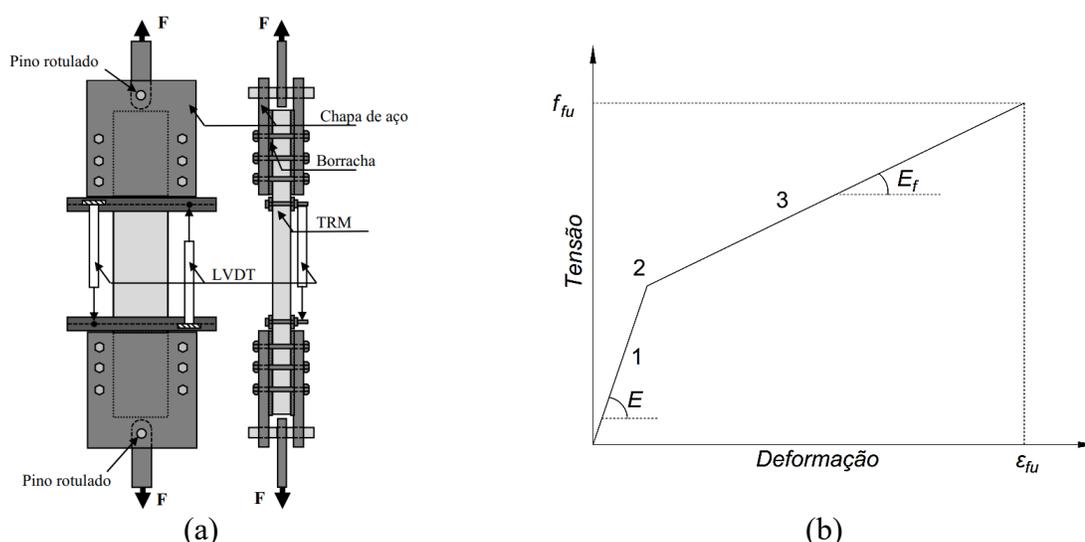


Figura 5. (a) Exemplo de ensaio à tração do TRM e (b) comportamento típico do diagrama tensão versus deformação (Koutas *et al.*, 2019)

A Figura 6 apresenta o diagrama tensão de tração versus deformação esquemático para compósitos de CFRP e de argamassa-grelha geralmente utilizados nas técnicas EBR/NSM e TRM, respectivamente. Verifica-se que os compósitos de FRP apresentam comportamento elástico-linear até a ruptura, enquanto os compostos por argamassa-grelha possuem comportamento bi-linear, com maior ductilidade, até a ruptura.

Neste sentido, se necessário, é possível aprimorar as características à tração da matriz argamassa-grelha. Cita-se, por exemplo, a avaliação dos distintos materiais comercialmente disponíveis para a confecção das grelhas, além do desenvolvimento de uma matriz cimentícia com melhor compatibilidade com o material de reforço e boa aderência ao substrato de concreto a ser reforçado. Ebead *et al.* (2017) conduziu um experimento que avaliou o comportamento mecânico à tração utilizando grelhas de PBO e carbono, cujos resultados são apresentados na Figura 7. Verifica-se que o compósito argamassa-grelha de PBO apresentou resistência à tração e ductilidade superior a obtida com carbono.

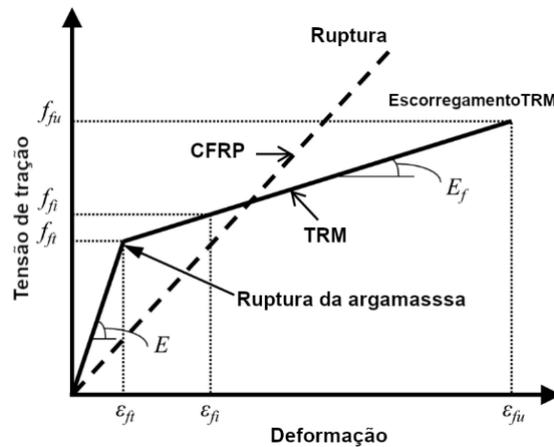


Figura 6. Tensão versus deformação para ensaio de tração TRM e CFRP (Kim *et al.*, 2018)

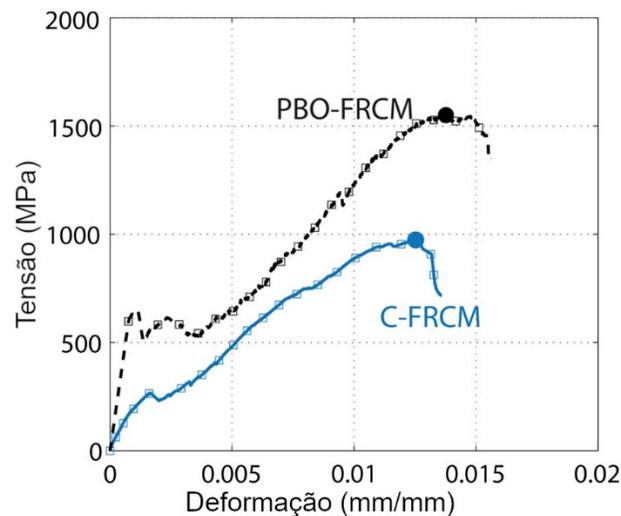


Figura 7. Tensão *versus* deformação do composto com diferentes materiais (Ebead *et al.*, 2017)

Uma alternativa para o aumento da resistência à tração está relacionada ao aumento do número de camadas de material de reforço, neste caso, de grelhas, aplicadas a matriz cimentícia. Larrinaga *et al.* (2014) realizaram um estudo paramétrico onde variaram a quantidade de camadas de grelhas inseridas em uma matriz e argamassa. A Figura 8 apresenta os resultados obtidos onde percebe-se que com o aumento das camadas de grelhas leva ao incremento da resistência à tração e do módulo de elasticidade, entretanto, com decréscimo da deformação da matriz.

3.2.2 Comportamento à Flexão do TRM

Vários pesquisadores avaliaram o comportamento à flexão da matriz argamassa-grelha (Mobasher *et al.*, 2014; Yoo *et al.*, 2016; Kong *et al.*, 2017; Zargarán *et al.*, 2017; Jia *et al.*, 2020; El Kadi *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2021), o qual pode ser investigado por meio do ensaio de flexão de quatro pontos (Figura 9). O ensaio de flexão à quatro pontos também pode ser realizado com aplicação de taxa de deslocamento de 1mm/min, o qual pode ser registrado com o uso de LVDTs.

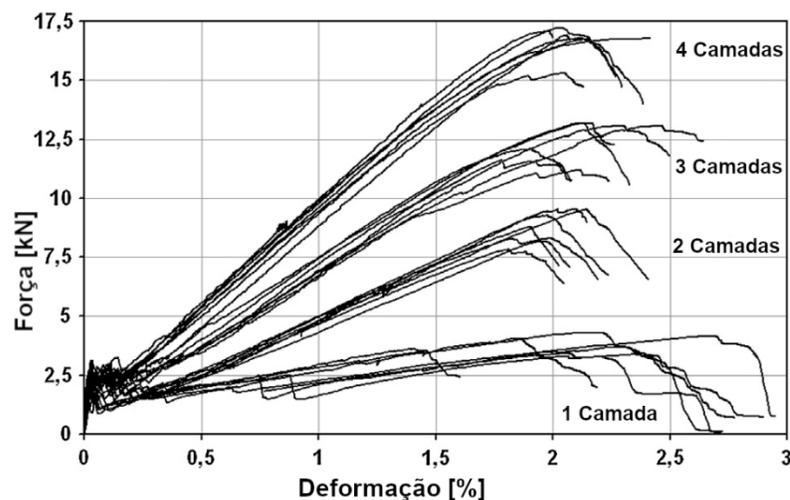


Figura 8: Força *versus* deformação da TRM frente a variação do número de camadas de material de reforço (Larrinaga *et al.*, 2014)

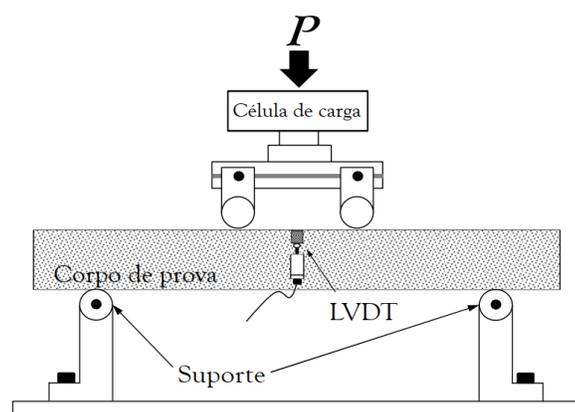


Figura 9: Exemplo de ensaio de flexão à quatro pontos

3.3 Reforço à flexão de vigas de concreto armado

O reforço de vigas de concreto armado é feito pela aplicação de camadas de TRM na face tracionada, tal como o apresentado na Figura 10, levando ao aumento da capacidade portante do elemento reforçado ou reparado (Koutas *et al.*, 2019).

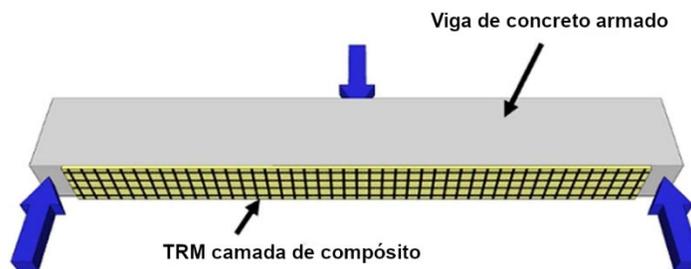


Figura 10. Reforço à flexão de viga de concreto armado com TRM (Koutas *et al.*, 2019)

A efetividade do reforço aplicado à flexão segundo a técnica TRM em vigas de concreto armado tem sido objeto de estudo (Brückner *et al.*, 2006; D'Ambrisi e Focacci, 2011; Babaeidarabad *et al.*, 2014; Verbruggen *et al.*, 2014; Gopinath *et al.*, 2015; Verbruggen *et al.*, 2016; Gopinath *et al.*,

2017; Raof *et al.*, 2017; Raof e Bournas, 2017; Escrig *et al.*, 2017; Ebead *et al.*, 2017; Aljazaeri e Myers, 2017; Raof e Bournas, 2017; Sheng *et al.*, 2018; Masood, 2019; Park *et al.*, 2019; Adnan *et al.*, 2019; Muresan e Zwicky, 2020; Nguyen e Ngo, 2020; Cai *et al.*, 2021; Giese *et al.*, 2021). Tais estudos tiveram como objetivo a avaliação da resistência à flexão das vigas de concreto armado reforçadas com grelhas de carbono, fibra de vidro, basalto, aramida ou poliparafenileno benzobisoxazol (PBO) e submetidas a ensaios de três ou quatro-pontos.

A aplicação de camadas de reforço, dependendo de sua configuração, tende a levar ao aumento da capacidade portante do elemento, aumentando, em alguns casos, a rigidez inicial no estado não fissurado (Figura 11). Koutas *et al.* (2019) afirmam que a contribuição do TRM para a resistência a flexão torna-se significativa no momento do esmagamento do concreto e do início de escoamento da armadura existente.

No primeiro estágio verifica-se o aumento da força no momento de surgimento de fissuras no concreto, tal como observado por Escrig *et al.* (2017) e Raof *et al.* (2017).

No segundo estágio, as múltiplas fissuras do concreto resultam na ativação do material de reforço e levam a um comportamento mais rígido em relação a um elemento não reforçado. Geralmente também se verifica o aumento da força que leva ao escoamento da armadura longitudinal tracionada existente (Babaedarabad *et al.*, 2014; D'Ambrisi e Focacci, 2011; Escrig *et al.*, 2017; Raof *et al.*, 2017; Koutas *et al.*, 2019).

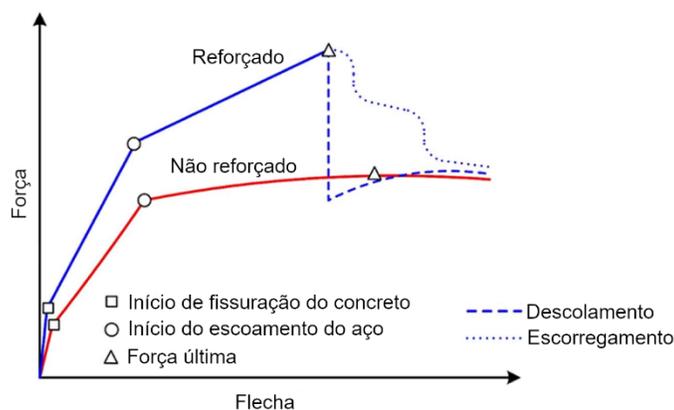


Figura 11. Efeito do reforço à flexão de viga de concreto armado com TRM carregamento versus deslocamento (Koutas *et al.*, 2019)

3.4 TRM versus EBR no comportamento de sistemas de reforço à flexão

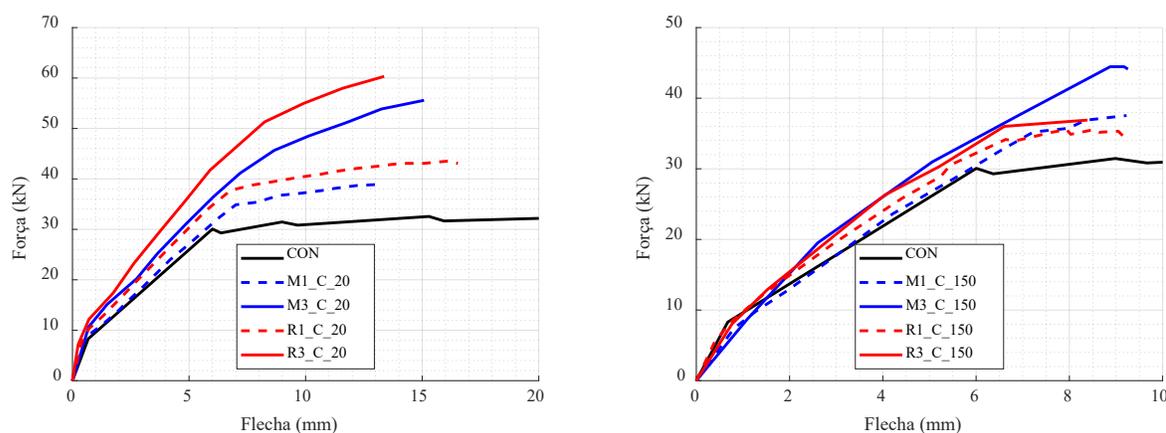
D'Ambrisi e Focacci (2011) e Raof *et al.* (2017) compararam o incremento de capacidade de carga obtida em de vigas de concreto armado com a técnica TRM em comparação ao sistema de reforço FRPs aderidos com o uso de resinas epoxídicas

D'Ambrisi e Focacci (2011) avaliaram o incremento de carga de vigas de concreto armado com seção transversal de $400 \times 250 \text{ mm}^2$, vão livre de 2,2m e concreto com resistência a compressão média de 47,68MPa, os quais foram reforçadas com mantas unidirecionais de carbono aplicadas segunda a técnica EBR (EBR E1 e E2), grelhas de carbono (C-FRCM) e PBO (PBO-FRCM) aplicadas segundo a técnica TRM e posteriormente submetidas ao ensaio de flexão de quatro pontos. Vigas sem reforço também foram concretadas e consideradas como referência para os demais ensaios. As mantas de carbono possuíam área de $42,5 \text{ mm}^2$, módulo de elasticidade de 239GPa e tensão última de 3023 MPa; as grelhas de carbono possuíam área de $31,96 \text{ mm}^2$, módulo de elasticidade de 238GPa e tensões últimas longitudinais e transversais de 3051 MPa, enquanto a grelha de PBO possuía área de $31,28 \text{ mm}^2$, módulo de elasticidade de 271GPa e tensão última de 4995MPa na direção longitudinal e de 272GPa e 5085MPa na direção transversal, respectivamente.

Os resultados indicaram aumento de capacidade de carga de 8,9, 30 e 29% para o uso de C-FRCM, PBO-FRCM e EBR, respectivamente, indicando que a correta seleção da grelha para a composição do TRM pode levar a resultados similares aos obtidos com as técnicas tradicionais de reforço.

Raouf e Bournas (2017) realizaram um programa experimental composto por vigas de concreto armado com dimensões de $102 \times 203 \times 1675 \text{ mm}^3$, com armadura longitudinal composta por 2 barras com diâmetro de 8mm e concreto com resistência média de 20MPa, as quais foram submetidas a ensaios de flexão de quatro pontos. A avaliação do incremento da capacidade de carga foi realizada considerando-se um elemento sem reforço (referência, CON), vigas reforçadas com 1 ou 3 camadas de CFRP aplicados segundo a técnica EBR (R1-C-20/150 e R3-C-20/150) ou TRM (M1-C-20/150 e M3-C-20/150) em temperatura ambiente (20°C) ou temperatura elevada (150°C).

Os resultados obtidos indicam que, para a temperatura ambiente, a máxima força registrada nos ensaios foi de 34,6 kN para a CON, 39 e 55,3 kN para a M1-C-20 e M3-C-20 e 43,9 e 60,4 kN para a R1-C-20 e R3-C-20, respectivamente. Os resultados obtidos indicam um aumento da força última de 12,7 e 59,83% para a TRM e 26,8 e 74,6% para a EBR com 1 ou 3 camadas (Figura 12a), respectivamente, indicando maior efetividade da técnica de reforço convencional. Além disso, a ductilidade do sistema de reforço com o uso da técnica TRC é inferior quando comparado ao obtido com a técnica EBR. Entretanto, para elevada temperatura (150°C), obteve-se máxima força registrada de 37,7 e 44,7 kN para a M1-C-150 e M3-C-150 e 35,9 e 36,7 kN para a R1-C-150 e R3-C-150, respectivamente, indicando um aumento da força última de 8,9 e 29,2% para a TRC e 3,8 e 6,1% para a EBR (Figura 12b). Para além disso, maior ductilidade foi verificada para a técnica TRC, indicando maior efetividade para temperaturas elevadas.



(a) Temperatura ambiente (20°C)

(b) Elevada temperatura (150°C)

Figura 12. Força *versus* flecha para os ensaios a temperatura ambiente e temperatura elevada (Raouf e Bournas, 2017)

4. CONCLUSÃO

Este trabalho teve o objetivo de apresentar uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) sobre sistemas de reforço à flexão em vigas de concreto armado e aplicabilidade com o uso da técnica TRM. (*Textile Reinforced Mortar*). Para isso fez-se levantamento do atual estado da arte do tema em periódicos mundialmente reconhecidos pela alta qualidade de suas publicações, realizadas entre 2006 e maio de 2021, e disponíveis nas bases de dados SCOPUS Digital, *Web of Science Digital Library* e *Engineering Village Digital Library*. Após a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão na revisão sistemática foram encontrados 405 documentos, os quais foram reduzidos a 100 devido a sua aderência ao tema de reforço a flexão com a técnica TRC. Verificou-se que existe uma certa tendência nas publicações sobre o tema a partir de 2014 e que, baseando-se na

localização da instituição onde o primeiro autor está vinculado, a China é o país que apresenta o maior número de artigos relacionados a temática analisada.

Com a relação a RSL realizada para um futuro trabalho experimental foram identificados os principais métodos de ensaios de caracterização à tração e à flexão de comportamento do compósito grelha-argamassa a ser utilizado na técnica TRC. Verificou-se que o comportamento à tração é bilinear e passa pelas etapas de início da fissuração do concreto, desenvolvimento de múltiplas fissuras no concreto e, por fim, é elástico-linear até a ruptura das fibras. Obteve-se, também, um melhor entendimento sobre o comportamento a tração de diferentes materiais, sendo a resistência do material da grelha preponderante na resistência a tração. Por fim, comprovou-se que o comportamento à tração do TRM com múltiplas camadas leva ao aumento da resistência à tração do TRM.

Pode-se observar em estudos comparativos entre vigas reforçadas com a técnica TRM e FRPs aderidos com o uso de resinas epoxídicas aplicadas segundo a técnica EBR que, dependendo do tipo de compósito argamassa-grelha utilizados, valores de força última similares aos encontrados nas técnicas tradicionais podem ser encontrados. Assim, reforço com C-FRCM, PBO-FRCM e CFRP EBR levaram a 8,9%, 29% e 30% de incremento de capacidade de carga, respectivamente. Além disso, em estudos da ação térmica, o reforço TRM apresentou aumento da resistência de 12,7 e 59,83% e a técnica EBR apresentou valores de 26,8 e 74,6%, valores para 1 e 3 camadas de reforço aplicado e ensaiado em temperatura ambiente. Entretanto, ao se avaliar o comportamento das técnicas em altas temperaturas (150 °C) foi possível observar que o reforço TRM é menos suscetível a ação térmica, apresentando incremento da resistência de 8,9 e 29,2%, enquanto a técnica EBR apresentou valores de 3,8 e 6,1%.

Assim, verifica-se que os trabalhos analisados apresentam a efetividade da aplicação do reforço pela técnica TRM, sendo assim, a experimentação e uso deste sistema em vigas de concreto armado é válida e deve ser expandida, principalmente no Brasil.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

6. REFERÊNCIAS

- Adnan, S. H., Osman, M. H., Rahman, M. A. A., Musa, K., Jamellodin, Z. e Yusof, W. Y. W. (2019), The Effect of Textile Fine Grained Mortar Layers on Reinforced Concrete Beam, *International Journal of Advanced Science and Technology*, 28(10), p. 01–07.
- Alabdulhady, M. Y. e Sneed, L. H. (2019), Torsional strengthening of reinforced concrete beams with externally bonded composites: A state of the art review, *Construction and Building Materials*, 205, p. 148–163. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.163>.
- Aljazeera, Z. R. e Myers, J. J. (2017), Strengthening of Reinforced-Concrete Beams in Shear with a Fabric-Reinforced Cementitious Matrix, *Journal of Composites for Construction*, 21(5), p. 04017041. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000822](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000822).
- Aljazeera, Z. R. e Myers, J. J. (2018), Flexure Performance of RC One-Way Slabs Strengthened with Composite Materials, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(7), p. 04018120. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002299](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002299).
- American Concrete Institute. ACI Committee 549.4R (2020), “*Guide to Design and Construction of Externally Bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix and Steel-Reinforced Grout Systems for Repair and Strengthening of Concrete Structures*”. Michigan - USA: ACI.
- Awani, O., El-Maaddawy, T. e Ismail, N. (2017), Fabric-reinforced cementitious matrix: A promising strengthening technique for concrete structures, *Construction and Building Materials*, 132, p. 94–111. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.125>.

- Babaeidarabad, S., Loreto, G. e Nanni, A. (2014), Flexural Strengthening of RC Beams with an Externally Bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix, *Journal of Composites for Construction*, 18(5), p. 04014009. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000473](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000473).
- Bakis, C. E., Bank, L. C., Brown, V. L., Cosenza, E., Davalos, J. F., Lesko, J. J., Machida, A., Rizkalla, S. H. e Triantafillou, T. C. (2002), Fiber-Reinforced Polymer Composites for Construction—State-of-the-Art Review, *Journal of Composites for Construction*, 6(2), p. 73–87. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2002\)6:2\(73\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2002)6:2(73)).
- Biolchini, J. C. de A., Mian, P. G., Natali, A. C. C., Conte, T. U. e Travassos, G. H. (2007), Scientific research ontology to support systematic review in software engineering, *Advanced Engineering Informatics*. (Ontology of Systems and Software Engineering; Techniques to Support Collaborative Engineering Environments), 21(2), p. 133–151. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aei.2006.11.006>.
- Bournas, D. A., Lontou, P. V., Papanicolaou, C. G. e Triantafillou, T. C. (2007), Textile-reinforced mortar versus fiber-reinforced polymer confinement in reinforced concrete columns, *ACI Structural Journal*. American Concrete Institute, 104(6), p. 740–748.
- Brereton, P., Kitchenham, B. A., Budgen, D., Turner, M. e Khalil, M. (2007), Lessons from applying the systematic literature review process within the software engineering domain, *Journal of Systems and Software*. (Software Performance), 80(4), p. 571–583. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jss.2006.07.009>.
- Brückner, A., Ortlepp, R. e Curbach, M. (2006), Textile reinforced concrete for strengthening in bending and shear, *Materials and Structures*, 39(8), p. 741–748. <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-005-9027-2>.
- Buyukozturk, O., Gunes, O. e Karaca, E. (2004), Progress on understanding debonding problems in reinforced concrete and steel members strengthened using FRP composites, *Construction and Building Materials*, 18(1), p. 9–19. [http://dx.doi.org/10.1016/S0950-0618\(03\)00094-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0950-0618(03)00094-1).
- Cai, G., Tsavdaridis, K. D., Si Larbi, A. e Purnell, P. (2021), A simplified design approach for predicting the flexural behavior of TRM-strengthened RC beams under cyclic loads, *Construction and Building Materials*, 285, p. 122799. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122799>.
- Contamine, R., Junes, A. e Si Larbi, A. (2014), Tensile and in-plane shear behaviour of textile reinforced concrete: Analysis of a new multiscale reinforcement, *Construction and Building Materials*, 51, p. 405–413. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.084>.
- Contamine, R. e Si Larbi, A. (2016), Development of a textile reinforced concrete (TRC) to retrofit reinforced concrete structures, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 20(6), p. 626–642. <http://dx.doi.org/10.1080/19648189.2015.1030089>.
- Contamine, R., Si-Larbi, A., Than, N. Q. e Hamelin, P. (2011), Numerical modeling of reinforced concrete beams under shear stress with and without external textile-reinforced concrete reinforcement, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 30(15), p. 1293–1303. <http://dx.doi.org/10.1177/0731684411420189>.
- D'Ambrisi, A. e Focacci, F. (2011), Flexural Strengthening of RC Beams with Cement-Based Composites, *Journal of Composites for Construction*, 15(5), p. 707–720. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000218](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000218).
- D'Antino, T. e Papanicolaou, C. (Corina) (2018), Comparison between different tensile test setups for the mechanical characterization of inorganic-matrix composites, *Construction and Building Materials*, 171, p. 140–151. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.041>.

- Ebead, U., El Refai, A., Shrestha, K. e Nanni, A. (2019), Soffit and U-Wrap FRCM Strengthening for Reinforced Concrete Beams, *ACI Structural Journal*, 116(2). <http://dx.doi.org/10.14359/51713292>.
- Ebead, U. e El-Sherif, H. (2019), Near surface embedded-FRCM for flexural strengthening of reinforced concrete beams, *Construction and Building Materials*, 204, p. 166–176. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.145>.
- Ebead, U. e Saeed, H. (2013), Hybrid shear strengthening system for reinforced concrete beams: An experimental study, *Engineering Structures*, 49, p. 421–433. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.11.039>.
- Ebead, U., Shrestha, K. C., Afzal, M. S., El Refai, A. e Nanni, A. (2017), Effectiveness of Fabric-Reinforced Cementitious Matrix in Strengthening Reinforced Concrete Beams, *Journal of Composites for Construction*, 21(2), p. 04016084. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000741](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000741).
- Ebead, U. e Younis, A. (2019), Pull-off characterization of FRCM/Concrete interface, *Composites Part B: Engineering*, 165, p. 545–553. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.02.025>.
- El Kadi, M., Kapsalis, P., Van Hemelrijck, D., Wastiels, J. e Tysmans, T. (2020), Influence of Loading Orientation and Knitted Versus Woven Transversal Connections in 3D Textile Reinforced Cement (TRC) Composites, *Applied Sciences*, 10(13), p. 4517. <http://dx.doi.org/10.3390/app10134517>.
- Escrig, C., Gil, L. e Bernat-Maso, E. (2017), Experimental comparison of reinforced concrete beams strengthened against bending with different types of cementitious-matrix composite materials, *Construction and Building Materials*, 137, p. 317–329. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.106>.
- Ferreira, D. da C. (2019), “Avaliação da degradação de vigas reforçadas com FRP quando expostas ao intemperismo”. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de São Carlos - UFSCar. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/12121> (Acessado: 30 de abril de 2021).
- Gao, W.-Y., Dai, J.-G. e Teng, J. G. (2016), Fire resistance design of un-protected FRP-strengthened RC beams, *Materials and Structures*, 49(12), p. 5357–5371. <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-016-0865-x>.
- Giese, A. C. H., Giese, D. N., Dutra, V. F. P. e Da Silva Filho, L. C. P. (2021), Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with textile reinforced mortar, *Journal of Building Engineering*, 33, p. 101873. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101873>.
- Gopinath, S., Iyer, N. e Gettu, R. (2017), Finite element analysis of RC beams strengthened with textile reinforced concrete, *Journal of Structural Engineering (Madras)*, 43, p. 454–460.
- Gopinath, S., Rama Chandra Murthy, A., Iyer, N. R. e Kokila, S. (2015), Evaluation of Eco-Efficiency and Performance of Retrofit Materials, *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, 96(4), p. 327–337. <http://dx.doi.org/10.1007/s40030-015-0138-7>.
- Hartig, J., Häußler-Combe, U. e Schicktanz, K. (2008), Influence of bond properties on the tensile behaviour of Textile Reinforced Concrete, *Cement and Concrete Composites*, 30(10), p. 898–906. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.08.004>.
- Jia, M., Xiao, X., Lu, X., Feng, G. e Qian, K. (2020), Influence of stacking sequence of basalt-fiber grilles on mechanical properties for textile-reinforced concrete and theoretical prediction, *Textile Research Journal*, 90(17–18), p. 1931–1947. <http://dx.doi.org/10.1177/0040517520903416>.

- Kandekar, S. B. e Talikoti, R. S. (2019), Torsional behaviour of reinforced concrete beam wrapped with aramid fiber, *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 31(4), p. 340–344. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jksues.2018.02.001>.
- Kim, H.-S., Truong, G. T., Park, S.-H. e Choi, K.-K. (2018), Tensile Properties of Carbon Fiber-Textile Reinforced Mortar (TRM) Characterized by Different Anchorage Methods, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 12(1), p. 73. <http://dx.doi.org/10.1186/s40069-018-0296-x>.
- Kong, K., Mesticou, Z., Michel, M., Si Larbi, A. e Junes, A. (2017), Comparative characterization of the durability behaviour of textile-reinforced concrete (TRC) under tension and bending, *Composite Structures*, 179, p. 107–123. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.07.030>.
- Koutas, L. N. e Bournas, Dionysios. A. (2017), Flexural Strengthening of Two-Way RC Slabs with Textile-Reinforced Mortar: Experimental Investigation and Design Equations, *Journal of Composites for Construction*, 21(1), p. 04016065. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000713](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000713).
- Koutas, L. N., Tetta, Z., Bournas, D. A. e Triantafillou, T. C. (2019), Strengthening of Concrete Structures with Textile Reinforced Mortars: State-of-the-Art Review, *Journal of Composites for Construction*. American Society of Civil Engineers, 23(1), p. 03118001. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000882](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000882).
- Larrinaga, P., Chastre, C., Biscaia, H. C. e San-José, J. T. (2014), Experimental and numerical modeling of basalt textile reinforced mortar behavior under uniaxial tensile stress, *Materials & Design*, 55, p. 66–74. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2013.09.050>.
- Li, B., Xiong, H., Jiang, J. e Dou, X. (2019), Tensile behavior of basalt textile grid reinforced Engineering Cementitious Composite, *Composites Part B: Engineering*, 156, p. 185–200. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.08.059>.
- Li, S., Yin, S., Wang, C. e Yang, Y. (2021), Research on the bonding performance of TRC permanent formwork and cast-in-place concrete, *Engineering Structures*, 235, p. 112021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112021>.
- Masood, F. (2019), Behaviour of Full Scale Reinforced Concrete Beams Strengthened with Textile Reinforced Mortar (TRM), *JOURNAL OF MECHANICS OF CONTINUA AND MATHEMATICAL SCIENCES*, 14(3). <http://dx.doi.org/10.26782/jmcms.2019.06.00006>.
- Mobasher, B., Dey, V., Cohen, Z. e Peled, A. (2014), Correlation of constitutive response of hybrid textile reinforced concrete from tensile and flexural tests, *Cement and Concrete Composites*, 53, p. 148–161. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.06.004>.
- Munck, M. D., El Kadi, M., Tsangouri, E., Vervloet, J., Verbruggen, S., Wastiels, J., Tysmans, T. e Remy, O. (2018), Influence of environmental loading on the tensile and cracking behaviour of textile reinforced cementitious composites, *Construction and Building Materials*, 181, p. 325–334. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.045>.
- Muresan, A. e Zwicky, D. (2020), Suitability Evaluation of Structural Analysis Approaches for Determining the Flexural Capacity of Reinforced Concrete Elements Strengthened with Textile-Reinforced Mortar, *Structural Engineering International*, 30(4), p. 545–550. <http://dx.doi.org/10.1080/10168664.2020.1776196>.
- Nguyen, C. H. e Ngo, Q. D. (2020), Flexural and Shear Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Carbon Textile Reinforced Concrete, *Archives of Civil Engineering*, 66(3), p. 407–426. <http://dx.doi.org/10.24425/ACE.2020.134405>.
- Ombres, L. (2014), Concrete confinement with a cement based high strength composite material, *Composite Structures*, 109, p. 294–304. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.10.037>.

- Ortlepp, R. (2018), Efficient Adaptive Test Method for Textile Development Length in TRC, *Advances in Civil Engineering*, 2018, p. 1–14. <http://dx.doi.org/10.1155/2018/4650102>.
- Park, J., Hong, S. e Park, S.-K. (2019), Experimental Study on Flexural Behavior of TRM-Strengthened RC Beam: Various Types of Textile-Reinforced Mortar with Non-Impregnated Textile, *Applied Sciences*, 9(10), p. 1981. <http://dx.doi.org/10.3390/app9101981>.
- Rambo, D. A. S., Yao, Y., de Andrade Silva, F., Toledo Filho, R. D. e Mobasher, B. (2017), Experimental investigation and modelling of the temperature effects on the tensile behavior of textile reinforced refractory concretes, *Cement and Concrete Composites*, 75, p. 51–61. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.11.003>.
- Raof, S. M. e Bournas, D. A. (2017), TRM versus FRP in flexural strengthening of RC beams: Behaviour at high temperatures, *Construction and Building Materials*, 154, p. 424–437. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.195>.
- Raof, S. M., Koutas, L. N. e Bournas, D. A. (2017), Textile-reinforced mortar (TRM) versus fibre-reinforced polymers (FRP) in flexural strengthening of RC beams, *Construction and Building Materials*, 151, p. 279–291. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.023>.
- Sarti Junior, L. A. (2020), “*Durabilidade de vigas de concreto armado reforçadas com mantas de CFRP submetidas a degradação acelerada*”. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de São Carlos - UFSCar. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/12781> (Acessado: 30 de abril de 2021).
- Sheng, J., Yin, S., Xu, S. e Jin, Z. (2018), Experimental and theoretical investigations on crack spacing and stiffness of textile-reinforced concrete–strengthened reinforced concrete beams, *Advances in Structural Engineering*, 21(11), p. 1696–1707. <http://dx.doi.org/10.1177/1369433218754333>.
- Si Larbi, A., Contamine, R. e Hamelin, P. (2012), TRC and hybrid solutions for repairing and/or strengthening reinforced concrete beams, *Engineering Structures*, 45, p. 12–20. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.06.002>.
- Tetta, Z. C. e Bournas, D. A. (2016), TRM vs FRP jacketing in shear strengthening of concrete members subjected to high temperatures, *Composites Part B: Engineering*, 106, p. 190–205. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.09.026>.
- Tetta, Z. C., Koutas, L. N. e Bournas, D. A. (2018), Shear strengthening of concrete members with TRM jackets: Effect of shear span-to-depth ratio, material and amount of external reinforcement, *Composites Part B: Engineering*, 137, p. 184–201. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.10.041>.
- Verbruggen, S., Tysmans, T. e Wastiels, J. (2014), TRC or CFRP strengthening for reinforced concrete beams: An experimental study of the cracking behaviour, *Engineering Structures*, 77, p. 49–56. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.07.040>.
- Verbruggen, S., Tysmans, T. e Wastiels, J. (2016), Bending crack behaviour of plain concrete beams externally reinforced with TRC, *Materials and Structures*, 49(12), p. 5303–5314. <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-016-0861-1>.
- Wakjira, T. G. e Ebead, U. (2018), FRCM/internal transverse shear reinforcement interaction in shear strengthened RC beams, *Composite Structures*, 201, p. 326–339. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.06.034>.
- Wakjira, T. G. e Ebead, U. (2019), Internal transverse reinforcement configuration effect of EB/NSE-FRCM shear strengthening of RC deep beams, *Composites Part B: Engineering*, 166, p. 758–772. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.03.004>.

- Yoo, D.-Y., Gohil, U., Gries, T. e Yoon, Y.-S. (2016), Comparative low-velocity impact response of textile-reinforced concrete and steel-fiber-reinforced concrete beams, *Journal of Composite Materials*, 50(17), p. 2421–2431. <http://dx.doi.org/10.1177/0021998315604039>.
- Younis, A. e Ebead, U. (2019), Bond and shear-strengthening performance of frcm composites, in *ISEC*. Chicago - United States (1), p. 1241–1246. <http://dx.doi.org/10.14455/ISEC.res.2019.32>.
- Younis, A., Ebead, U. e Shrestha, K. (2020), Tensile characterization of multi-ply fabric-reinforced cementitious matrix strengthening systems, *Structural Concrete*, 21(2), p. 713–723. <http://dx.doi.org/10.1002/suco.201900076>.
- Younis, A., Ebead, U. e Shrestha, K. C. (2017), Different FRCM systems for shear-strengthening of reinforced concrete beams, *Construction and Building Materials*, 153, p. 514–526. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.132>.
- Zargaran, M., Attari, N. K. A., Alizadeh, S. e Teymouri, P. (2017), Minimum reinforcement ratio in TRC panels for deflection hardening flexural performance, *Construction and Building Materials*, 137, p. 459–469. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.091>.