

Dimensionamento com o uso de compósito TRM/TRC para reforço à flexão de elementos de concreto armado segundo a norma americana ACI 549.4R (2020)

MATHEUS H. M. DE MORAES – ENG., ORCID <https://orcid.org/0000-0002-7285-1344> – matheus.h.h@hotmail.com;

GLÁUCIA MARIA DALFRÉ – PROF., ORCID <https://orcid.org/0000-0003-3623-5103>

HENRIQUE M. FRANCKLIN – PROF., ORCID <https://orcid.org/0000-0003-3623-5103>, UFSCAR;

BAHMAN GHIASSI – PROF., ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4212-8961>, UNIVERSITY OF BIRMINGHAM, REINO UNIDO

R E S U M O

OS MATERIAIS compósitos vêm ganhando destaque em obras de reparo e reforço estrutural pela sua fácil aplicabilidade, possibilidade de execução em locais de grande umidade, resistência ao fogo, resistência a ambientes de alta taxa de agressividade, e devido às suas propriedades mecânicas, tais como: a elevada resistência, alta rigidez e baixo peso próprio. Motivados

pela inexistência de normas brasileira para dimensionamento de estruturas reforçadas com a técnica do sistema de reforço com o uso de compósito TRM/TRC (*Textile Reinforced Mortar/Concrete*, em língua inglesa), este trabalho apresenta o modelo de dimensionamento da ACI 549.4R (2020) para o reforço à flexão com o uso de malha/grelha de FRP (*Fiber Reinforced Polymers*, em língua inglesa) embebidas em matriz cimentícia.

PALAVRAS-CHAVE: POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS, REFORÇO ESTRUTURAL, VIGAS DE CONCRETO ARMADO, TRM/TRC, MALHA/GRELHA DE FRP EM MATRIZ CIMENTÍCIA.

1. INTRODUÇÃO

Estruturas de concreto armado, com o passar dos anos, estão sujeitas ao processo natural de envelhecimento e podem sofrer com deterioração, degradação ocasionadas pela exposição a ambientes agressivos ou falta de manutenção preventiva. Além disso, pode ser necessário aumentar a capacidade resistente dos elementos existentes frente à alteração do uso da estrutura. Nesses casos, por exemplo, é necessário estudar técnicas de reforço de estruturas de concreto armado.

Diversas pesquisas visam ao desenvolvimento de novos materiais e metodologias para o reparo ou reforço de estruturas de concreto armado. Dentre as técnicas existentes, as baseadas no uso de FRP (*Fiber Reinforced Polymers*, em língua inglesa) têm ganhado destaque, pois, quando comparado ao concreto e aço, esse material apresenta elevada resistência e rigidez, baixa espessura e peso próprio. Além disso, o FRP é alta-

mente resistente à corrosão e à fadiga e possui adaptabilidade às diferentes formas. Os principais tipos de fibras contínuas utilizadas nos FRPs são vidro, aramida, basalto e carbono.

Dentre as formas de aplicação de reforço com compósitos, destaca-se a técnica EBR (*Externally Bounded Reinforcement*, em língua inglesa) e a NSM (*Near Surface Mounted*, em língua inglesa). No entanto, apesar do grande ganho de resistência e ductilidade obtida com o uso dessas técnicas, os sistemas de reforço que exigem a aplicação de resina epóxi, seja aderida à superfície (EBR) ou embebidas em entalhes (NSM), ficam susceptíveis à degradação frente à incidência de raios UVA/UVB, umidade, temperaturas elevadas e atos de vandalismo.

Segundo Kabir, Shrestha e Samali (2016), a exposição desses materiais compósitos ao ambiente externo é o principal agente agressivo na ligação do substrato do concreto e o FRP. Esta ligação se enfraquece com a absorção de

umidade, causando alterações na estrutura do compósito e levando à redução das propriedades mecânicas do conjunto, tal como módulo de elasticidade, a resistência à tração e a deformação última devido à plastificação, amolecimento e inchamento da matriz.

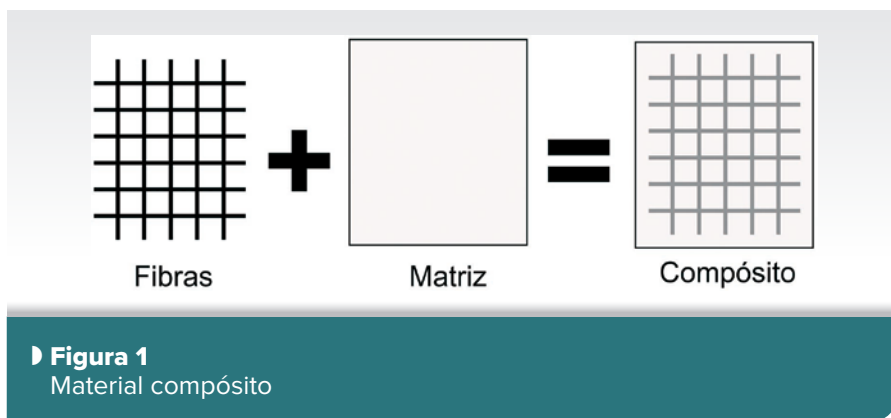
Como alternativa, propôs-se a substituição do ligante orgânico por um inorgânico como, por exemplo, argamassas ou concretos. Assim, o compósito feito de matriz à base de argamassa ou concreto reforçado com malha/grelha de FRPs, o qual foi denominado de TRM (*Textile-Reinforced Mortar*, em língua inglesa) ou TRC (*Textile-Reinforced Concrete*, em língua inglesa), possui o objetivo de mitigar a ação do meio ambiente sobre o compósito. Para além disso, esta é uma alternativa de reforço com custo inferior aos dos materiais comumente utilizados nas técnicas EBR e NSM, que foram impactadas devido ao grande aumento do custo da resina epóxi durante a pandemia da Covid-19.

2. COMPÓSITOS TRM/TRC

Os materiais compósitos são compostos por duas ou mais fases, por componentes de diferentes propriedades físicas e químicas diferentes. Neste caso, utiliza-se malha/grelha de FRP (fibra) embebida em uma matriz cimentícia (argamassa ou concreto), obtendo-se o material compósito apresentado na Figura 1.

2.1 Fibras

A fibra é o principal componente dos compósitos utilizados nas técnicas de reforço com compósito TRM ou TRC. Sua alta resistência e rigidez faz com que ela seja a principal responsável por resistir às tensões de tração. As fibras podem ser orientadas em uma direção, formando um compósito unidirecional, ou em múltiplas direções, formando um compósito bidirecional ou multidirecional. Essas orientações das fibras estão relacionadas às propriedades mecânicas dos compósitos de FRP. Geralmente, as fibras mais utilizadas na construção civil são as fibras de carbono, vidro, basalto e aramida. Para a confecção do TRM/TRC, as fibras contínuas apresentam-se na forma de malha/grelha quadrangular ou retangular, tal como o apresentado na Figura 2.



► **Figura 1**
Material compósito

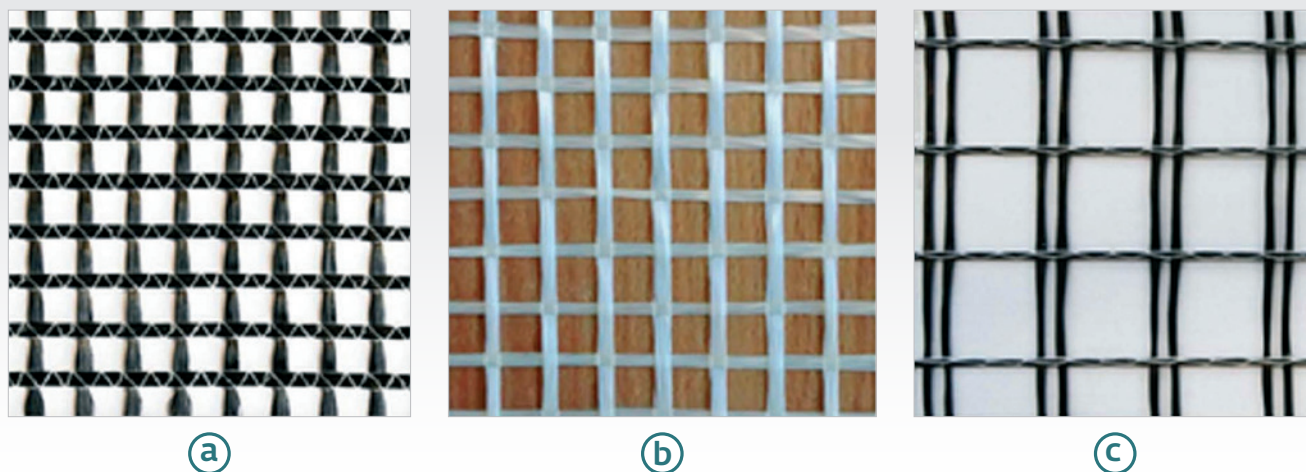
2.2 Matriz

A matriz que exerce a função de ligante para o compósito na técnica com uso de compósito TRM/TRC é a argamassa ou o concreto. Tais materiais são utilizados para promover a ligação ao substrato de concreto, além de embeber a malha/grelha de FRP, e auxiliar na distribuição de tensões. Ao submeter o compósito a um carregamento externo, a matriz entra em ação e exerce a função de transmitir e distribuir os esforços para as fibras. Além disso, a matriz protege as fibras contra a ação do meio ambiente e agentes agressivos, criando barreira que evita ataques físicos e químicos.

2.3 Compósitos

As fibras são embebidas pela matriz cimentícia formando o compósito de FRP, assim como mostra a Figura 3. No caso de uso de argamassa, obtém-se o compósito TRM, o qual geralmente apresenta espessura média de 1,5 cm e pode conter várias camadas de malha/grelha de fibras. Nos casos em que a matriz utilizada é o concreto, o material recebe a designação de TRC. O reforço com compósitos TRM/TRC usualmente é aplicado e curado *in situ*.

Devido à inexistência de normas brasileiras para dimensionamento da técnica com o uso de compósito TRC/TRM, este trabalho apresenta o modelo de dimensionamento da norma



► **Figura 2**
Malhas/grelhas de fibras: (a) Fibra de carbono, (b) Fibra de vidro e (c) Fibra de basalto
Fonte: Koutas *et al.* (2019)

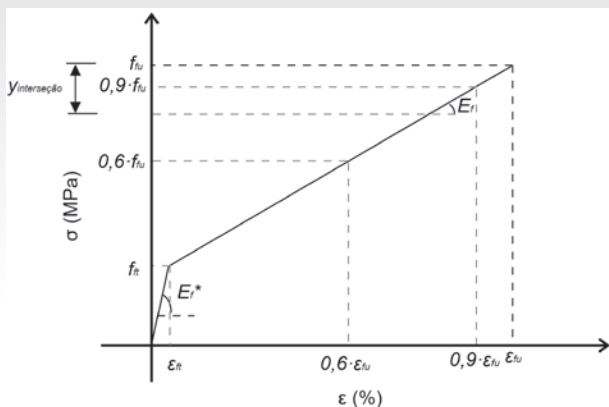


► **Figura 3**
Exemplo de moldagem
do compósito

americana ACI 549.4R (2020), a qual define o procedimento para aplicação do reforço à flexão com o uso de compósitos TRM ou TRC.

3. RECOMENDAÇÕES DE DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO À FLEXÃO SEGUNDO A ACI 549.4R (2020)

Segundo a norma ACI 549.4R (2020), o diagrama tensão versus deformação idealizado dos TRMs/TRCs apresenta comportamento típico à tra-



► **Figura 4**
Diagrama tensão versus deformação idealizado
dos TRMs/TRCs
Fonte: Adaptado de ACI 549.4R (2020)

ção tal como o apresentado na Figura 4. Pela análise da Figura percebe-se o comportamento bilinear de um corpo de prova tracionado, onde o primeiro trecho apresenta comportamento elástico-linear até a fissuração da matriz cimentícia, a qual ocorre com a tensão e deformação, respectivamente, com módulo de elasticidade da matriz cimentícia não fissurada E_f . Posteriormente, após a redução da rigidez e transferência de força para as fibras, existe um novo trecho com comportamento elástico-linear até a ruptura do corpo de prova, a qual ocorre com a tensão e deformação, respectivamente, e com módulo de elasticidade da matriz cimentícia fissurada, E_f^* , a qual é determinado para os níveis de tensão e (Equação 1).

$$[1] \quad E_f = \frac{\Delta_f}{\Delta_\varepsilon} = \frac{(0,90 \cdot f_{fu} - 0,60 \cdot f_{fu})}{(\varepsilon_{f0,90 \cdot f_{fu}} - \varepsilon_{f0,60 \cdot f_{fu}})}$$

A deformação última (ε_{ru}) é obtida pela interseção em y da linha utilizada para a determinação de E_f , a qual é obtida com o uso das Equações 2 e 3.

$$[2] \quad y_{interseção} = (0,60 \cdot f_{fu} - E_f \cdot \varepsilon_{f0,60 f_{fu}})$$

$$[3] \quad \varepsilon_{fu} = \frac{(f_{fu} - y_{interseção})}{E_f}$$

Segundo a norma ACI 549.4R (2020), o dimensionamento do reforço à flexão com uso de compósito TRM/TRC aderido ao substrato de concreto é baseado nas seguintes premissas:

- seções planas antes do carregamento permanecem planas após o carregamento;
- não há escorregamento entre o reforço externo e o substrato de concreto, caracterizan-

do uma aderência perfeita entre materiais;

- a deformação máxima permitida no concreto comprimido é de 3 ‰; e
- o TRC/TRM apresenta comportamento bilinear e somente o segundo trecho (fissurado) é utilizado no dimensionamento.

A resistência à flexão de uma seção reforçada depende do modo de ruína previsto, que podem se apresentar na forma de:

- Esmagamento do concreto comprimido antes do escoamento da armadura existente;
- Escoamento da armadura com posterior esmagamento do concreto comprimido;
- Delaminação por cisalhamento do cobrimento;
- Destacamento do material de reforço;
- Falha de aderência em regiões de transição; e
- Deslizamento da malha/grelha de fibra embebida pela matriz cimentícia.

3.1 Estado Limite Último da seção reforçada

A norma ACI 549.4R (2020) determina que seja utilizado o menor dos valores obtidos na avaliação da deformação última (ε_{ru}), a qual é experimentalmente obtida da deformação efetiva (ε_{fe}) devida à tração no TRM/TRC atingida de caso de ruptura ou da deformação de cálculo à tração (ε_{fd}), tal como apresentado na Equação 4, onde tais valores são limitados em 12‰.

$$[4] \quad \varepsilon_{fe} = \varepsilon_{fd} = \varepsilon_{fu} = 0,012$$

Aplicando-se a Lei de Hooke, obtém-se a tensão efetiva de tração no TRM/TRC (f_{fe}), a qual é calculada de acordo com a Equação 5 e onde E_f é Módulo de elasticidade de do TRM/TRC.

$$[5] \quad f_{fe} = E_f \cdot \varepsilon_{fe}, \text{ onde } \varepsilon_{fe} \leq \varepsilon_{fd}$$

3.2 Estado Limite Último para a viga reforçada

O procedimento de cálculo adotado pela norma ACI 549.4R (2020) é similar ao da ACI 440.2R (2017), tratando-se de um método iterativo que

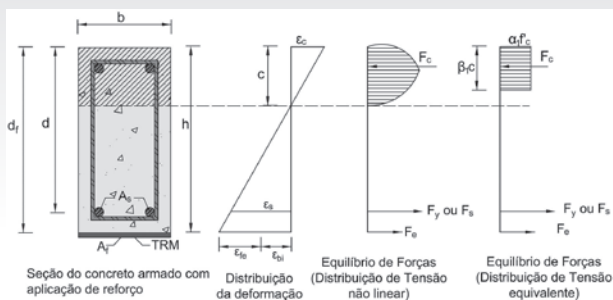


Figura 5
Equilíbrio de forças de uma seção retangular de uma viga reforçada

Fonte: Adaptado ACI 549.4R (2020)

envolve a estimativa inicial de um valor para profundidade da linha neutra (c), que permite o cálculo da deformação de cada material presente na seção transversal, nomeadamente concreto, aço e material de reforço, considerando-se a compatibilidade entre os materiais e o equilíbrio de forças na seção avaliada, tal como apresentado na Figura 5. A norma ACI 549.4R (2020) ainda define que, caso as forças resultantes não estejam em equilíbrio, a posição do eixo neutro deve ser revista e o processo iterativo deve ser repetido.

Nesta Figura, d_f é a altura útil do sistema de reforço à flexão, d é a altura útil da viga, b é a largura da viga, h é a altura total da viga; A_f é área da seção transversal da malha/grelha de fibra utilizada no reforço com uso do TRM/TRC (por unidade de comprimento), A_s é a área da seção transversal da armadura longitudinal existente, c é a posição inicial da linha neutra, ϵ_c e ϵ_s são as deformações do concreto e da armadura longitudinal, respectivamente, ϵ_{bi} é a deformação do concreto no momento da aplicação do reforço, ϵ_{fe} é deformação efetiva no TRM/TRC alcançado na ruína, F_c é a força resultante de compressão no concreto, F_s é a força resultante da armadura longitudinal tracionada, F_{fe} é a força resultante no TRM/TRC tracionado, β_1 é razão da profundidade do bloco retangular comprimido equivalente para a profundidade da linha neutra, α_1 é fator de determinação da inten-

sidade equivalente retangular da distribuição da tensão de compressão no concreto e f'_c é a resistência característica do concreto.

O cálculo do sistema de reforço é iniciado com a determinação da deformação no substrato de concreto que receberá o mate-

rial de reforço no momento da aplicação (ϵ_{bi}), com o uso das Equações 6 a 11, onde M_{DL} é o momento fletor devido à atuação do peso próprio, E_c é o módulo de elasticidade do concreto e E_s é o módulo de elasticidade do aço.

$$[6] \quad n = \frac{E_s}{E_c}$$

$$[7] \quad B = \frac{b}{n \cdot A_s}$$

$$[8] \quad I_g = \frac{b \cdot h^3}{12}$$

$$[9] \quad k \cdot d = \frac{(\sqrt{2 \cdot d \cdot B + 1} - 1)}{B}$$

$$[10] \quad I_{cr} = \frac{b \cdot k^3 \cdot d^3}{3} + n \cdot A_s (d - k \cdot d)^2$$

$$[11] \quad \epsilon_{bi} = \frac{M_{DL} \cdot (d_f - k \cdot d)}{I_{cr} \cdot E_c}$$

O dimensionamento da técnica de reforço à flexão com o uso de compósitos TRC/TRM segue mesma metodologia apresentada na norma ACI 440.2R (2017). Para dar início ao dimensionamento, arbitra-se uma posição inicial para a posição da linha neutra (c). O valor para a profundidade de linha neutra recomendado pela norma para a primeira iteração é igual a $0,2 \cdot d$. Isso permite calcular a deformação efetiva do sistema de reforço (ϵ_{fe}) com o uso da Equação 12, onde ϵ_{cu} é a deformação última do concreto.

$$[12] \quad \epsilon_{fe} = \epsilon_{cu} \left(\frac{d_f - c}{c} \right) - \epsilon_{bi} \leq \epsilon_{fd}$$

Uma vez que as intensidades de tensão e deformação no TRM/TRC foram obtidas, as deformações na armadura longitudinal e no concreto são determinadas com o uso da Equações 13 e 14, respectivamente. Assim com a tensão no aço (f_s) que é obtido por meio da Equação 15.

$$[13] \quad \epsilon_s = (\epsilon_{fe} + \epsilon_{bi}) \cdot \left(\frac{d - c}{h - c} \right)$$

$$[14] \quad \epsilon_c = (\epsilon_{fe} + \epsilon_{bi}) \cdot \left(\frac{c}{h - c} \right)$$

$$[15] \quad f_s = E_s \cdot \epsilon_s \leq f_y$$

Com as tensões e deformações na armadura longitudinal e no material de reforço (TRM/TRC) determinados, verifica-se a condição de equilíbrio da seção, as quais são calculadas com o uso das Equações 16 a 19, onde ϵ'_c é a deformação máxima do concreto, ϵ'_c é a deformação do concreto não confinado, E_c é o módulo de elasticidade do concreto e A_s é a área da seção transversal da armadura longitudinal existente.

$$[16] \quad \epsilon'_c = \frac{1,7 \cdot f'_c}{E_c}$$

$$[17] \quad \beta_1 = \frac{4 \cdot \epsilon'_c - \epsilon_c}{6 \cdot \epsilon'_c - 2 \cdot \epsilon_c}$$

$$[18] \quad \alpha_1 = \frac{3 \cdot \epsilon'_c \cdot \epsilon_c - \epsilon_c^2}{3 \cdot \beta_1 \cdot \epsilon_c'^2}$$

$$[19] \quad c = \frac{A_s \cdot f_s + A_f \cdot f_{fe}}{\alpha_1 \cdot f'_c \cdot \beta_1 \cdot b}$$

Finaliza-se o procedimento de cálculo para ELU caso a posição calculada da linha neutra seja igual a arbitrada. Caso a profundidade de linha neutra arbitrada seja diferente da obtida, o equilíbrio entre os blocos comprimidos e tracionados não foi atingido. Assim, arbitra-se nova profundidade e reinicia-se o dimensionamento.

O Momento nominal resistente (M_n) do elemento reforçado pode ser

encontrado com o uso da Equação 22, a qual consiste na somatória das parcelas do momento nominal resistido pela armadura (M_{ns}) e o momento nominal resistido pelo material de reforço (M_{nf}), apresentados pelas Equações 20 e 21, respectivamente.

$$[20] \quad M_{ns} = A_s \cdot f_s \left(d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right)$$

$$[21] \quad M_{nf} = A_f \cdot f_{fe} \cdot \left(d_f - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right)$$

$$[22] \quad M_n = M_{ns} + M_{nf}$$

O momento último (M_u) é obtido com o produto do momento nominal resistente (M_n) e o fator de redução (ϕ), assim como apresentado na Equação 24. O fator de redução (ϕ) é obtido com uso da Equação 23 e depende da deformação do aço obtida no dimensionamento (ϵ_s) e da deformação de início de escoamento do aço utilizado (ϵ_{sy}).

$$[23] \quad \phi = \begin{cases} 0,90 & \text{para } \epsilon_s \geq 0,005 \\ 0,65 + \frac{0,25(\epsilon_s - \epsilon_{sy})}{0,005 - \epsilon_{sy}} & \text{para } \epsilon_{sy} < \epsilon_s < 0,005 \\ 0,65 & \text{para } \epsilon_s \leq \epsilon_{sy} \end{cases}$$

$$[24] \quad M_u = \phi \cdot M_n$$

3.3 Estado Limite Serviço para a viga reforçada

Após o dimensionamento em ELU, é preciso realizar as verificações em ELS. A norma ACI 549.4R (2020) recomenda a verificação das tensões no aço e no reforço, de modo a evitar deformações inelásticas no aço e possíveis rupturas devido à fadiga e carregamento cíclicos no reforço. As tensões no aço em serviço ($f_{s,s}$) e no TRM/TRC ($f_{f,s}$) podem ser calculadas com o uso das formulações apresentadas nas Equações 25 e 28, as quais são encontradas na norma ACI 440.2R (2017).

A tensão no aço sob as cargas de serviço ($f_{s,s}$) é determinada com o uso da Equação 25, a qual é baseada na análise da seção fissurada de concreto armado reforçada. Recomenda-se que a tensão de serviço encontrada para o aço deve ser limitada em 80% de sua tensão característica de escoamento (f_y), tal como apresentado na Equação 26.

$$[25] \quad f_{s,s} = \frac{\left[M_s + \epsilon_{bt} \cdot A_f \right] \cdot E_f \cdot \left(d_f - \frac{c}{3} \right)}{A_s \cdot E_s \cdot \left(d - \frac{c}{3} \right) \cdot (d - c) + A_f \cdot E_f \cdot \left(h - \frac{c}{3} \right) \cdot (h - c)}$$

$$[26] \quad f_{s,s} \leq 0,80 \cdot f_y$$

Já a tensão no aço sob carregamento cíclico ($f_{f,s}$) deve ser limitado a 65% de sua tensão característica de escoamento do aço existente (f_y), tal como apresentado na Equação 27.

$$[27] \quad f_{f,s} \leq 0,65 \cdot f_y$$

Já a tensão no material de reforço sob carregamento cíclico ($f_{f,s}$) deve obedecer aos limites impostos para cada tipo de material de acordo com o indicado na Tabela 1 (ACI 549.4R, 2020), a qual é obtida com uso da Equação 28.

$$[28] \quad f_{f,s} = f_{s,s} \cdot \frac{E_f}{E_s} \cdot \frac{d_f - c}{d - c} - \epsilon_{bt} \cdot E_f$$

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação de materiais compósitos com FRP (*Fiber Reinforced Polymer*, em língua inglesa) tem sido objeto de discussão em obras de reforço estrutural. Dentre as diversas técnicas existentes de reparo e reforço de estruturas de concreto armado aplicando-se FRPs, apresenta-se o modelo de dimensionamento com a técnica com uso de compósito TRM ou TRC à flexão, o qual ainda não é tão difundido e utilizado no Brasil.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. 

► Tabela 1

Carga de serviço e tensão cíclica limite para o reforço com TRC/TRM

Tipo de tensão	Tipo de fibra					
	Vidro	Aramida	Basalto	Carbono	PBO*	Aço
Fluência e fadiga	$0,30 \cdot f_{fu}$	$0,40 \cdot f_{fu}$	$0,30 \cdot f_{fu}$	$0,55 \cdot f_{fu}$	$0,40 \cdot f_{fu}$	$0,55 \cdot f_{fu}$

* Phenylene benzobisoxazole (PBO) – Fonte: Adaptado de ACI 549.4R (2020)

► REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI COMMITTEE. ACI 440.2R: Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. Michigan - USA, ACI, 2017.
- _____. Guide to Design and Construction of Externally Bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix and Steel-Reinforced Grout Systems for Repair and Strengthening of Concrete Structures - ACI 549.4R. Michigan - USA, ACI, 2020.
- KABIR, M. I.; SAMALI, B.; SHRESTHA, R. "Fracture Properties of CFRP-Concrete Bond Subjected to Three Environmental Conditions", *Journal of Composites for Construction*, v. 20, n. 4, p. 04016010, 2016. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000665.
- KOUTAS, L. N.; TETTA, Z.; BOURNAS, D. A.; TRIANTAFILLOU, T. C. "Strengthening of Concrete Structures with Textile Reinforced Mortars: State-of-the-Art Review", *Journal of Composites for Construction*, v. 23, n. 1, p. 01–20, 2019. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000882.