

ANCORAGEM E PROTENSÃO DO SISTEMA DE POLÍMEROS REFORÇADO COM FIBRA: UMA ABORDAGEM COM AUXÍLIO DA META ANÁLISE

REMOR, Marcelo Bevilacqua¹
TOZO NETO, Julio²

RESUMO: O sistema de polímero reforçado com fibra é utilizado para reforços em estruturas comprometidas ou com alteração no uso e ocupação. Entretanto, o descolamento prematuro do polímero reforçado com fibras do elemento estrutural é a falha mais comum do sistema. Neste sentido, o artigo tem como objetivo determinar o tipo de ancoragem e taxa de protensão que gera a maior rigidez a flexão em sistemas polímeros reforçados com fibra, com o auxílio da meta análise. Foi realizada uma pesquisa bibliográfica em bases científicas, os dados dos artigos que passaram nos critérios de inclusão foram tabulados, e posteriormente realizada a meta análise. Foi utilizado o método estatístico inverso da variância, com análise do modelo sendo por efeitos randomizados e a mensuração do efeito realizada por meio da diferença da média. Como resultados principais pode-se ressaltar que a ancoragem do sistema de polímero reforçado com fibra aumenta a resistência do elemento estrutural a flexão. Assim como, a protensão nos níveis de 40-50% da resistência da fibra a tração. A meta análise se mostrou eficaz para análise dos dados obtidos na pesquisa bibliográfica.

Palavras-chave: ancoragem, meta análise, PRF, protensão, resistência a flexão.

¹Discente, Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário Assis Gurgacz, Cascavel - PR. E-mail: remor_@hotmail.com.

² Docente, Mestre, Engenharia Civil, Centro Universitário Assis Gurgacz, Cascavel – PR.

1. INTRODUÇÃO

Muitas tecnologias têm surgido no mercado da construção civil com o objetivo de serem empregadas para realização de reforços estruturais. Dentre estas, os sistemas de polímeros reforçados com fibra (PRF) se destacam por apresentar características como resistência a corrosão e a tração; alta relação força-peso e durabilidade; boas propriedades de fadiga; interrupção mínima; e fácil manuseio (NASER, HAWILEH e ABDALLA, 2019). Estudo demonstra que com a aplicação adequada do sistema PRF a capacidade de carga do elemento estrutural pode dobrar (SADDIKA, *et al.*, 2019). Neste sentido, o sistema PRF vem sendo utilizado para aumentar a rigidez de vigas e pilares de concreto armado em estruturas preexistentes, que não cumprem os códigos de construção ou que devem suportar o aumento da carga estática por alteração do uso e ocupação da edificação. Este pode ser utilizado também na restauração e conservação de edifícios históricos, uma vez que não altera os elementos arquitetônicos da edificação.

Embora o sistema PRF possua muitas vantagens, pode ocorrer o descolamento prematuro entre o concreto e o PRF. Essa falha pode ser mitigada com a utilização de âncoras do tipo “U” nas extremidades do elemento estrutural, com o objetivo de reforçar a fixação ao concreto (CHEN *et al.*, 2018). Entretanto, a maioria dos estudos experimentais com âncoras do tipo “U” utiliza larguras relativamente estreitas (200 – 300 mm de largura) e mais estudos são necessários para avaliar o desempenho (KALFAT, *et al.*, 2018). A ancoragem além de retardar a delaminação do sistema PRF, aumenta a vida útil e a capacidade do sistema. Outra forma de aumentar a capacidade de carga do sistema PRF é a utilização da protensão. Neste sentido, a ancoragem e protensão podem gerar redução de material utilizado e aumento na segurança das estruturas e da vida útil do sistema, gerando assim, redução nos custos.

Neste contexto, a pergunta a ser respondida com a realização dessa pesquisa será a seguinte: A ancoragem e a protensão de sistemas de polímeros reforçados com fibra proporcionam aumento na resistência a flexão dos elementos estruturais?

Este estudo está limitado a verificação das ancoragem, PRF *U-Jacket* alinhadas a 90° e a 45° e ancoragens metálicas em elementos estruturais com mais de 250 cm de comprimento. A taxa de protensão foi verificada apenas em estudos com elementos estruturais em escala real e com ancoragem. O fator econômico não foi considerado.

De acordo com todas as informações expostas, este trabalho tem como objetivo geral determinar o método de ancoragem e taxa de protensão que gera a maior rigidez a flexão em sistemas polímeros reforçados com fibra.

Salienta-se que para que este trabalho científico possa ter pleno êxito, os seguintes objetivos específicos serão propostos:

- a) Utilizar a meta análise para determinar o tipo de ancoragem que gera a maior rigidez a flexão em sistemas de polímeros reforçados com fibra;
- b) Utilizar a meta análise para verificar se a protensão do sistema de polímero reforçado com fibra aumenta a rigidez a flexão do elemento estrutural.
- c) Utilizar a meta análise para determinar a taxa de protensão que gera a maior rigidez a flexão em sistemas de polímeros reforçados com fibra.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sistema de polímeros reforçados com fibras

Os polímeros reforçados com fibras (PRF) são materiais compósitos, compostos por fibras contínuas de alta resistência incorporadas em uma matriz polimérica (NASER, HAWILEH e ABDALLA, 2019). As fibras embutidas constituem os principais elementos de reforço, enquanto a matriz polimérica atua como agente aglutinante que protege e transfere as cargas para as fibras (SADDIKA, *et al.*, 2019). Existem três tipos de fibras mais usadas na construção civil que incluem as fibras de vidro, fibras de aramida e fibras de carbono. As matrizes poliméricas (resinas) são classificadas em dois grupos, as termofixas e as termoplásticas. Os éster-vinílicos, epóxis e poliésteres são agrupados em matrizes termofixas, as quais, são utilizadas com maior destaque na construção civil devido o melhor desempenho mecânico, melhores propriedades de impregnação e adesão às fibras (HUANG, *et al.*, 2017). Já as resinas termoplásticas como polietileno, cloreto de polivinila, polipropileno e poliuretano possuem custo de produção maior e são sensíveis às condições ambientais circundantes (NASER, HAWILEH e ABDALLA, 2019).

Os polímeros reforçados com fibra, além de serem classificados de acordo com a sua composição também podem ser classificados quanto a sua forma, laminado e barras. No caso dos laminados de PRF, unidirecional ou bidirecional, estes podem ser aplicados na superfície da estrutura de concreto, após a preparação da superfície externa, por abrasão mecânica, jato

de areia ou jato de água de alta pressão (HUO *et al.* 2018; PHAM e HOU, 2017). A preparação da superfície pode gerar um aumento no ganho de capacidade de carga de até 12% (SADDIKA, *et al.*, 2019). O PRF na forma de barra, por sua vez, pode ser utilizado engastado na face externa do elemento estrutural. Neste caso, realizam-se ranhuras longitudinais no elemento com diâmetro compatível a barra que se deseja utilizar e posteriormente realiza-se o engastamento longitudinal com resina (LI *et al.*, 2018; HASSAN *et al.*, 2020). Outra forma de utilização do PRF é a substituição, parcial ou total, das barras de aço da armadura por barra de PRF (ACI 440.1R-15, 2015; ELMESSALAMI, EL-REFAI e ABED, 2019).

Os sistemas PRF possuem características especiais, como resistência a corrosão e a tração, alta relação força-peso, durabilidade, boas propriedades de fadiga, interrupção mínima e manuseio fácil (NASER, HAWILEH e ABDALLA, 2019). Além disso, possui superfícies irregulares, sendo um isolante elétrico e não possui uma assinatura magnética (KANG *et al.*, 2014). O peso unitário dos PRF varia de $1,2 \text{ g cm}^{-3}$ a $2,1 \text{ g cm}^{-3}$, são até 5 vezes mais leves e a resistência à tração é de 8 a 10 vezes maior que a do aço convencional (YAN *et al.*, 2020). Estes sistemas não devem ser utilizados como reforços em aplicações estruturais, porque sua resistência à compressão é menor que sua resistência à tração (SIDDIKA *et al.*, 2019). No entanto, estudo indica que a aplicação do PRF para confinamento de peças em concreto armado pode aumentar sua resistência à compressão (BAASANKHUU, CHOI e HA, 2020). Reforços PRF exibem um baixo módulo de elasticidade e comportamento elástico linear antes da falha, devido à sua pouca plasticidade e natureza frágil (DONG *et al.*, 2016).

Uma das principais desvantagens dos sistemas PRF é o descolamento prematuro do reforço de PRF do substrato em um nível de deformação que é tipicamente uma pequena fração da deformação de ruptura (NASER, HAWILEH e ABDALLA, 2019; SADDIKA, *et al.*, 2019). Entretanto, essa falha pode ser mitigada com a utilização de métodos de ancoragem (CHEN *et al.*, 2018). Outra desvantagem da utilização do sistema PRF está no fato de não possuir normatização pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, isso se traduz em vulnerabilidade em processos jurídicos contra o engenheiro, pois ele não possui normativas para nortear e justificar os cálculos do projeto.

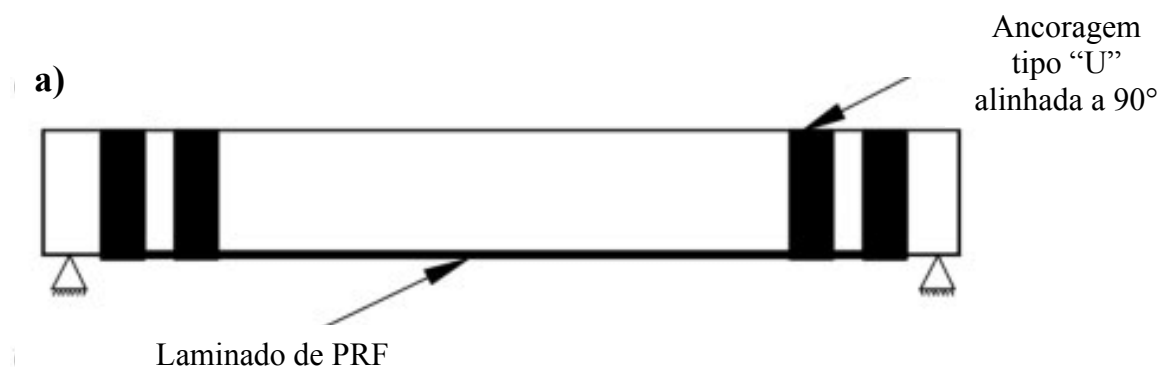
2.2 Ancoragem em sistemas de polímeros reforçados com fibras

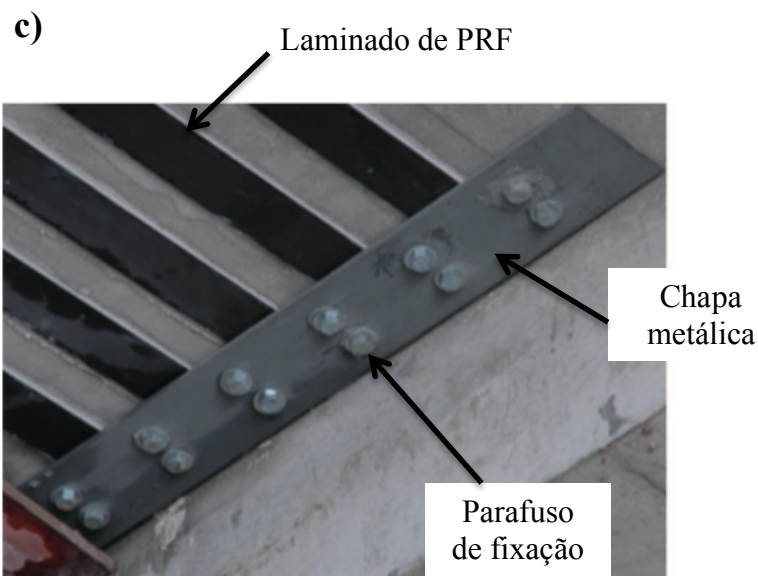
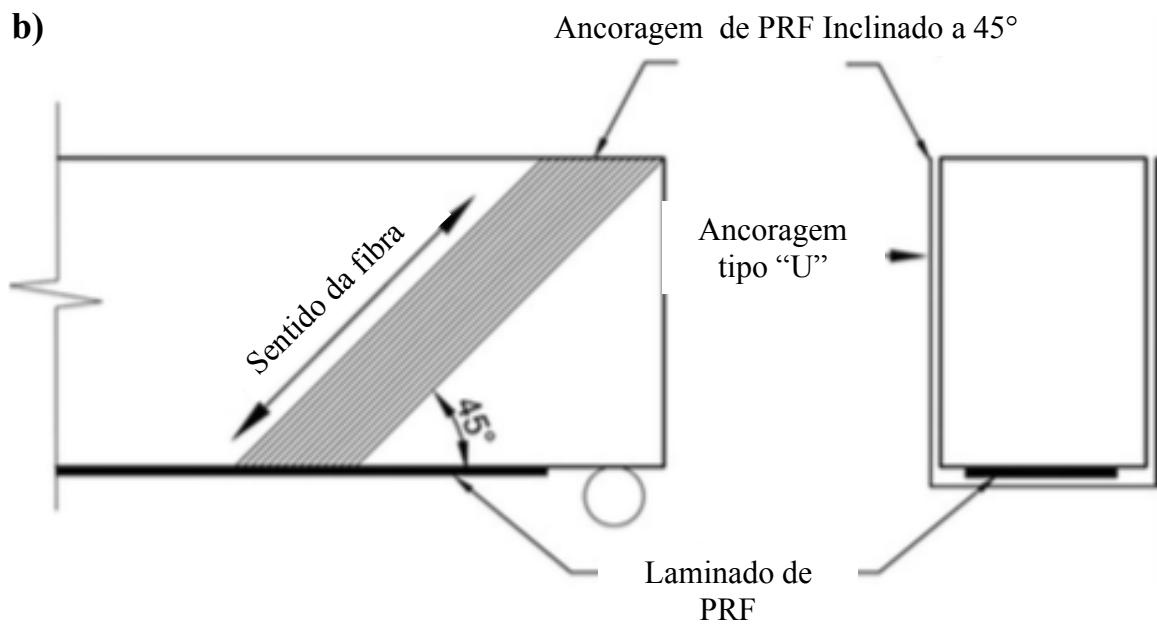
As falhas de descolamento quase sempre ocorrem dentro do concreto ou na interface concreto-PRF (SADDIKA, *et al.*, 2019). Muitos fatores controlam a probabilidade de

ocorrência desta falha, como: o nível de reforço interno de aço; a distância entre uma extremidade da placa e o suporte da viga adjacente; comprimento da placa de PRF, largura, espessura e módulo de elasticidade; interação cisalhamento-momento; resistência do concreto e geometria da seção (KALFAT, *et al.*, 2018). A desvantagem inerente levou a pesquisas recentes sobre a melhoria da resistência de união do PRF ao concreto e à introdução de sistemas de ancoragem eficientes.

O papel principal da ancoragem do sistema PRF é prevenir ou retardar o processo de descolamento. As âncoras utilizadas no sistema podem ser classificadas de acordo com o material constituinte, sendo metálicas ou de PRF. As âncoras metálicas são caracterizadas por grampos, pinos ou parafusos que são fixados nas extremidades do PRF com o intuito de evitar a delaminação e aumentar a ductilidade (SADDIKA, *et al.*, 2019). Entre as âncoras de PRF tem-se os pinos ou espigões que são introduzidos parcialmente em furos realizados no elemento estrutural, a porção externa do pino é achatada em forma de leque ou borboleta (KALFAT, *et al.*, 2018). Outro método é a aplicação de âncoras tipo “U” nas extremidades do elemento estrutural, conforme Figura 1. Essa âncora é feita de PRF laminado e envolve o elemento estrutural em forma de “U” aumentando a resistência ao descolamento (CHEN *et al.*, 2018). O terceiro modelo de âncora é o tipo “ π ” (Pi), este método envolve a união de uma placa frontal de PRF integrada com dois pinos monolíticos através da placa. A placa tem 200 mm de comprimento, 50 mm de largura e 3 mm de espessura e cada pino tem 10 mm de diâmetro e 90 mm de comprimento (KALFAT, *et al.*, 2018). A âncora “ π ” é fabricada integralmente em PRF.

Figura 1 – Tipos de ancoragem a) ancoragem tipo “U” alinhada a 90°; b) ancoragem tipo “U” alinhada a 45°; c) ancoragem metálica.





Fonte: adaptado de Al-Mahaidi e Kalfat (2018).

A ancoragem tipo “U” é aplicada nas extremidades intradorso do elemento estrutural e reduzem a probabilidade de falha no descolamento da cobertura de concreto por meio de dois mecanismos: (a) reduzindo as tensões de descamação interfacial (normal) entre o concreto e o PRF; e (b) restringir a propagação de trincas horizontais ao nível das barras de aço tensionadas (CHEN *et al.*, 2018). No entanto, a largura das faixas verticais do tipo “U” devem possuir espessura suficiente para suprimir a falha de separação da cobertura de concreto (KALFAT, *et al.*, 2018). As âncoras do tipo “U” demonstraram eficácia no retardo do descolamento entre o concreto e o PRF (CHEN *et al.*, 2018). Entretanto, a maioria dos

estudos experimentais com este tipo de âncoras utilizou larguras relativamente estreitas (200 – 300 mm de largura) e mais estudos são necessários para avaliar o desempenho (KALFAT, *et al.*, 2018).

2. 3 Protensão em sistemas de polímeros reforçados com fibras

A protensão da armadura de PRF aumenta significativamente a resistência a flexão, por meio da inserção de um estado prévio de tensões no elemento estrutural, criando tensões contrárias àquelas que podem inviabilizar a estrutura (ASLAM *et al.*, 2015). A protensão faz com que a faixa de trabalho do concreto passe para o domínio das tensões de compressão, onde o material é mais eficiente (SCHMIDT *et al.*, 2019). Quando as tensões provocadas pelos carregamentos externos são inferiores as tensões prévias de compressão, o elemento continua comprimido, aproveitando toda a área de concreto (DENG *et al.*, 2021). O aumento da resistência a flexão é mais pronunciada à medida que a força de protensão é aumentada. Entretanto, a ductilidade e a deformabilidade da viga reforçada são reduzidas à medida que o nível de protensão é aumentado (ASLAM *et al.*, 2015).

Os sistemas de PRF protendidos com ligação externa podem fornecer vantagens estruturais diretas como: o aumento da capacidade de carga do elemento; redução das deflexões; redução e retardado no aparecimento de trincas e menos problemas de manutenção (HONG e PARK, 2016). Apesar das vantagens, estes sistemas estão associados a problemas técnicos que devem ser resolvidos, sendo o maior problema relacionado à ancoragem inadequada do sistema PRF (ZHAO, MEI e WU, 2020); outro problema, é a força de tração nos reforços PRF que quando liberada gera tensões de cisalhamento longitudinais na interface entre o concreto e o reforço de PRF (HONG e PARK, 2016). Portanto, na maioria dos casos, a ancoragem deve ser aplicada nas extremidades do sistema PRF (NASER, HAWILEH e ABDALLA, 2019).

A protensão do sistema PRF demonstrou melhorar a capacidade dos materiais que estão associados com propriedades de alta resistência à tração, ao mesmo tempo que demonstra a capacidade de aumentar a carga de vigas de concreto em seu estado limite de serviço (SCHMIDT *et al.*, 2019). Estudo demonstra aumento da carga de ruptura do elemento estrutural em 85% e as deflexões diminuíram em 43% com aplicação de protensão (HONG e PARK, 2016), além disso, a resistência ao momento final aumentou 121% quando comparada a utilização de concreto armado (GAO *et al.*, 2020). Entretanto, a taxa de protensão aplicada

no sistema PRF deve ser menor que 50% da resistência do polímero a tração (HONG e PARK, 2016).

3. METODOLOGIA

3.1 Tipo de estudo

O presente estudo é caracterizado como uma meta-análise. A meta-análise é um método destinado a examinar os resultados de várias investigações sobre um mesmo tópico (CONN *et al.*, 2012). Esta é justificada, pois, muitos estudos sobre um determinado tema são concordantes, entretanto, podem apresentar discordância, fato que aumenta a necessidade de análises conjuntas para que se possa gerar conclusões com maior segurança (JACKSON *et al.*, 2011). Os principais passos de uma meta-análise são: (1) a pesquisa bibliográfica, (2) a transformação dos resultados de cada estudo do agrupamento em uma medida comum, (3) a verificação da homogeneidade dos resultados e, finalmente, (4) a modelagem da variação entre estudos (CONN *et al.*, 2012).

3.2 Pesquisa bibliográfica

A pesquisa bibliográfica foi realizada nas bases *Science Direct*, *Scopus*, *Springer Science*, *Taylor & Francis* e *Wiley Library*. Os descritores utilizados foram [FRP OR fiber reinforced polymer AND anchorage] e [FRP OR fiber reinforced polymer AND prestressing].

Os critérios para inclusão dos estudos foram: (1) comprimento mínimo do elemento estrutural de 250 cm; (2) pelo menos dois elementos estruturais como controle; (3) pelo menos dois elementos estruturais em cada tratamento; (4) apresentar o carregamento último do elemento estrutural; e (5) descrever o modo de falha do elemento estrutural. Os estudos que não contemplam os cinco itens foram desconsiderados para elaboração do banco de dados.

3.3 Tabulação dos dados

Primeiramente foi realizada a coleta e tabulação dos dados referentes a ancoragem, com intuito de verificar se a ancoragem aumenta a resistência a flexão do elemento estrutural.

Os dados coletados estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – Comparação entre elementos estruturais com ancoragem e sem ancoragem.

Estudo	L0 (cm)	Controle (sem ancoragem)		Ancoragem		
		Pu (kN)	Falha	Pu (kN)	Método	Falha
Al-Saidy et al. 2010	250	50,18	D	66,25	90°	R
Al-Tamimi et al. 2011	269	49,85	D	62,13	90°	C
Chem et al. 2018	250	74,34	D	95,26	45°	R
Chen et al. 2018	250	74,34	D	84,56	90°	R
Deifalla e Ghobarah, 2010	340	109,00	D	180,00	Metálica	C
Ekenel et al., 2006	290	33,20	D	52,37	90°	R
Fu et al., 2017(a)	360	121,00	D	129,07	45°	R
Fu et al., 2017(b)	355	258,60	D	319,05	45°	C
Galal e Mofidi, 2010	250	101,00	D	138,50	Metálica	R
Garden e Hollaway, 1998	300	33,78	D	44,14	Metálica	R
Lamanna et al. 2004	366	136,35	D	148,64	90°	R
Spadea et al. 1998	500	74,80	D	98,55	Metálica	R
Spadea et al. 2000	500	80,80	D	97,95	90°	R
Tang et al. 2017	360	102,10	D	125,85	45°	C
Wu e Huang, 2008	250	34,22	D	62,31	Metálica	R
Yalim et al. 2008	270	142,53	D	157,18	90°	R

Fonte: autor (2021); L0: comprimento do elemento estrutural; Pu: média do carregamento último; D: descolamento do PRF; R: ruptura do PRF; C: cisalhamento do elemento estrutural.

Os dados coletados para realização da comparação entre elementos estruturais com protensão do sistema PRF e sem protensão do sistema estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2 – comparação entre elementos estruturais protendido e não protendido.

Estudo	L0 (cm)	Controle (sem protensão)		Protensão		
		Pu (kN)	Falha	Pu (kN)	Taxa	Falha
Badawi et al. (2009)	350	96,50	R	115,50	40%	R
Badawi et al. (2009)	350	96,50	R	112,50	60%	R
Deng et al. (2021)	280	199,50	R	211,10	20%	R
Deng et al. (2021)	280	199,50	R	228,80	40%	R
El-Hacha e Gaafar (2011)	500	136,50	R	141,50	20%	R
El-Hacha e Gaafar (2011)	500	136,50	R	142,50	40%	R
El-Hacha e Gaafar (2011)	500	136,50	R	135,50	60%	R
Gao et al. (2020)	280	50,00	R	74,80	20%	R
Gao et al. (2020)	280	49,95	R	86,00	50%	R
Hong e Park (2016)	280	79,50	R	102,85	20%	R
Hong e Park (2016)	280	79,50	R	107,35	50%	R
Moshiri et al. (2021)	300	29,15	R	34,44	20%	R

Moshiri et al. (2021)	300	49,14	R	81,41	50%	R
Schimidt et al. (2019)	640	206,70	R	228,77	50%	R
Wang et al. (2015)	570	132,00	R	136,80	20%	R
Wang et al. (2015)	570	132,00	R	141,10	50%	R
You et al. (2012)	290	87,00	R	122,50	20%	R
You et al. (2012)	290	87,00	R	126,50	40%	R
You et al. (2012)	290	87,00	R	123,50	60%	R

Fonte: Autor (2021); L0: comprimento do elemento estrutural; Pu: média do carregamento último; R: ruptura do PRF.

3.4 Modelagem da variação entre os estudos

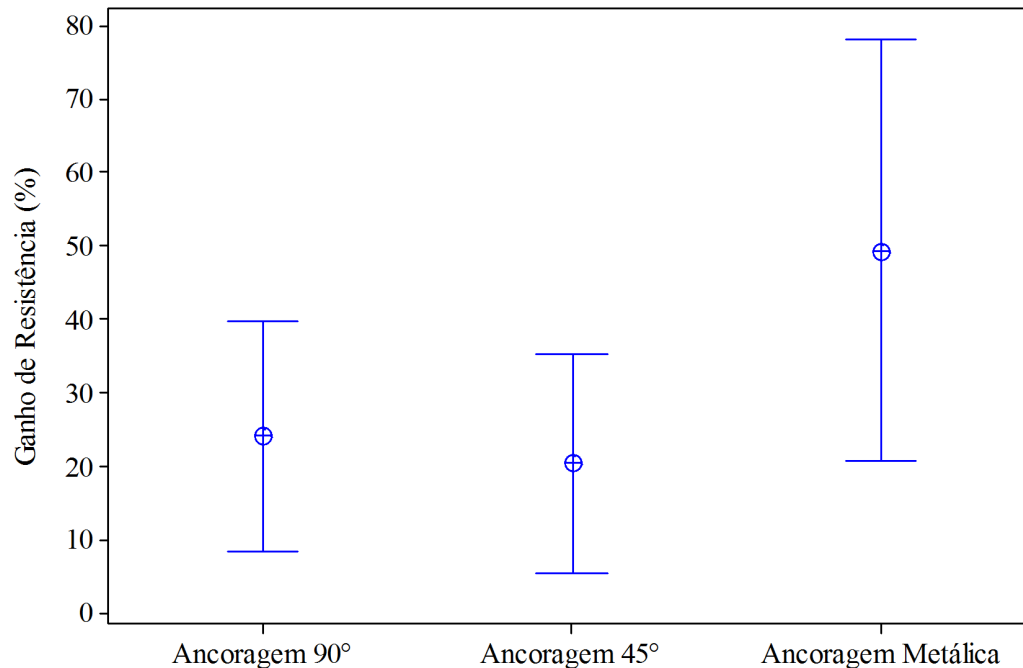
Os dados obtidos mediante a revisão bibliográfica foram considerados contínuos e submetidos a meta análise, conforme estabelecido por Berwanger *et al.* (2007). A verificação a homogeneidade dos resultado foi realizada por meio do teste de heterogeneidade I^2 proposto por Higgins *et al.* (2003). O método estatístico utilizado foi o inverso da variância, com análise do modelo sendo efeitos randomizados e a mensuração do efeito realizada por meio da diferença da média. A análise de modelo adotada foi a de efeitos randomizados em função da alta heterogeneidade (JACKSON *et al.*, 2011). Os intervalos de confiança de cada estudo e total adotados foram de 95%. A significância da análise foi admitida quando o p-valor foi menor que 5%. A meta análise foi realizada no *software* livre *Review Manager 5.4* (COCHRANE COLLABORATION, 2020).

4. RESULTADOS e DISCUSSÕES

4.1 Ancoragem no sistema de polímeros reforçados com fibras

Os métodos de ancoragem dos polímeros reforçados com fibras (PRF) pesquisados apresentam um aumento na resistência última a flexão do elemento estrutural, conforme a Figura 2. A ancoragem de PRF tipo “U” alinhada a 90° apresentou média de ganho de resistência de 24% em relação ao controle (sistema PRF sem ancoragem). A ancoragem PRF tipo “U” alinhada a 45° apresentou média de ganho de resistência de 20%. Enquanto, a ancoragem metálica apresentou aumento 49% na resistência a flexão.

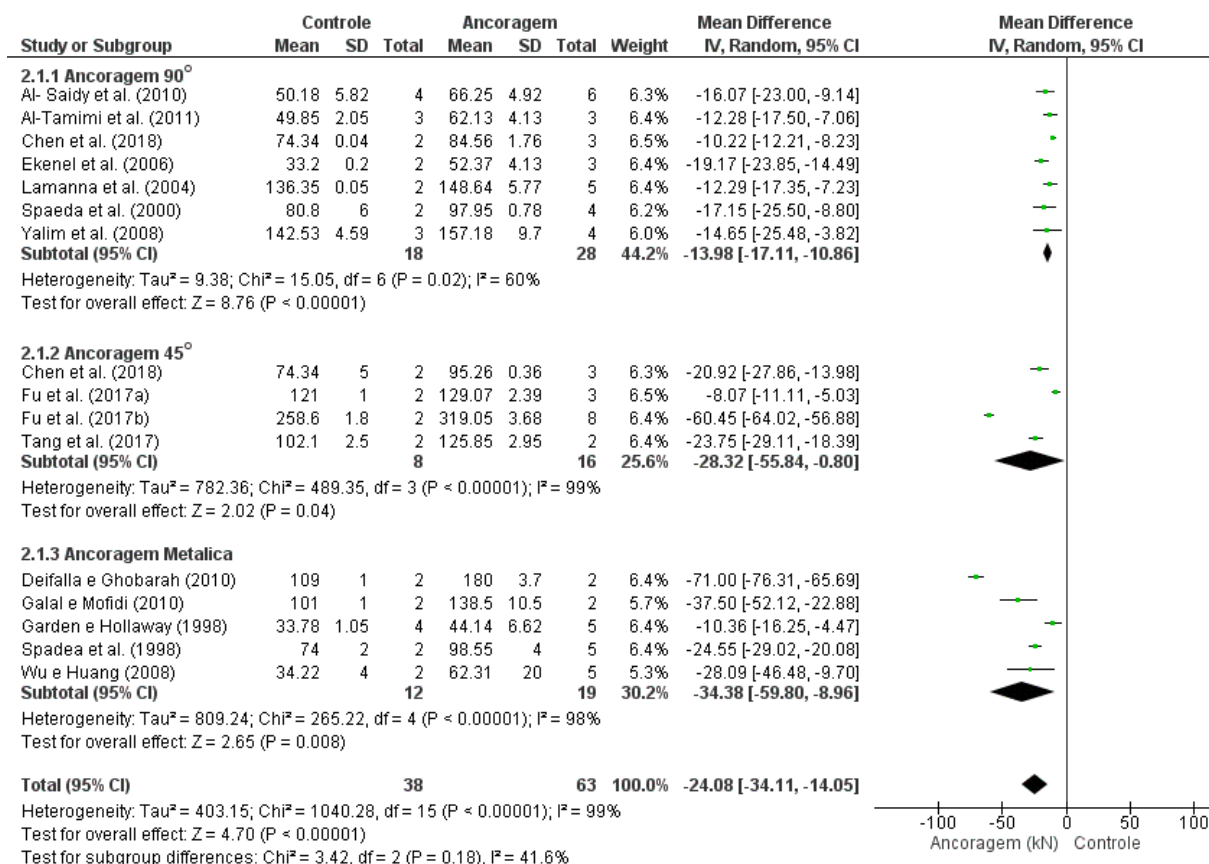
Figura 2 – Média e intervalo de confiança (95%) do ganho de resistência com a utilização da ancoragem do polímeros reforçados com fibras



Fonte: Autor (2021)

A meta análise referente ao tipo de ancoragem foi realizada por meio do gráfico de floresta (Figura 3). A análise demonstra que, em todos os estudos utilizados, a ancoragem possui efeito positivo significativo ($p\text{-valor} < 0,05$) quanto ao aumento da resistência última do elemento estrutural. Embora as médias do ganho de resistência do elemento estrutural dos subgrupos tipos de ancoragem sejam distintas (Figura 2) a meta análise (Figura 3) revelou que não existe diferença estatística significativa ($p\text{-valor} = 0,18$) entre os tipos de ancoragem analisados. A meta análise apresentou alta heterogeneidade dos estudos utilizados. Segundo Higgins *et al.* (2003) valores de heterogeneidade (I^2) maiores que 60% são considerados altos. Os valores de heterogeneidade obtidos nesse estudo podem ser justificados pelo baixo número amostral e pelas peculiaridades de cada estudo, relacionados a resistência do PRF, a resistência da resina de fixação, a resistência do concreto utilizado e as dimensões do elemento estrutural de cada experimento (HIGGINS *et al.*, 2003; SOUSA e RIBEIRO, 2009).

Figura 3 – Gráfico de Floresta do sistema de polímero reforçado com fibras com ancoragem.



Fonte: Autor (2021) *Study* = estudo; *mean* = média; SD = Desvio Padrão; Total = Número de observações; *Weight* = Peso do estudo; CI: Intervalo de Confiança.

A ancoragem reduz ou impede o descolamento da lâmina de PRF da superfície do elemento estrutural aumentando assim a resistência a flexão deste (SADDIKA, *et al.*, 2019; KALFAT, *et al.*, 2018). Desta forma, o elemento estrutural consegue suportar uma carga maior antes da falha do sistema PRF/concreto (CHEN *et al.*, 2018). Neste sentido, ao invés do elemento estrutural falhar devido ao descolamento do sistema PRF, ele falha por ruptura do sistema (FU *et al.*, 2017a; FU *et al.*, 2017b). Outra forma de falha é o cisalhamento do elemento estrutural, pois o PRF, geralmente, é aplicado afim de evitar a falha por flexão (NASER, HAWILEH e ABDALLA, 2019). Sendo assim, mesmo com a aplicação do sistema PRF com ancoragem o elemento estrutural continua com a mesma resistência ao cisalhamento ao qual foi projetado antes da aplicação do PRF (HASSAN *et al.*, 2020). Neste contexto e com base na meta análise (Figura 3) pode-se inferir que a utilização de métodos de ancoragens em sistemas PRF aumenta a resistência a flexão dos elementos estruturais.

A diferença entre as médias de ganho de resistência do elemento estrutural em função dos subgrupos tipo de ancoragem (Figura 2) são expressivas. Entretanto, não apresentam diferença estatisticamente significativa segundo a meta análise (p -valor = 0,18; Figura 3).

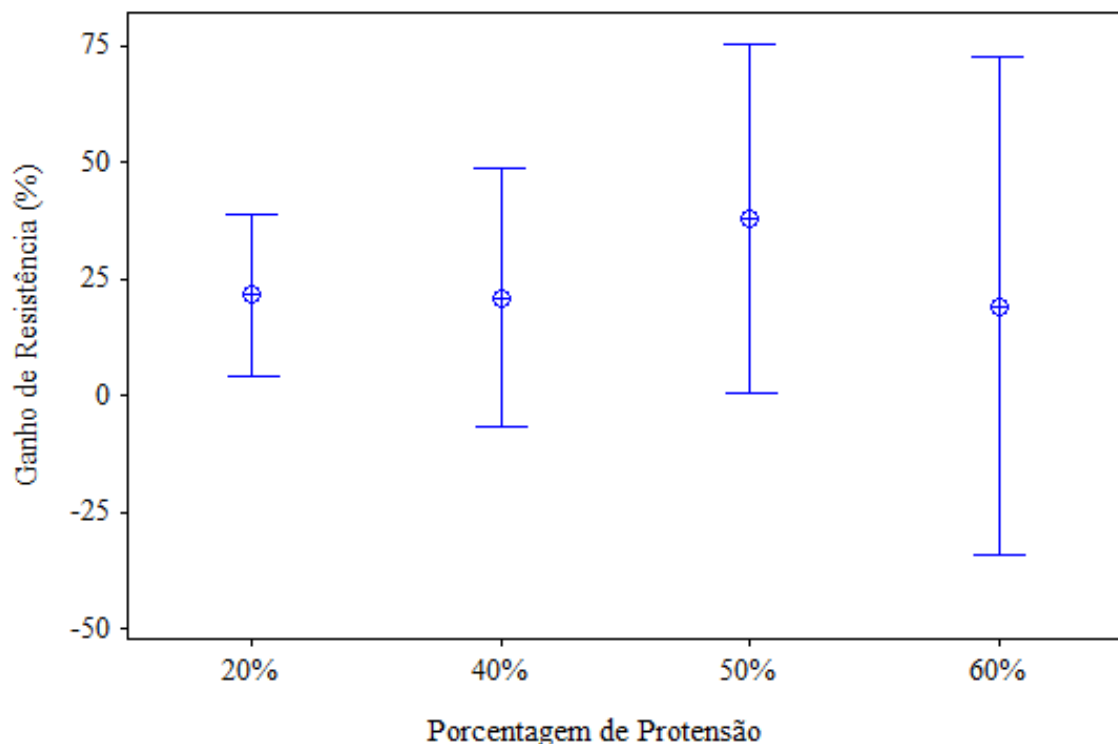
Neste sentido, pode-se inferir que não existe diferença estatística significativa entre o tipo de ancoragem que será utilizada no sistema PRF, ficando a escolha do método a critério do profissional, da comodidade ou do ambiente que será implementado o sistema. O fator econômico não foi considerado nesse estudo.

O desvio padrão é uma medida de dispersão e o seu valor reflete a variabilidade das observações em relação à média (LUNET *et al.*, 2006). Assim, para realizar a classificação quanto a magnitude é necessário calcular o coeficiente de variação (CV). O subgrupo ancoragem de PRF alinhado a 90° apresentou média de ganho de resistência de $24 \pm 15 \%$ (CV=65%), o subgrupo ancoragem de PRF alinhado a 45° apresentou média de ganho de resistência de $20 \pm 8 \%$ (CV=40%), e o subgrupo ancoragem metálica apresentou média de ganho de resistência de $49 \pm 20 \%$ (CV=41%). Segundo Pimental-Gomes (2009) valores de coeficiente de variação maior que 30% são considerados muito altos. Sendo assim, pode-se inferir que não ocorreu diferença entre as médias dos subgrupos devido ao alto valor do desvio padrão das médias. Os valores do desvio padrão da média de cada subgrupo foram elevados em função das diferenças metodológicas utilizadas em cada experimento que compõem cada subgrupo. Sendo estas diferenças, a resistência do PRF, resistência da resina de fixação, a resistência do concreto utilizado e as dimensões e resistência do elemento estrutural de cada experimento.

4.2 Protensão em sistemas de polímero reforçados com fibra

A protensão dos polímeros reforçados com fibras apresenta aumento na resistência última a flexão do elemento estrutural, conforme a Figura 4. A protensão com 20% da capacidade de carga da fibra apresentou ganho de resistência média de $21,60 \pm 17,43\%$, a protensão com 40% da capacidade de carga da fibra apresentou ganho de resistência média de $21,04 \pm 15,11\%$, a protensão com 50% da capacidade de carga da fibra apresentou ganho de resistência média de $38,09 \pm 27,05\%$, enquanto, a protensão com 60% da capacidade de carga da fibra apresentou ganho de resistência média de $19,30 \pm 17,53\%$.

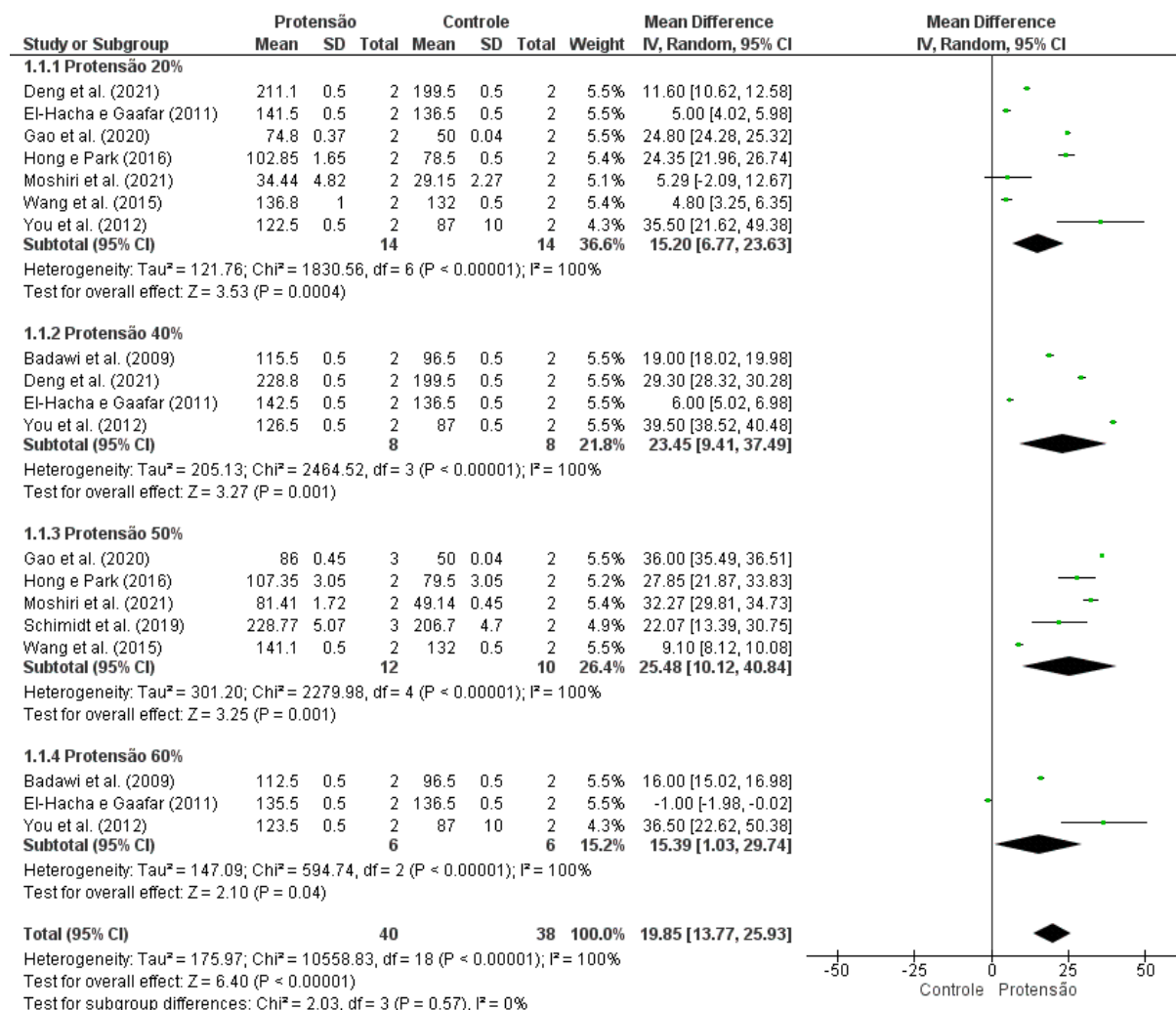
Figura 4 – Média e intervalo de confiança (95%) do ganho de resistência em função da porcentagem, de protensão do polímeros reforçados com fibras



Fonte: Autor (2021)

A meta análise referente a aplicação da força protensão foi realizada por meio do gráfico de floresta (Figura 5). A análise demonstra que a aplicação de força de protensão possui efeito positivo significativo ($p\text{-valor} < 0,05$) para o aumento da resistência última do elemento estrutural. Exceto, nos estudo de Moshiri *et al.*, (2021) que identifica que a protensão em 20% da resistência da fibra apresenta a mesma eficácia que o controle, e o estudo de El-Hacha e Gaafar (2011) que o controle apresenta maior resistência que a protensão em 60% da resistência da fibra. Embora as médias do ganho de resistência do elemento estrutural dos subgrupos de protensão sejam distintas (Figura 4), a meta análise (Figura 5) revelou que não existe diferença estatística significativa ($p\text{-valor} = 0,57$) entre as forças de protensão aplicadas. A meta análise apresentou uma alta heterogeneidade dos estudos utilizados. Segundo Higgins *et al.* (2003) valores de heterogeneidade (I^2) maiores que 60% são considerados altos. Os valores de heterogeneidade obtidos nesse estudo podem ser justificados pela baixo número amostral e pelas peculiaridades de cada estudo, resistência do PRF, resistência do concreto utilizado e dimensões do elemento estrutural de cada experimento (HIGGINS *et al.*, 2003; SOUSA e RIBEIRO, 2009).

Figura 5 – Gráfico de Floresta do sistema de polímero reforçado com fibras protendido.



Fonte: Autor (2021) *Study* = estudo; *mean* = média; SD = Desvio Padrão; Total = Número de observações; *Weight* = Peso do estudo.; CI: Intervalo de Confiança

A protensão do PRF gera um aumento estatisticamente significativo na resistência a flexão do elemento estrutural segundo a meta análise (p -valor= 0,00001; Figura 5). Esse aumento na resistência é gerado, pois, a protensão insere um estado prévio de tensões no elemento estrutural, criando tensões contrárias àquelas que podem inviabilizar a estrutura (ASLAM *et al.*, 2015). A protensão faz com que a faixa de trabalho do concreto passe para o domínio das tensões de compressão, onde o material é mais eficiente (SCHIMIDT *et al.*, 2019). Quando as tensões provocadas pelos carregamentos externos são inferiores as tensões prévias de compressão, o elemento continua comprimido, aproveitando toda a área de concreto (DENG *et al.*, 2021).

A meta análise mostra uma tendência de aumento na resistência do elemento estrutural juntamente com o aumento da força de protensão até o nível de 50% da capacidade a tração do PRF, quando começa a ocorrer uma redução da resistência, conforme Figura 4 e Figura 5.

Segundo Aslam *et al.*, (2015) o aumento da resistência a flexão é mais pronunciada à medida que a força de protensão é aumentada, entretanto, a ductilidade e a deformabilidade do elemento reforçado são reduzidas à medida que o nível de protensão é aumentado. Neste sentido, pode-se inferir que, embora não exista diferença estatísticas entre as forças de protensão, ao atingir 50% da capacidade do PRF ocorre a redução da ductilidade e deformabilidade do elemento, o que gera a perda de resistência. El-Hacha e Gaafar (2011) encontram em seu estudo que com uma força de protensão de 60% da capacidade do PRF a resistência do elemento estrutural protendido foi menor que a resistência do elemento controle.

A diferença entre as médias de ganho de resistência do elemento estrutural em função dos subgrupos força de protensão (Figura 4) apresenta uma tendência de correlação positiva com a resistência do elemento estrutural até o nível de 50%, quando inicia uma redução. Entretanto, não apresentam diferença estatisticamente significativa segundo a meta análise (p -valor = 0,57; Figura 5). A falta de significância estatística entre os grupos está relacionada com a heterogeneidade dos dados, a qual foi causada pelas diferenças metodológicas utilizadas em cada experimento que compõem cada subgrupo. As diferenças na resistência do PRF, resistência da fixação, resistência do concreto utilizado, dimensões e resistência do elemento estrutural de cada experimento. Neste sentido, pode-se inferir que as taxas de 40 e 50% da resistência do PRF são as mais indicadas para protensão, uma vez que, estes subgrupos não apresentaram resultados negativos (favorece o controle) no gráfico de floresta (Figura 5).

5. CONCLUSÃO

A ancoragem do sistema de polímero reforçado com fibra promove o aumento da resistência a flexão do elemento estrutural em aproximadamente 25%, entretanto, indefere o tipo de ancoragem utilizado.

A protensão do sistema de polímero reforçado com fibra promove o aumento da resistência a flexão do elemento estrutural. A taxa de protensão mais indicada é de 40% a 50% da resistência a tração da fibra utilizada.

A meta análise se apresentou como um método eficiente para verificação dos resultados, mesmo com a alta heterogeneidade. A heterogeneidade foi causada pelas diferenças metodológicas entre os estudos.

REFERÊNCIAS

ACI 440.1R-15, **Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars**. Am. Concr. Institute, Farmingt. Hills, MI, USA, 2015.

AL-MAHAIDI, R., & KALFAT, R. **FRP Anchorage Systems**. Rehabilitation of Concrete Structures with Fiber-Reinforced Polymer, 331–376, 2018. doi:10.1016/b978-0-12-811510-7.00008-2

AL-SAIDY, A. H.; AL-HARTHY, A. S.; AL-JABRI, K. S.; ABDUL-HALIM, M.; AL-SHIDI, N. M. Structural performance of corroded RC beams repaired with CFRP sheets. **Composite Structures**, 92(8), 1931–1938, 2010. doi:10.1016/j.compstruct.2010.01.001

AL-TAMIMI, A. K.; HAWILEH, R.; ABDALLA, J.; RASHEED, H. A. Effects of Ratio of CFRP Plate Length to Shear Span and End Anchorage on Flexural Behavior of SCC RC Beams. **Journal of Composites for Construction**, 15(6), 908–919, 2011. doi:10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000221

ASLAM, M.; SHAFIGH, P.; JUMAAT, M. Z.; SHAH, S. N. R. Strengthening of RC beams using prestressed fiber reinforced polymers – A review. **Constr Build Mater**, 82, 235–256, 2015. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.02.051

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142**: Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015. 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018. 9p.

BAASANKHUU, B.; CHOI, D.; HA, S. Behavior of Small-Scale Concrete Cylinders in Compression Laterally Confined by Basalt Fiber and PEN Fiber Reinforced Polymer Composites. **Int J Concr Struct Mater**, 14:8, 2020, <https://doi.org/10.1186/s40069-019-0384-6>

BADAWI M.; SOUDKI K. Flexural strengthening of RC beams with prestressed NSM CFRP rods – experimental and analytical investigation. **Constr Build Mater**, 23(10):3292–300, 2009.

BERWANGER, O.; SUZUMURA E. A.; BUEHLER A. B.; OLIVEIRA J. B. Como avaliar criticamente revisões sistemáticas e metanálises?. **Revista Brasileira de Terapia Intensiva**, 19, 475-480, 2007. doi:<https://doi.org/10.1590/S0103-507X2007000400012>.

CHEN, W.; PHAM, T. M.; SICHEMBE, H.; CHEN, L.; HAO, H. Experimental study of flexural behaviour of RC beams strengthened by longitudinal and U-shaped basalt FRP sheet.

Composites Part B: Engineering, 134, 114–126, 2018,
doi:10.1016/j.compositesb.2017.09.053

CHEN, W.; PHAM, T. M.; SICHEMBE, H.; CHEN, L.; HAO, H. Experimental study of flexural behaviour of RC beams strengthened by longitudinal and U-shaped basalt FRP sheet. **Composites Part B: Engineering**, 134, 114–126, 2018. doi:10.1016/j.compositesb.2017.09.053

COCHRANE COLLABORATION. **Review Manager** (RevMan) - Version 5.4, 2020.

CONN, V.S.; RUPPAR, T. M.; PHILLIPS, L. J.; CHASE, J. A. Using meta-analyses for comparative effectiveness research. **Nurs Outlook**, 60:182-90, 2012. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.outlook.2012.04.004

DEIFALLA, A.; GHOBARAH, A. Strengthening RC T-Beams Subjected to Combined Torsion and Shear Using FRP Fabrics: Experimental Study. **Journal of Composites for Construction**, 14(3), 301–311, 2010. doi:10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000091

DENG, J.; RASHID, K.; LI, X.; XIE, Y.; CHEN, S. Comparative study on prestress loss and flexural performance of rectangular and T beam strengthened by prestressing CFRP plate, **Composite Structures**, 262, 113340, 2021. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113340.

EKENEL, M.; RIZZO, A.; MYERS, J. J.; NANNI, A. Flexural Fatigue Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with FRP Fabric and Precured Laminate Systems. **Journal of Composites for Construction**, 10(5), 433–442, 2006. doi:10.1061/(asce)1090-0268(2006)10:5(433)

EL-HACHA R.; GAAFFAR M. Flexural strengthening of reinforced concrete beams using prestressed, near-surface mounted CFRP bars. **PCI J**, 56:134–51, 2011.

ELMESSALAMI, N.; EL REFAI, A.; ABED, F. Fiber-reinforced polymers bars for compression reinforcement: A promising alternative to steel bars. **Construction and Building Materials**, 209:725-737, 2019. doi: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.105.

FU, B.; CHEN, G. M.; TENG, J. G. Mitigation of intermediate crack debonding in FRP-plated RC beams using FRP U-jackets. **Composite Structures**, 176, 883–897, 2017a. doi:10.1016/j.compstruct.2017.05.049

FU, B.; TENG, J. G.; CHEN, J. F.; CHEN, G. M.; GUO, Y. C. Concrete Cover Separation in FRP-Plated RC Beams: Mitigation Using FRP U-Jackets. **Journal of Composites for Construction**, 21(2), 04016077, 2017b. doi:10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000721

GALAL, K.; MOFIDI, A. Shear Strengthening of RC T-Beams Using Mechanically Anchored Unbonded Dry Carbon Fiber Sheets. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, 24(1), 31–39, 2010. doi:10.1061/(asce)cf.1943-5509.0000067

GAO, D.; FANG, D.; YOU, P.; CHEN, G.; TANG, J. Flexural behavior of reinforced concrete one-way slabs strengthened via external post-tensioned FRP tendons. **Engineering Structures**, 216:110718, 2020, https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110718.

GAO, D.; FANG, D.; YOU, P.; CHEN, G.; TANG, J. Flexural behavior of reinforced concrete one-way slabs strengthened via external post-tensioned FRP tendons. **Engineering Structures**, 216, 110718, 2020. doi:10.1016/j.engstruct.2020.110718

GARDEN, H. N.; HOLLAWAY, L. C. An experimental study of the influence of plate end anchorage of carbon fibre composite plates used to strengthen reinforced concrete beams. **Composite Structures**, 42(2), 175–188, 1998. doi:10.1016/s0263-8223(98)00070-1

HASSAN, H. F.; MEDHLOM, M. K.; AHMED, A.S.; AL-DAHLAKI, M.H. Flexural performance of concrete beams reinforced by gfrp bars and strengthened by cfrp sheets, **Case Studies in Construction Materials**, 13: 417-430, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00417>.

HIGGINS, J. P. T.; THOMPSON, S. G.; DEEKS, J. J.; ALTMAN, D. G. Measuring inconsistency in meta-analyses. **BMJ**, 327: 557-60, 2003. doi: 10.1136/bmj.327.7414.557

HONG, S.; PARK, S. Effect of prestress and transverse grooves on reinforced concrete beams prestressed with near-surface-mounted carbon fiber-reinforced polymer plates, **Composites Part B: Engineering**, 91: 640-650, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.01.018>.

HUANG, H.; WANG, W. W.; DAI, J. G.; BRIGHAM, J. C. Fatigue behavior of reinforced concrete beams strengthened with externally bonded prestressed CFRP sheets. **J. Compos. Constr.**, 21:04016108, 2017, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000766](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000766).

HUO, J.; LI, Z.; ZHAO, L.; LIU, J.; XIAO, Y. Dynamic behavior of CFRP-strengthened reinforced concrete beams without stirrups under impact loading, **ACI Struct. J.**, 115 (2018) 775–787, <https://doi.org/10.14359/51701283>.

JACKSON, D.; RILEY, R.; WHITE, I. R. Multivariate meta-analysis: potential and promise. **Stat Med**, 30:2481-98, 2011. doi: <http://dx.doi.org/10.1002/sim.4247>

KALFAT, R.; GADD, J.; AL-MAHAIDI, R. SMITH, S. T. An efficiency framework for anchorage devices used to enhance the performance of FRP strengthened RC members. **Construction and Building Materials**, 191: 354-375, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.022>.

LAMANNA, A. J.; BANK, L. C.; ; SCOTT, D. W. Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Beams by Mechanically Attaching Fiber-Reinforced Polymer Strips. **Journal of Composites for Construction**, 8(3), 203–210, 2004. doi:10.1061/(asce)1090-0268(2004)8:3(203)

LI, L.; HOU, B.; LU, Z.; LIU, F. Fatigue behaviour of sea sand concrete beams re- inforced with basalt fibre-reinforced polymer bars, **Construction and Building Materials**. 179:160–171, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.218>.

LUNET, N.; SEVERO, M.; BARROS, H. Desvio padrão ou erro padrão. **Arq Med**, 20, 55-59, 2006.

MOSHIRI, N.; CZADERSKI, C.; MOSTOFINEJAD, D.; MOTAVALLI, M.; Bond resistance of prestressed CFRP strips attached to concrete by using EBR and EBROG

strengthening methods, **Constr Build Mater**, 266, 2021, 121209, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121209>.

NASER, M. Z.; HAWILEH, R. A.; ABDALLA, J. A. Fiber-reinforced polymer composites in strengthening reinforced concrete structures: A critical review. **Engineering Structures**, 198: 109542, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109542>.

PHAM, T. HAO, M. H. Behavior of fiber-reinforced polymer-strengthened reinforced concrete beams under static and impact loads, **Int. J. Prot. Struct.**, 8 (2017) 3–24, <https://doi.org/10.1177/2041419616658730>.

PIMENTEL-GOMES, F. Curso de Estatística Experimental, 15 ed. Fealp, Piracicaba-SP. 2009. 451p.

RODRIGUES, M. I.; LEMMA, A. F. **Planejamento de experimento e otimização de processos**. 3^a ed. Editora Cárita, Campinas – SP. 2014

SADDIKA, A.; MAMUN, A.; ALYOUSEF, R.; AMRAN, M.Y.H. Strengthening of reinforced concrete beams by using fiber-reinforced polymer composites: A review, **Journal of Building Engineering**, 25:100798. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jobeb.2019.100798>.

SCHMIDT, J. W.; CHRISTENSEN, C. O.; GOLTERMANN, P.; HERTZ, K. D. Shared CFRP activation anchoring method applied to NSMR strengthening of RC beams. **Composite Structures**, 230, 111487, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111487>.

SCHMIDT, J. W.; CHRISTENSEN, C. O.; GOLTERMANN, P.; HERTZ, K. D. Shared CFRP activation anchoring method applied to NSMR strengthening of RC beams. **Composite Structures**, 230, 111487, 2019. doi:10.1016/j.compstruct.2019.111487

SOUSA, M. R.; RIBEIRO, A. L. P. Revisão sistemática e meta-análise de estudos de diagnóstico e prognóstico: um tutorial. **Arquivos Brasileiros de Cardiologia**, 92, 241-251, 2009. doi:<https://doi.org/10.1590/S0066-782X2009000300013>.

SPADEA, G.; BENCARDINO, F.; SWAMY, R. N. Optimizing the performance characteristics of beams strengthened with bonded CFRP laminates. **Materials and Structures**, 33(2), 119–126, 2000. doi:10.1007/bf02484166

SPADEA, G.; BENCARDINO, F.; SWAMY, R. N. Structural Behavior of Composite RC Beams with Externally Bonded CFRP. **Journal of Composites for Construction**, 2(3), 132–137, 1998. doi:10.1061/(asce)1090-0268(1998)2:3(132)

TANG, X.T.; LI, L.J.; FU, B.; LIU, F.; FENG, W.X. Suppression of intermediate crack debonding in FRP-plated rc beams using inclined FRP U-jacketing. **APFIS2017 - 6th Asia-Pacific Conference on FRP in Structures**. Singapore, 19-21st July 2017

WANG, X., SHI, J., WU, G., YANG, L., & WU, Z. Effectiveness of basalt FRP tendons for strengthening of RC beams through the external prestressing technique. **Engineering Structures**, 101, 34–44, 2015. doi:10.1016/j.engstruct.2015.06.052

Wu, Y.-F.; Huang, Y. Hybrid Bonding of FRP to Reinforced Concrete Structures. **Journal of Composites for Construction**, 12(3), 266–273, 2008. doi:10.1061/(asce)1090-0268(2008)12:3(266)

YALIM, B.; KALAYCI, A. S.; MIRMIRAN, A. Performance of FRP-Strengthened RC Beams with Different Concrete Surface Profiles. **Journal of Composites for Construction**, 12(6), 626–634, 2008. doi:10.1061/(asce)1090-0268(2008)12:6(626)

YAN, J.; LIU, Y.; XU, Z.; LI, Z.; HUANG, F. Experimental and numerical analysis of CFRP strengthened RC columns subjected to close-in blast loading. **International Journal of Impact Engineering**, 146:103720, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2020.103720>.

YOU Y. C.; CHOI K. S.; KIM J. H. An experimental investigation on flexural behavior of RC beams strengthened with prestressed CFRP strips using a durable anchorage system. **Composites B Eng**, 43(8):3026–36, 2012.

ZHAO, J.; MEI, K.; WU, J. Long-term mechanical properties of FRP tendon–anchor systems — A review. **Construction and Building Materials**, 230: 117017, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117017>.