



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
NÚCLEO DE DESENVOLVIMENTO AMAZÔNICO EM ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
INFRAESTRUTURA E DESENVOLVIMENTO ENERGÉTICO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

PAULO SÉRGIO BARREIROS DE LEÃO JÚNIOR

ANÁLISE EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO À FLEXÃO DE VIGAS DE
CONCRETO ARMADO REFORÇADAS COM LAMINADO DE FIBRA DE
CARBONO COM VARIAÇÃO DA TAXA DE ARMADURA EXISTENTE E DO
MECANISMO DE ANCORAGEM

TUCURUÍ

2025

PAULO SÉRGIO BARREIROS DE LEÃO JÚNIOR

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO À FLEXÃO DE VIGAS DE
CONCRETO ARMADO REFORÇADAS COM LAMINADO DE FIBRA DE CARBONO
COM VARIAÇÃO DA TAXA DE ARMADURA EXISTENTE E DO MECANISMO DE
ANCORAGEM.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para obtenção do título de Mestre em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético. Área de concentração: Estruturas.

Orientador: Prof. Dr. Aarão Ferreira Lima Neto.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD Sistema de
Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- L433a Leão Júnior, Paulo Sérgio Barreiros de.
Análise experimental do desempenho à flexão de
vigas de concreto armado reforçadas com laminado de
fibra de carbono com variação da taxa de armadura
existente e do mecanismo de ancoragem. / Paulo
Sérgio Barreiros de Leão Júnior, . — 2025.
XVI, 119 f. : il. color.
- Orientador(a): Prof. Dr. Aarão Ferreira Lima Neto
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do
Pará,
Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em
Engenharia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento
Energético, Tucuruí, 2025.
1. Reforço à flexão;. 2. Fibra;. 3. Sistema de
ancoragem;. 4. Laminado;. 5. Vigas. I. Título.

CDD 624.1

PAULO SÉRGIO BARREIROS DE LEÃO JÚNIOR

ANÁLISE EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO À FLEXÃO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO REFORÇADAS COM LAMINADO DE FIBRA DE CARBONO COM VARIAÇÃO DA TAXA DE ARMADURA EXISTENTE E DO MECANISMO DE ANCORAGEM.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para obtenção do título de Mestre em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético. Área de concentração: Estruturas.

Orientador: Prof. Dr. Aarão Ferreira Lima Neto.

Aprovada em 17 de Junho de 2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Aarão Ferreira Lima Neto / Universidade Federal do Pará - Orientador

Prof. Dr. Thomás Lima de Resende / Universidade do Estado do Rio de Janeiro - Examinador Externo

Prof. Dr. Maurício de Pina Ferreira / Universidade Federal do Pará - Examinador Interno

Prof. Dr. Manoel José Mangabeira Pereira Filho / Universidade Federal do Pará - Examinador Interno



Dedico este trabalho a todos que
acreditam no amor, independente do que for.

AGRADECIMENTOS

Quase não tive tempo de redigir estes agradecimentos, e isso foi o que mais me magoou nesta pesquisa. Acredito que o presente é uma circunstância moldada pelo conjunto de ações que nos cercam. Não imagino um cenário no qual esta dissertação se fizesse possível sem a ajuda de inúmeras pessoas bem-aventuradas.

Agradeço à minha família por acreditarem na educação e me convencerem disso. Nesta ocasião, não poderia deixar de mencionar os meus heróis: minhas mães queridas Maria Elenir de Souza Mendes e Maria Ademildes de Souza Mendes, e ao meu pai velho, José Estevam Mendes. Isto também é fruto de todas as suas perseveranças.

À Isllana Carolina de Sousa Silva, e em nome de toda a sua família, que me acolheram, incentivaram e se tornaram minha família. Vocês foram minha referência de lar nestes sete anos, desde a graduação até aqui, onde pude recorrer várias vezes.

Aos professores, orientadores e amigos Aarão Ferreira Lima Neto e Manoel José Mangabeira Perreira Filho, obrigado por toda a paciência, generosidade e orientação nesta caminhada, que começou desde o TCC, quando meus grandes amigos Edil da Gama dos Santos e Lázaro Gonçalves Fernandes me apresentaram este horizonte de possibilidades.

Às grandes amizades construídas durante a pesquisa: Jedson Henryque Corrêa Abrantes, Layse Rafaela Furtado Lima, Lucas Carvalho Silva, Mayara Gonçalves Costa, Saulo de Almada Gomes e Taumaturgo de Oliveira Pontes Neto. Muito obrigado por compartilharem deste desafio, apoiarem e me acolherem.

Aos meus velhos amigos: Ingrid Maria Fernandes Cabral, João Henrique Pinto dos Santos, José Benedito dos Santos Batista Neto, José Paulo Santos dos Santos Keila Katiane Gonçalves da Silva, Paholla Pinto dos Santos e Ramon Kenedy Rodrigues Mendes. Muito obrigado por me inspirarem a ser uma boa pessoa.

Aos amigos que enfrentaram conosco as atividades de laboratório: Antônio Meireles, Agatha Moreno, Eduardo Weslen, Emily Garcia, Fabiana Emerique, Igor Farias, Kauã Maranhão, Lucas Araújo, Lucas Lemos, Luís Eduardo, Marcos Vinicius, Mateus Leal, Mayara Sousa, Natali Pinheiro, Paulo Gonçalves, Victor Gonçalves, Victor Lima, Welbert Pinheiro. Não seria possível sem cada um de vocês.

À CAPES CNPQ pelo financiamento desta pesquisa.

A todos, minha sincera gratidão!

Aqui materializa-se o enleio de dias letárgicos.

RESUMO

O reforço de estruturas de concreto armado existentes com Polímeros Reforçados com Fibras (FRP) por meio de técnicas como o *Externally Bonded Reinforcement* e o *Near-Surface Mounted*, é usual em aplicações práticas, principalmente com FRP de Carbono (CFRP). Em práticas de reforço onde se esperam maiores resistências, esses métodos podem não ser tão eficientes quanto o esperado devido à falha prematura por descolamento. Sendo relevante o uso de métodos de ancoragem para uma maior eficiência do reforço. Existem poucas informações na literatura sobre a influência da taxa de aço no comportamento de vigas reforçadas com sistema de ancoragem. Assim, esta pesquisa tem o objetivo de analisar experimentalmente o desempenho à flexão de vigas de concreto armado reforçadas com CFRP, variando a taxa de armadura existente (0,44% e 1,12%) e os sistemas de ancoragem. Para tanto foram realizados ensaios de flexão simples em seis vigas com seção transversal em forma de T, com 2200 mm de comprimento, altura total de 280mm, base da alma de 180 mm, espessura e largura da mesa de 80mm e 350mm, respectivamente. Nas armaduras transversais foram utilizados 21 estribos com barras de 12,5mm, espaçados a cada 100mm, sendo três para cada taxa de aço de flexão. Destas, uma serviu de referência sem reforço, as outras duas foram reforçadas com diferentes sistemas de ancoragem, como a ancoragem metálica baseada na fricção e atrito (*Hybrid Bonded* - HB) e com ancoragem baseada na ligação de aderência utilizando tiras do laminado (FT). O reforço foi mais eficaz em vigas com menor taxa de aço, com aumento de resistência de 58% no sistema HB e 11% no FT. Para as vigas com maior taxa o ganho foi limitado a 10% para HB e zero para o FT. O sistema HB alcançou capacidade de carga 117,72 kN·m e melhor desempenho em deslocamentos intermediários, com aumento da ductilidade na fissuração em até 57 vezes e até 100% no escoamento do aço. Na carga máxima, todas as vigas reforçadas tiveram redução de ductilidade. No sistema HB, a perda de ductilidade aumentou com a taxa de aço, de 25% na menos armada até 49% na mais armada. No sistema FT, foi contrário, com 66% na menos armada e 24% na mais armada. As rupturas foram dominadas pelo escorregamento do laminado no HB e pela delaminação do cobrimento no FT.

Palavras Chave: Reforço à flexão; Fibra; Laminado; Sistema de ancoragem; Vigas

ABSTRACT

The strengthening of existing reinforced concrete structures with Fiber-Reinforced Polymers (FRP), using techniques such as Externally Bonded Reinforcement and Near-Surface Mounted, is common in practical applications, especially when using Carbon FRP (CFRP). However, in strengthening scenarios that require higher load capacities, these methods may be less effective due to premature debonding failure, highlighting the importance of anchorage systems to improve reinforcement efficiency. There is limited information in the literature regarding the influence of steel reinforcement ratio on the behavior of beams strengthened with anchorage systems. Therefore, this study experimentally investigates the flexural performance of reinforced concrete T-beams strengthened with CFRP, considering two steel ratios (0.44% and 1.12%) and two anchorage systems. Flexural tests were conducted on six T-section beams (2200 mm length, 280 mm height, 180 mm web width, and 80 mm thick by 350 mm wide flange). Each beam had 21 stirrups made of 12.5 mm bars spaced at 100 mm. For each steel ratio, one beam was unstrengthened (reference), and two were strengthened using either a friction-based mechanical anchorage (Hybrid Bonded – HB) or an anchorage system using bonded CFRP strips (FT). Strengthening was more effective in beams with the lower steel ratio, with strength increases of 58% for HB and 11% for FT. For the higher steel ratio, gains were limited to 10% for HB and none for FT. The HB system achieved a flexural capacity of 117.72 kN·m and showed better performance in intermediate displacements, with ductility increases up to 57 times at cracking and up to 100% at steel yielding. At maximum load, all strengthened beams showed reduced ductility. In the HB system, ductility loss increased with steel ratio, from 25% in the less reinforced beam to 49% in the more reinforced one. In the FT system, the trend was reversed, with a 66% loss for the lower steel ratio and 24% for the higher. Failure modes were governed by laminate slip in HB and cover delamination in FT.

Keywords: *Flexural Strengthening; Fiber; Anchorage Systems; Laminate; Beams*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Sistemas de ancoragem existentes.	18
Figura 1.2 - Efeitos da armadura existente em de vigas com sistema de ancoragem--	189
Figura 2.1 - PRFs Existentes e suas tensões de ruptura máximas e mínimas.	21
Figura 2.2 - Tensão x deformação de FRPs unidirecionais e aço. Amran (2018).	22
Figura 2.3 - Modos de ruptura de vigas reforçados com FRP. ACI 440-2R (2017).	25
Figura 2.4 - Método de seleção dos documentos e construção da revisão.	26
Figura 2.5 - Frequência de publicações por ano. a) Revistas; b) Mecanismos.	28
Figura 2.6 - Diagrama de Venn com a abordagem dos mecanismos por continente. ---	29
Figura 2.7- Número de publicações por países.	30
Figura 2.8 - Análise de palavras-chave.	31
Figura 2.9 - Rede de coautoria.	31
Figura 2.10 - Cocitação de documentos.	32
Figura 2.11 - Novos modos de ruptura.	41
Figura 2.12 - Ensaio de flexão realizado por Wu e Huang (2008).	41
Figura 2.13 - Modos de ruptura observados por Wu e Huang (2008).	42
Figura 2.14 - Ensaio de flexão realizado por Wu et al. (2010).	43
Figura 2.15- Modos de ruptura observados por Wu et al. (2010).	44
Figura 2.16 - Ensaio Pull-Out. Traduzido de Wu et al., (2011).	45
Figura 2.17 - Ensaio de flexão de três pontos realizados por Wu et al. (2011).	46
Figura 2.18 - Falha por Ruptura do FRP. Wu et al., (2011).	47
Figura 2.19 - Ensaio de flexão de quatro pontos realizados por Guan et al. (2011). ---	47
Figura 2.20 - Modos de ruptura observados por Guan et al. (2011).	48
Figura 2.21 - Ensaio de flexão de quatro pontos realizados por Chen et al., (2019). --	49
Figura 2.22 - Modos de ruptura observados por Chen et al., (2019).	50
Figura 2.23 - Análise do incremento de resistência.	53
Figura 2.24 - Incremento de resistência mínimos e máximos.	54
Figura 2.25 - Análise do incremento de ductilidade.	56
Figura 2.26 - Relação entre o incremento de resistência e o incremento de ductilidade.	57
Figura 2.27 - Ruptura na ligação da chapa de aço e conector. ABNT NBR 8800 (2008)	60
Figura 2.28 - Ruptura por cisalhamento de bloco de chapa. Estruturas de aço (2009).	61
Figura 2.29 - Ruptura por cisalhamento do conector. ACI 318-M (2019).	61
Figura 2.30 - Ruptura por arrancamento do concreto (Breakout). ACI 318-M (2019). ---	62
Figura 2.31 - Ruptura ao arrancamento do concreto (Pryout). ACI 318-M (2019).	64

Figura 2.32 - Resistência seccional de vigas sob flexão no ELU. ACI 440-2R (2017). ---	67
Figura 3.1 - Características das vigas do programa experimental. -----	69
Figura 3.2 - Sistemas de reforço.-----	71
Figura 3.3 - Método de aplicação do reforço. -----	72
Figura 3.4 - Sistema de ensaio.-----	73
Figura 3.5 - Posição dos potenciômetros para medir os deslocamentos verticais-----	74
Figura 3.6 - Posicionamento dos LVDT's para medição das aberturas de fissuras. ----	74
Figura 3.7 - Posicionamento dos extensômetros nas vigas. -----	75
Figura 3.8 - Posição dos extensômetros e dos potenciômetros no lamidado. -----	76
Figura 3.9 - Concretagem. a) Adensamento das vigas; b) Moldagem. -----	77
Figura 3.10 – Ensaio de tração do laminado e do aço das vigas.-----	78
Figura 4.1 – Curvas Momento x Deslocamento vertical. -----	79
Figura 4.2 - Curvatura vertical. -----	81
Figura 4.3 - Abertura de fissuras.-----	82
Figura 4.4 - Perfil de deformação no meio do vão. -----	84
Figura 4.5 - Deformação no laminado. -----	86
Figura 4.6 – Figura analítica vigas menos armadas. -----	87
Figura 4.7 - Figura analítica vigas mais armadas. -----	88
Figura 4.8 – Carregamento x Escorregamento do laminado. -----	89
Figura 4.9 – Deformação no laminado x Escorregamento. -----	90
Figura 4.10 – Modos de ruptura das vigas de referência.-----	92
Figura 4.11 – Modo de ruptura da viga FT-0,44. -----	93
Figura 4.12 – Modo de ruptura da viga FT-1,12. -----	93
Figura 4.13 – Modo de ruptura da viga HB-0,44. -----	94
Figura 4.14 – Modo de ruptura da viga HB-1,12. -----	95
Figura 4.15 – Relação entre o incremento de resistência e taxa de fibra. -----	96
Figura 4.16 – Relação entre o incremento de ductilidade e taxa de fibra. -----	97
Figura 4.17 – Previsão teórica x Experimental . -----	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Parâmetros que influenciam na aderência de sistemas de PRF. -----	23
Tabela 2.2 - Principais fontes de documentos. -----	27
Tabela 2.3 - Insights e lacunas dos mecanismos de aço. -----	35
Tabela 2.4 - Insights e lacunas dos mecanismos baseados na aderência-----	37
Tabela 2.5 - Insights e lacunas dos mecanismos de PRF -----	38
Tabela 2.6 - Resultados obtidos nos ensaios realizados por Wu e Huang (2008). --	42
Tabela 2.7 - Descrição dos ensaios realizados por Wu et al. (2010). -----	44
Tabela 2.8 - Resultados obtidos nos ensaios realizados por Wu et al. (2011). -----	46
Tabela 2.9 - Resultados obtidos nos ensaios realizados por Guan et al. (2011). ----	47
Tabela 2.10 - Resultados obtidos nos ensaios realizados por Chen et al. (2019).---	49
Tabela 2.11 - Banco de dados -----	51
Tabela 3.1 - Características das armaduras das vigas. -----	71
Tabela 3.2 – Características do Concreto. -----	77
Tabela 3.3 - Características mecânicas das armaduras.-----	78
Tabela 4.1 - Resultados de carga, deslocamento, resistência e ductilidade.-----	79
Tabela 4.2 – Resultados de deformação. -----	91
Tabela 4.3 – Modo de ruptura. -----	94
Tabela 4.4 – Previsões normativas.-----	948

LISTA DE SÍMBOLOS

A_f - Área da seção transversal do laminado;
 A_s - Área de aço da armadura principal;
 $A_{s'}$ - Área de aço da armadura secundária;
 A_{sw} - Área de aço da armadura transversal;
 A_{gv} - Área bruta sujeita a cisalhamento;
 A_{nv} - Área líquida sujeita a cisalhamento;
 A_{nt} - Área líquida sujeita à tração;
 $A_{se,V}$ - Área efetiva da seção transversal do conector;
 bw - Largura da viga;
 b_f - Largura da fibra;
 c_r - Fissuração;
 d_b - Diâmetro do parafuso;
 d - Altura útil;
 E_c - Modulo de elasticidade do concreto;
 E_f - Modulo de elasticidade do laminado de fibra de carbono;
 E_s - Modulo de elasticidade do aço;
 f_c - Resistencia característica à compressão do concreto;
 f_{ct} - Resistencia a tração média do concreto;
 f_{fu} - Tensão última do laminado de fibra de carbono;
 f_{uta} = Resistência ao escoamento do conector;
 f_u = Resistência à ruptura do aço da parede do furo;
 f_y - Tensão de escoamento do aço;
 f_{su} - Tensão de última do aço;
 f_{fe} = Tensão efetiva da fibra;
 h - Altura da viga;
 l_f - Distância, na direção da força, entre a borda do furo e a borda ou a borda livre;
 L - Comprimento da viga;
 $n_\emptyset$ - Número de barras da armadura principal;
 $M_{máx.}$ - Momento fletor máximo;
 M_u - Momento fletor último;
 M_w - Momento fletor durante a fissuração;

M_y - Momento fletor durante o escoamento do aço;
 N – Número de barras de aço;
 n_f – Número de faixas de laminado;
 n – Número de camadas;
 S_w – Espeçamento entre a armadura transversal;
 t = Espessura da chapa na ligação com o conector;
 t_f – Espessura da fibra;
 Y_{a2} = coeficiente de minoração das resistências na ruptura;
 $\delta_{m\acute{a}x.}$ – Deslocamento vertical na carga máxima;
 δ_u – Deslocamento vertical ruína;
 δ_w – Deslocamento na carga de fissuração;
 δ_y – Deslocamento na carga de escoamento do aço;
 ϵ_c - Deformação no concreto comprimido;
 ϵ_s – Deformação na armadura principal;
 $\epsilon_{s'}$ – Deformação na armadura secundária;
 ϵ_f - Deformação na fibra;
 ρ_f - Taxa de reforço;
 ρ_y - Taxa de aço da armadura principal;
 ρ_{sw} - Taxa de aço da armadura transversal;
 $\varnothing_w$ – Diâmetro do aço da armadura transversal;
 $\varnothing_y$ – Diâmetro do aço da armadura principal;
 $\varnothing_{y'}$ – Diâmetro do aço da armadura secundária.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Considerações iniciais	17
1.2	Justificativa	20
1.3	Objetivos	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	Polímeros Reforçados com Fibras.....	21
2.1.1	Vantagens e Limitações do uso de PRFC como material de reforço.....	22
2.2	Métodos de reforço à flexão com FRP	23
2.3	Modos de ruptura de vigas reforçadas à flexão com FRP	24
2.4	Revisão sistemática sobre os mecanismos de ancoragem.....	26
2.4.1	Método de seleção dos documentos e construção da revisão	26
2.4.2	Frequência das publicações por revistas.....	27
2.4.3	Frequência das publicações por Países	29
2.4.4	Análise de Palavras-chave	30
2.4.5	Rede de coautoria	31
2.4.6	Rede de cocitação de documentos.....	32
2.5	Avanços de pesquisas com mecanismos de ancoragem.....	32
2.5.1	Mecanismos metálicos baseados na fricção e atrito.....	32
2.5.2	Mecanismos baseados na ligação de aderência	35
2.5.3	Mecanismos de PRF baseados na fricção e atrito.....	37
2.6	Modos de ruptura de vigas com sistema de ancoragem	39
2.7	Vigas reforçadas com CFRP e sistema de ancoragem HB.	41
2.7.1	Wu e Huang (2008)	41
2.7.2	Wu <i>et al.</i> , (2010)	42
2.7.3	Wu <i>et al.</i> , (2011)	45
2.7.4	Guan <i>et al.</i> , (2011).....	47
2.7.5	Chen <i>et al.</i> , (2019)	48
2.8	Banco de dados	50
2.9	Análise do incremento de resistência	51
2.10	Análise do incremento de ductilidade	54
2.11	Principais insights sobre a revisão e banco de dados	58

2.12	Recomendações normativas	59
2.12.1	ABNT NBR 8800 (2024) - Verificações para a chapa de aço	59
2.12.2	ACI 318-M (2025) - Verificação da ancoragem com parafusos	61
2.12.3	ACI 318-M (2025) - Resistência Seccional de Vigas.....	65
2.12.4	ACI 440 2R (2017) Reforço com FRP Colados Externamente	67
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	69
3.1	Características das vigas.....	69
3.2	Sistema de reforço	70
3.3	Sistema de ensaio	73
3.4	Instrumentação.....	74
3.4.1	Deslocamentos verticais.....	74
3.4.2	Abertura de fissuras.....	74
3.4.3	Deformações de flexão.....	75
3.4.4	Deformações e escorregamento do lamidado	75
3.5	Materiais	76
3.5.1	Caracterização do concreto.....	76
3.5.2	Caracterização do PRFC e do aço	77
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	79
4.1	Deslocamentos verticais.....	79
4.2	Abertura de fissuras.....	81
4.3	Deformações de flexão	83
4.4	Escorregamento do Laminado	89
4.5	Modos de ruptura.....	91
4.6	Análise das limitações dos mecanismos HB e FT.....	95
4.7	Análise das recomendações normativas.....	97
5	CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	99
5.1	Conclusões	99
5.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	102
	REFERÊNCIAS.....	103

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

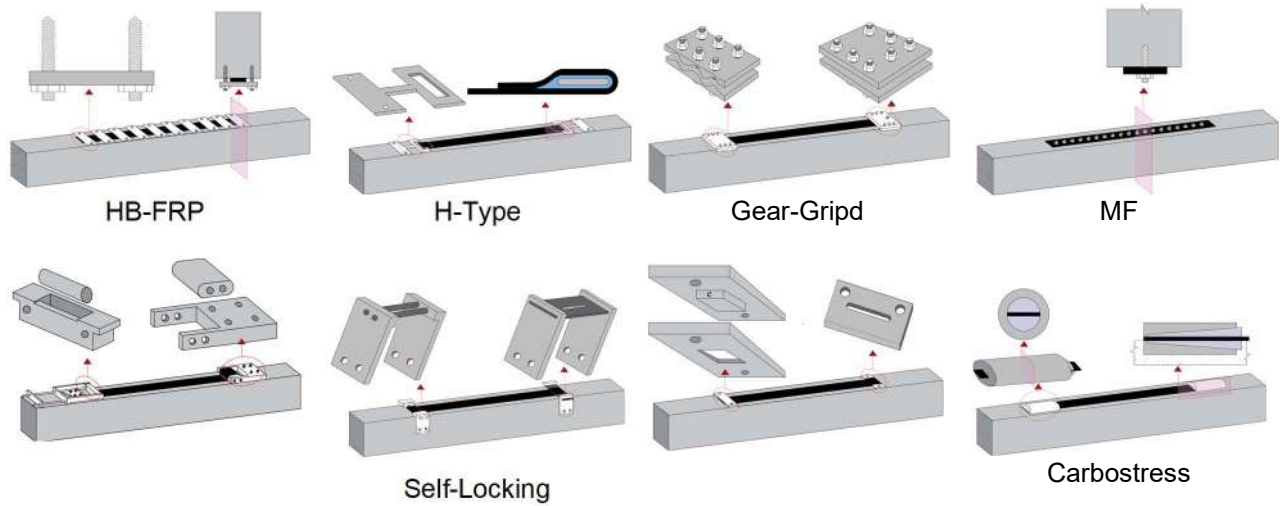
Existem variadas formas de realizar o reforço à flexão em vigas de concreto armado como: aumento da seção transversal (Alkhateeb e Hejazi, 2024); reforço com chapas metálicas coladas (Ghalla *et al.*, 2024) e/ou com ancoragem mecânica (Ghalla *et al.*, 2024, Zhang *et al.*, 2022, Kim *et al.*, 2021); reforço com vergalhão de fibras sintéticas (Alkhateeb e Hejazi, 2024, Wang *et al.*, 2020); protensão externa com cordoalhas metálicas ou vergalhões de fibras sintéticas (Abbas *et al.*, 2024, Wang *et al.* 2020); reforço com mantas ou laminados de Polímeros Reforçados com Fibras (FRP) não protendidos (Siddika *et al.*, 2019); e até reforço com mantas ou laminados de PRF protendido (YANG *et al.*, 2021).

O reforço à flexão com FRP em forma de mantas ou laminados de fibra de carbono (CFRP) são amplamente utilizados desde a década de 90 (Guo *et al.*, 2021), destacando-se duas técnicas principais: *Externally Bonded Reinforcement* (EBR) (Siddika *et al.*, 2019) e a *Near-Surface Mounted* (NSM) (Effiong e Ede, 2022). Essas abordagens são discutidas em normas e boletins técnicos como, ACI 440-2R (2017), *fib* Bulletin 90 (2019) e a Eurocode 2 (2023).

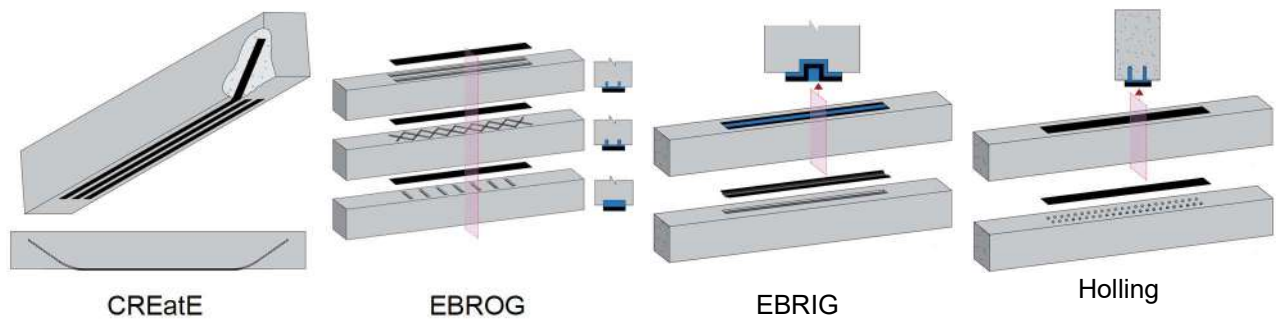
Nestes casos são observados diferentes modos de ruptura, sendo a delaminação do cobrimento de concreto e o descolamento do FRP os mais críticos, uma vez que esses fenômenos comprometem a ductilidade do elemento estrutural provocando uma ruptura prematura e sem avisos prévios (Siddika *et al.*, 2019), limitando a máxima capacidade resistente do reforço.

Diferentes tipos de mecanismos de ancoragem são soluções eficazes para retardar modos de ruptura prematuros e garantir o aproveitamento das propriedades mecânicas do reforço (Wang *et al.*, 2020, Chen *et al.*, 2019). Esses mecanismos são classificados em três grupos. O primeiro inclui mecanismos de ancoragem de aço baseadas na fricção e atrito podendo apresentar ou não aderência química (Figura 1.1a), como os sistemas *Hybrid Bonded FRP* (HB-FRP), *H-Type*, *Gear-Grip*, *Mechanically Fastened* (MF), *Self-Locking*, e *Carbostress*.

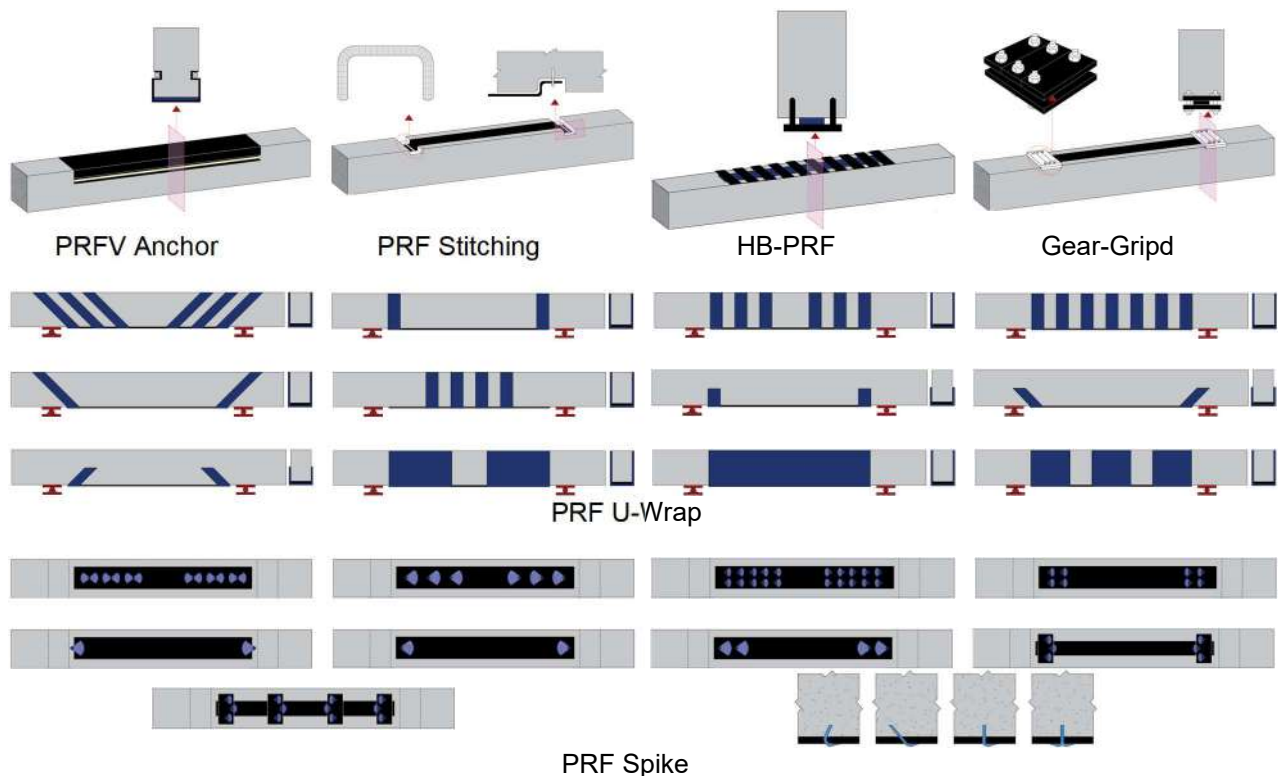
O segundo grupo (Figura 1.1b) aborda ancoragens que ampliam a área de ligação entre o reforço e o concreto e/ou modificam as propriedades da interface com



a) Ancoragem de aço baseadas na fricção e atrito



b) Ancoragens com base na ligação de aderência



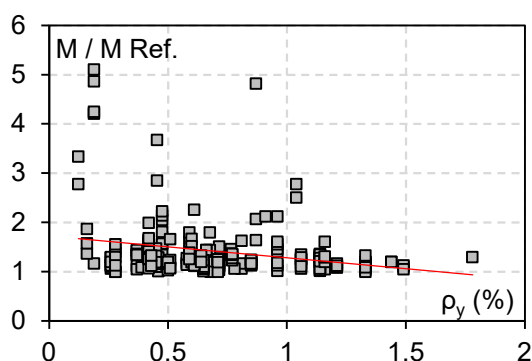
c) Ancoragem de FRP baseados na fricção e atrito

Figura 1.1. Sistemas de ancoragem existentes.

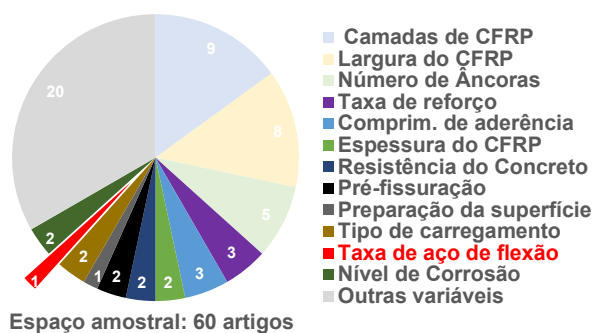
aderência química como os sistemas *Continuous Reinforcement Embedded at Ends* (CREatE), *EBR On Grooves* (EBROG), *EBR In Grooves* (EBRIG), *Holling*, e *Gradient*. O terceiro grupo é composto por mecanismos de ancoragem de FRP baseados na fricção e atrito juntamente com aderência química (Figura 1.1c), como os sistemas *Ancoragens com Polímeros Reforçados com Fibra de vidro* (GFRP Anchor), *PRF Stitching*, *CFRP π HB-FRP*, *CFRP lamindo Gear-Gripd*, *PRF U-Wraps*, e *PRF-Spike*.

A construção do estado da arte foi elaborado através de uma revisão sistemática e descritiva da literatura, incluindo análises bibliométricas dos artigos e os avanços dos 13 sistemas testados em vigas de concreto armado reforçadas com CFRP. Isto embasou a escolha dos mecanismos usados no programa experimental desta pesquisa. Sendo selecionado um mecanismo do primeiro grupo, o HB-FRP, que chama atenção pela boa capacidade resistente e por utilizar princípios da preparação da superfície, e um mecanismos baseado no aumento da área de ligação com aderência química, que faz a sobreposição do FRP com fibras na transversal (FT), que foi testado somente em um ensaio de aderência por tração direta em vigas (Abrantes *et al.*, 2024).

Na análise do banco de dados construído à partir da revisão bibliográfica, foi observado que a taxa de armadura de flexão existente tem influência no incremento de resistência de vigas reforçadas à flexão com CFRPs e sistema de ancoragem, com tendência de menores incrementos para maiores taxas de armadura, conforme Figura 1.2, que a mostra a relação entre o incremento de resistência dos elementos com sistemas de ancoragem em relação a vigas sem reforço ($M/M_{Ref.}$) e a taxa de armadura (ρ_y). No entanto, a influência deste efeito ainda não é bem compreendida nestes casos, considerando que dentre as pesquisas catalogadas, somente uma abordou sobre este fator como variável, como mostra a Figura 1.2b.



a) Tendência do incremento de resistência



b) Número de artigos por variáveis

Figura 1.2. Efeito da armadura existente na resistência de vigas com sistema de ancoragem.

1.2 Justificativa

A falha prematura do reforço com FRP ocasiona um comportamento não dúctil das estruturas e a subutilização da resistência da fibra. Por exemplo, a ACI 440-2R (2017) limita a deformação efetiva máxima do FRP a 0,4%, enquanto a deformação final dos CFRPs variam geralmente entre 1,5% e 2% (Chen *et al.*, 2019). Dessa forma, pesquisas com a utilização de sistemas de ancoragem apresentam-se com relevância, uma vez que permitem a análise do comportamento de sistemas de reforço com alcance de maiores resistências.

Por meio do banco de dados (limitado a pesquisas com vigas reforçadas à flexão com CFRP ancorados) apresentado nesta pesquisa, notou-se que a taxa de armadura de flexão tem influência no incremento de resistência de vigas de concreto armado reforçadas com CFRPs e sistemas de ancoragem. No entanto, a influência do efeito da taxa de aço ainda não é bem compreendida nesses casos, considerando que dentre as pesquisas apresentadas, somente uma abordou sobre este fator como variável.

Com isso, este trabalho apresenta um programa experimental com foco na influência da taxa de armadura existente e do sistema de ancoragem no desempenho à flexão de vigas de concreto armado reforçadas com laminado de fibra de carbono.

1.3 Objetivos

O objetivo geral é analisar experimentalmente o desempenho à flexão de vigas de concreto armado reforçadas com CFRP, variando a taxa de armadura existente (0,44% e 1,12%) e os sistemas de ancoragem (HB-FRP e FT). Esta pesquisa tem como objetivos específicos os seguintes tópicos:

- Analisar a eficiência do reforço no incremento de resistência e ductilidade das vigas com diferentes taxas da armadura;
- Analisar a influência da taxa de aço no comportamento do reforço com CFRP;
- Avaliar as limitações dos mecanismos HB-FRP e FT com base na literatura e nos resultados experimentais;
- Comparar a previsão de resistência no dimensionamento do reforço à flexão realizado pela norma ACI 440.2R (2017) e os resultados experimentais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Polímeros Reforçados com Fibras

Os FRPs são compósitos formados por uma matriz polimérica e um material de reforço de fibras, geralmente incluindo fillers e aditivos. As fibras assumem o papel de proporcionar resistência e rigidez ao compósito, enquanto a matriz é o elemento responsável pela transferência de tensões às fibras. Há uma tendência crescente na utilização de PRFs como solução para projeto de construção e reabilitação de estruturas existentes de concreto armado. Nesse viés, diversos estudos vêm sendo produzidos sobre o uso e desenvolvimento desses materiais como reforço em elementos de concreto armado.

Nesse sentido, a Figura 2.1 ilustra um fluxograma com os tipos de PRFs existentes e as tensões mínimas e máximas encontradas nas literaturas. Os polímeros sintéticos, que é o caso do carbono (Siddika *et al.*, 2019), vidro (Siddika *et al.*, 2019), aramida (Djafar-Henni e Kassoul, 2018), e basalto (Yao *et al.*, 2022), são muito utilizados na construção civil, com maior destaque na utilização de Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono (CFRP). Em paralelo a isso, existe uma linha de pesquisa que estuda fibras alternativas às sintéticas, sob a justificativa do incremento de materiais ambientalmente mais corretos.

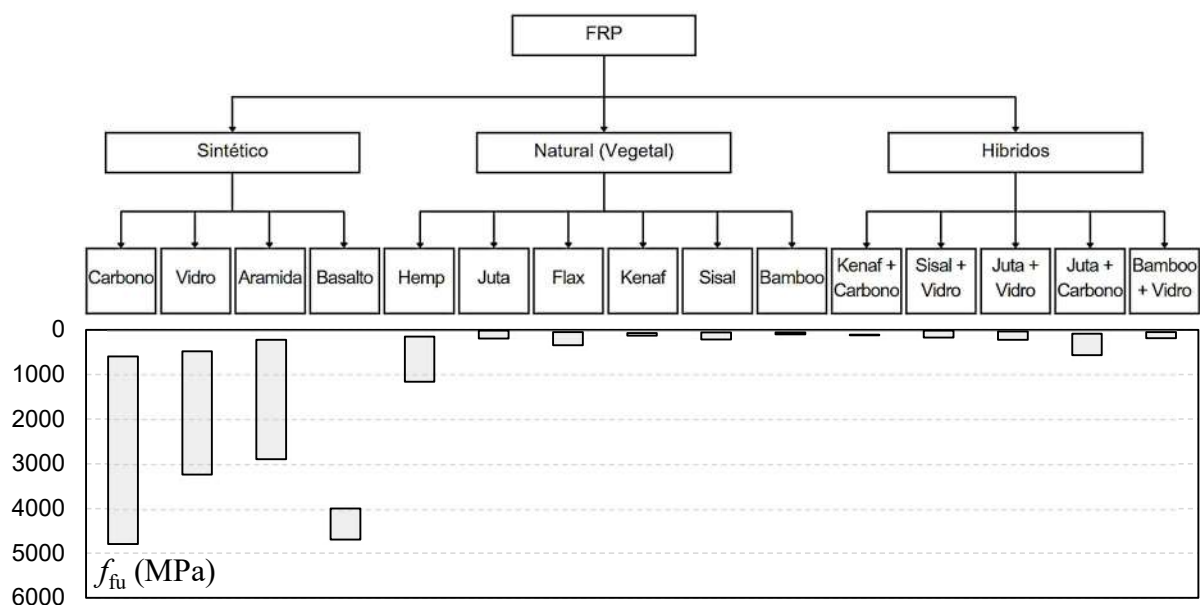


Figura 2.1 - FRPs Existentes e suas tensões de ruptura máximas e mínimas.

Neste caso, pode-se citar as fibras vegetais, que é o caso da Hemp (Cervantes *et al.* 2014; Siriluk *et al.*, 2018), juta (Jirawattanasomkul *et al.*, 2020; Madhavi *et al.*, 2021), flax (Chen *et al.*, 2020; Xia *et al.*, 2014), Kenaf (Alam *et al.*, 2018; Hafizah *et al.*, 2014), sisal (Sem e Reddy, 2014, Yooprasertchai *et al.*, 2022), e bamboo (Chandramohan *et al.*, 2019; Chin *et al.*, 2020). Por último, as fibras híbridas, como é o caso do Kenaf e Carbono (Aisyah *et al.*, 2018), sisal e vidro (Ramesh *et al.*, 2013; Samanta *et al.*, 2015), juta e vidro (Ramesh *et al.*, 2013; Samanta *et al.*, 2015), juta e carbono (Sujon *et al.*, 2020, Ashworth *et al.*, 2016), bamboo e vidro (Chandramohan *et al.*, 2019; Samanta *et al.*, 2015).

2.1.1 Vantagens e Limitações do uso de PRFC como material de reforço

A utilização de compósitos de CFRP como reforço em elementos de concreto armado é justificada pelas propriedades mecânicas favoráveis a sua aplicação nesses materiais. Além disso, quando essas propriedades são comparadas com outros tipos de materiais existentes, como a aramida, basalto, aço e vidro, nota-se a superioridade da fibra de Carbono. A Figura 2.2 mostra um comparativo entre os diagramas de tensão (σ)-deformação(ϵ) de polímeros reforçados com fibras sintéticas unidirecionais e aço.

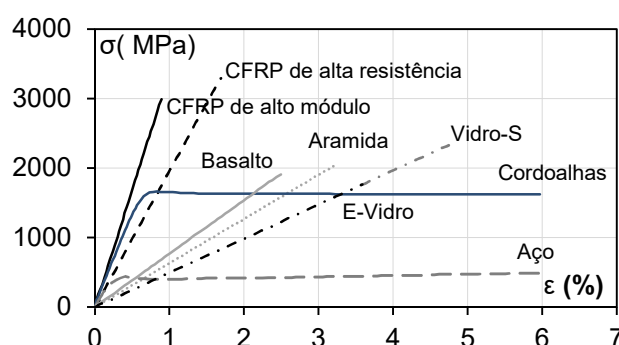


Figura 2.2 - Tensão x deformação de FRPs unidirecionais e aço. Adaptado de Amran (2018).

Nesse sentido, Solahuddin e Yahaya (2023) destacam que uma característica importante do CFRP é a sua adaptabilidade devido à possibilidade de modificar as propriedades do compósito por meio do tipo de fibra, matriz, comprimento, orientação e quantidade de fibras de reforço.

De acordo com Vijayan *et al.*, (2023), os compósitos de CFRP possuem uma

maior resistência à corrosão, com uso favorável em ambientes sujeitos a elementos corrosivos e umidade. Além disso, a boa relação resistência/peso proporciona a aplicação do CFRP como reforço em estruturas de concreto armado, principalmente em casos em que a estrutura deve resistir a cargas de projetos mais elevadas, correção da perda de resistência acarretada pela deterioração, deficiências de projeto e aumento da ductilidade.

As principais desvantagens do CFRP são o alto custo da produção e o lento processo de fabricação devido ao longo ciclo de moldagem. Além disso, pode apresentar um comportamento frágil sob certas condições e resistência limitada ao fogo, que caracterizam as principais limitações do CFRP.

2.2 Métodos de reforço à flexão com FRP

A técnica *Externally Bonded Reinforcement* (EBR) consiste na utilização de FRPs de reforço colados externamente ao substrato tracionado dos elementos de concreto. Diversas pesquisas foram realizadas para avaliar a resistência da ligação entre a superfície do concreto e o PRF, o que desencadeou diversos métodos que auxiliam na compreensão das relações de aderência na interface do elemento reforçado pelo método EBR, como Neubauer e Rostasy (1999); Chen e Teng (2001); Smith e Teng (2002); Lu *et al.*, (2005); Ueda e Dai (2005); Teng *et al.*, (2006); Seracino *et al.*, (2007); Sayed-Ahmed *et al.*, (2009); Wu *et al.*, (2010); Wu *et al.*, (2012); Pan e Wu (2014). A Tabela 2.1 apresenta os parâmetros que influenciam na aderência.

Tabela 2.1 - Parâmetros que influenciam na aderência de sistemas de PRF.

Autor	Parâmetros	Exemplo
Haddad <i>et al.</i> 2013; Monti <i>et al.</i> 2003	Características do elemento reforçado	Tipo, Resistência, Rugosidade e Condições do cobrimento
Shadravan, 2010	Características do FRP	Tipo, Resistência, Largura Espessura e Número de camadas
	Características do Adesivo	Alongamento, Espessura e Resistência
Carlioni <i>et al.</i> 2012; Dai <i>et al.</i> 2005; Nizic e Zilch, 2009	Tipo de carregamento	Monotônico/Cíclico, Estático/Dinâmico, Sismos etc.
Ahmed e Kodur, 2011; Tommaso <i>et al.</i> 2001; Subramaniam <i>et al.</i> 2008; Buyukozturk e Au, 2004.	Condições ambientais	Temperatura; Congelamento e Degelo; Umidade

No método *Near-Surface Mounted* (NSM) são criadas aberturas longitudinais na região tracionada de elementos de concreto, onde são inseridas as tiras ou hastes

de FRP, que são protegidos pela resina ou argamassa que preenche a ranhura e estabelece a relação de aderência entre o elemento de concreto e o FRP (Mostofinejad *et al.* 2019).

Diferentemente do método EBR, no método NSM, o FRP não fica exposto ao ambiente. Os autores De Lorenzis e Teng (2007), Barros *et al.* (2007), Coelho *et al.*, (2011), Billotta *et al.*, (2014), Seo *et al.*, (2016) e Alwash *et al.*, (2021) compararam as técnicas e destacam as seguintes vantagens do método NSM: a proteção do FRP contra danos mecânicos, ambientais e térmicos; barras ou faixas de FRP embutidas têm melhor desempenho de aderência ao concreto, o que resulta em maior utilização da deformação do CFRP e um maior nível de resistência.

Conforme Moghaddas e Mostofinejad (2019), a preparação da superfície da estrutura reforçada é uma etapa fundamental para a eficiência das técnicas de reforço, uma vez que a descolagem gera falha prematura do sistema de FRP sem mobilizar a capacidade mecânica total do reforço, sendo uma problemática comum que afeta a eficácia da técnica.

Neste caso, existem alguns métodos de preparação de superfície, como abrasão mecânica, jato de água, técnicas jateamento de areia, esmerilhamento, pressão de ar, *peel-ply* de náilon e SBR/EBR (Huo *et al.*, 2018; Hawileh *et al.*, 2014; Mostofinejad e Kashani, 2013; Kang *et al.*, 2012; Bilotta *et al.*, 2011; Dalfré, 2022). Não obstante, vale destacar também os métodos existentes para colagem do FRP na superfície dos elementos de concreto armado.

Para os sistemas curados no local, existe o método *dry-lay-up*, o qual corresponde à aplicação da manta ou tecido diretamente sobre a resina, que foi aplicada na superfície do concreto, diferentemente do método *wet-lay-up*, em que ocorre a impregnação da manta ou tecido, que em seguida é posicionada sobre a superfície do concreto previamente preparada com uso de primer e resina de regularização (ABECE, 2022).

2.3 Modos de ruptura de vigas reforçadas à flexão com FRP

A Figura 2.3 mostra uma exemplificação do comportamento de uma viga reforçada com FRP e os modos de ruptura com as suas respectivas causas destacadas. De acordo com Siddika *et al.*, (2019), em vigas reforçadas com PRF podem ocorrer diferentes modos de ruptura, como o esmagamento do concreto com

ou sem escoamento do aço (Sebau *et al.*, 2018), caso em que a deformação de compressão do concreto (ε_c) atinge sua deformação máxima utilizável ($\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$). A ruptura do FRP com ou sem escoamento do aço (Attari *et al.*, 2012) ocorre se a deformação no FRP (ε_f) atingir sua tensão de ruptura projetada ($\varepsilon_f = \varepsilon_{fu}$) antes que o concreto atinja sua tensão máxima.

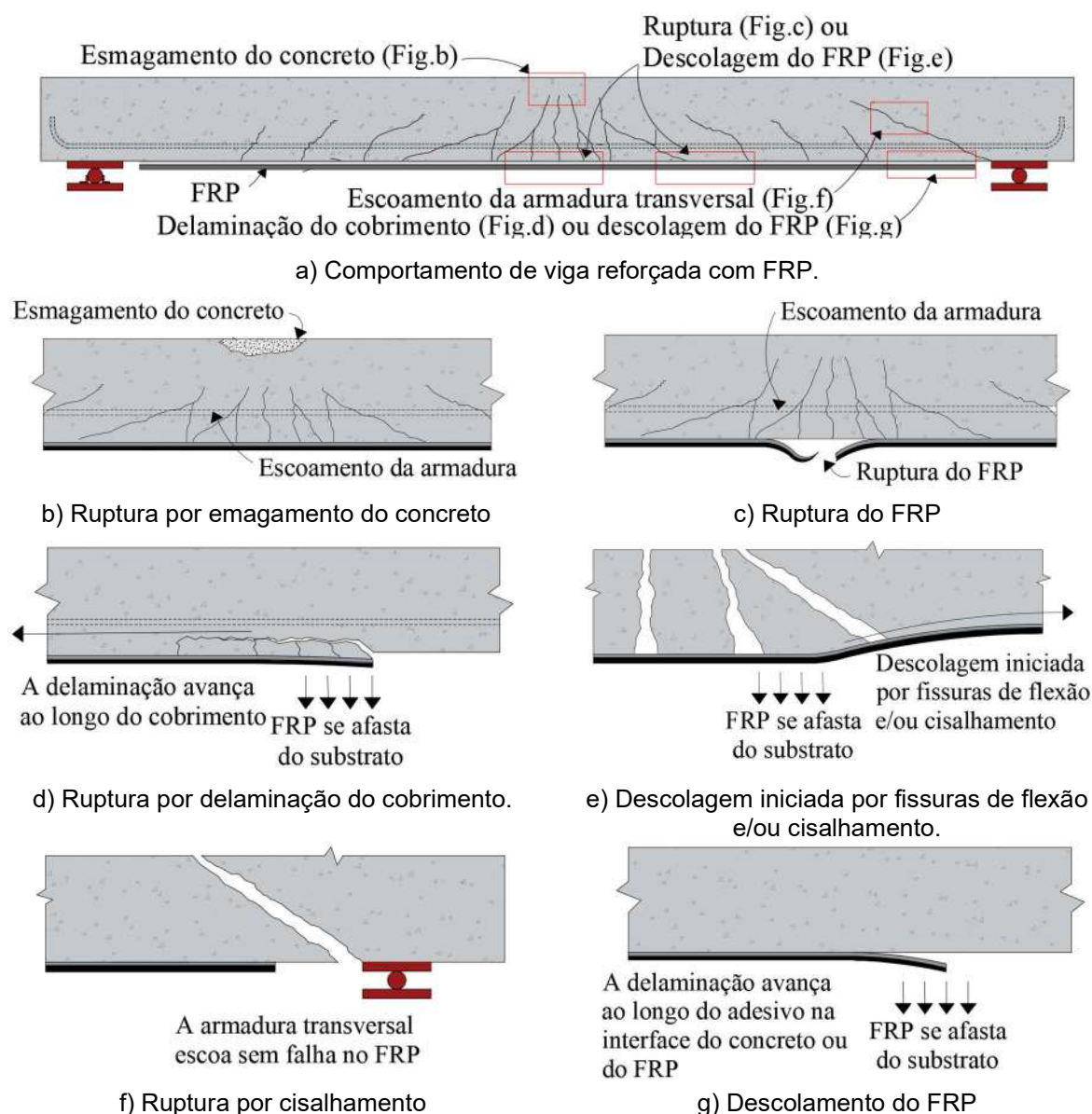


Figura 2.3 - Modos de ruptura de vigas reforçadas com FRP. Adaptado de ACI 440-2R (2017).

O descolamento do FRP do substrato de concreto (Hawileh *et al.*, 2014) e a delaminação por cisalhamento/tração do cobrimento de concreto (Sebau *et al.*, 2018) podem ocorrer se a força no FRP não puder ser sustentada pelo substrato. A ruptura por esforço cortante (Adhikary e Mutsuyoshi, 2004) pode ocorrer caso a armadura

transversal não seja dimensionada adequadamente.

Os modos de ruptura apresentados são comuns para o método EBR e NSM. A compreensão desses mecanismos é muito importante, visto que, embora essas técnicas sejam bastante difundidas, a lacuna da falha prematura ainda norteia o desenvolvimento de sistemas de ancoragem (Al-saadi *et al.*, 2019).

2.4 Revisão sistemática sobre os mecanismos de ancoragem

2.4.1 Método de seleção dos documentos e construção da revisão

A Figura 2.4 ilustra o processo de seleção dos documentos e o desenvolvimento deste estudo. As plataformas de busca utilizadas para a recuperação dos documentos foram Google Scholar, Scopus e Web of Science. A estratégia aplicada, foi buscar por "*Fiber Reinforced Polymer*" AND "*anchorage system*" OR "*fiber*" AND "*reinforced*" AND "*concrete structures*" AND "*flexural reinforcement*" no: *Google Scholar* (acesso em 1º de agosto de 2024), resultando na obtenção de 23.300 documentos; *Scopus* (acesso em 23 de setembro de 2024), sendo recuperados 3.338 documentos; e *Web of Science* (acesso em 4 de outubro de 2024) onde foram identificados 1.176 documentos.

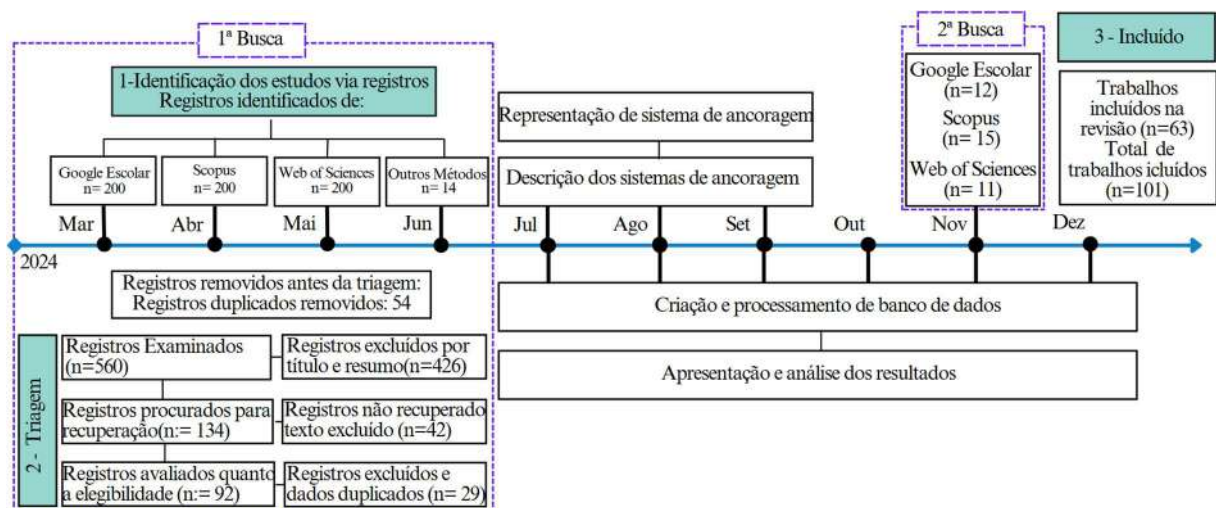


Figura 2.4 - Método de seleção dos documentos e construção da revisão.

Os documentos mais relevantes estavam entre os 150 primeiros resultados dessas bases de dados. Adicionalmente, 107 registros foram obtidos no Google Scholar com uma busca revisada, incluindo os termos *direct pullout test* AND *Beam pullout test*, além do nome específico do tipo de ancoragem (acesso em 3 de

novembro de 2024).

Na primeira etapa, foram analisados títulos e resumos, considerando apenas documentos que abordavam sistemas de reforço com fibra de carbono e ancoragem. Também estudos analíticos e experimentais foram incluídos na revisão descritiva para abranger os sistemas de ancoragem existentes, enquanto apenas estudos experimentais foram considerados na revisão integrativa.

Não foram impostas restrições quanto ao período de publicação, permitindo a análise da evolução do estado da arte. Além disso, dez estudos relevantes foram identificados por meio de buscas em citações dos artigos selecionados, sendo três provenientes do Google Patents e um do ResearchGate. No total, 101 documentos foram analisados, dos quais dois eram artigos de conferências, 3 patentes e 96 de periódicos. Todos os documentos foram revisados manualmente para eliminação de duplicatas.

2.4.2 Frequência das publicações por revistas

Os 101 documentos selecionados para esta pesquisa foram analisados com o objetivo de identificar os periódicos com impacto significativo na área de estudos sobre ancoragens em reforço à flexão com CFRP. Dentre as 36 fontes identificadas, destacam-se as revistas com pelo menos três publicações, conforme apresentado na Tabela 2.2, que também exibe o Journal Citation Reports (JCR) de cada periódico, além de destacar a publicação mais recente e a mais citada.

Tabela 2.2 - Principais fontes de documentos.

Revistas	JCR	Publicação	Última publicação	Mais citada	C*
ACI Structural Journal	1.3	4	Ebead e Saeed, 2014	Elsayed <i>et al.</i> 2009	97
Engineering Structures	5.6	10	Zhou <i>et al.</i> 2023b	Yun <i>et al.</i> 2008	185
Composite Structures	6.3	10	Zhou <i>et al.</i> 2020b	Bank e Arora, 2007	182
Composites Part B-Engineering	2.7	5	Azevedo <i>et al.</i> 2022	Chen <i>et al.</i> 2018	186
Construction and Building Materials	7.4	11	Alotaibe, 2024; Wang <i>et al.</i> 2024	Mostofinejad <i>et al.</i> 2013	170
J. of Composites for Construction	2.9	20	Moghaddas e Mostofinejad, 2019	Mostofinejad e Mahmoudabadi, 2010	244

*C=Citações

O periódico Journal of Composites for Construction apresentou maior número de publicações na área, com 20 documentos; seguido por Construction and Building Materials, com 11 publicações; Composite Structures e Engineering Structures, ambas com 10 publicações; e Composites Part B-Engineering e ACI Structural Journal, com 5 e 4 publicações, respectivamente.

A Figura 2.5 mostra a evolução da produção científica, exibindo a

periodicidade das publicações por revistas (Figura 2.5a) e por mecanismo de ancoragem (Figura 2.5b). As primeiras publicações sobre o tema iniciaram em 2003 e mantiveram um crescimento constante até a estabilização do número de publicações em 2016 com uma média de 6 publicações por ano. O maior número de publicações em um único ano ocorreu em 2018, com nove documentos, seguido por 2019 e 2021, ambos com oito documentos. O número de documentos coletados em 2024 pode ser maior que o registrado, uma vez que não foram realizadas buscas foram interrompidas em novembro de 2024.

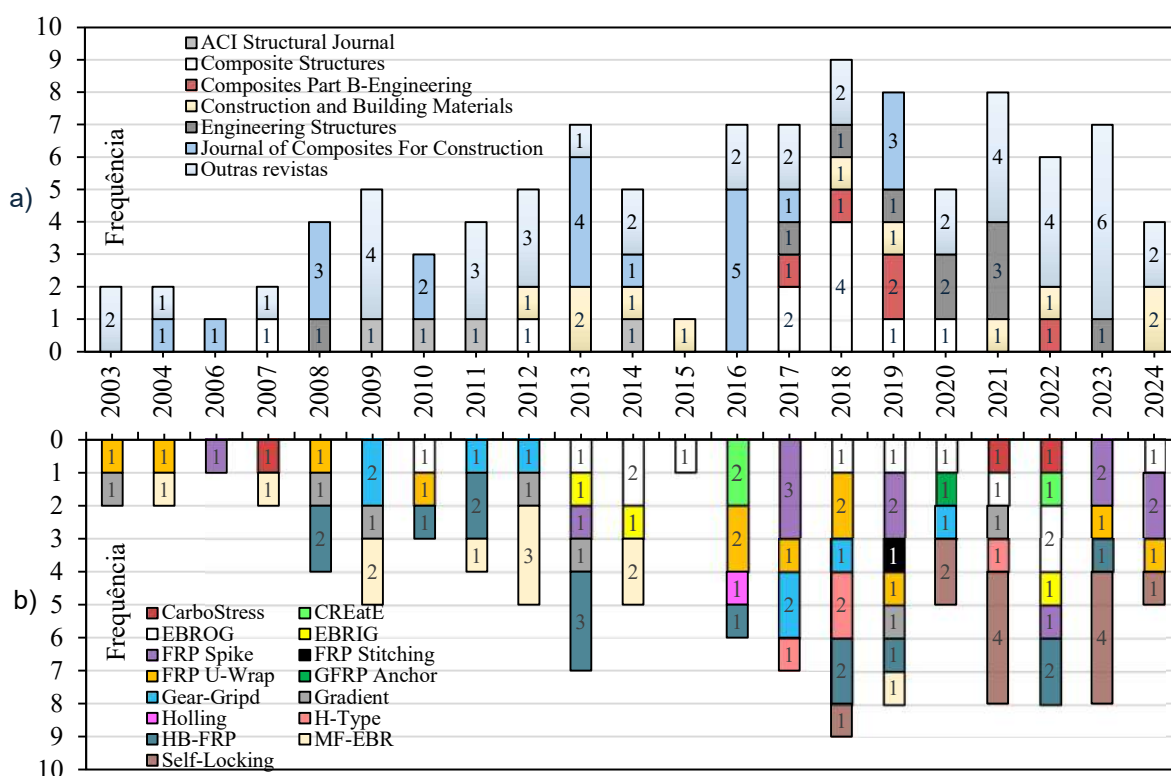


Figura 2.5 - Frequência de publicações por ano. a) Revistas; b) Mecanismos de ancoragem.

Entre os periódicos com maior impacto, Construction and Building Materials e Journal of Composites for Construction mantiveram uma periodicidade mais consistente, publicando regularmente com intervalos máximos de dois anos entre cada publicação, até a última ocorrência em 2024 e 2019, respectivamente.

Embora os estudos sobre ancoragens tenham iniciado há mais de duas décadas, a maioria dos mecanismos foram desenvolvidos e aprimorados nos últimos 10 anos, explicando o aumento das publicações no período. Aproximadamente 40% dos métodos surgiram nesse intervalo (CREatE, FRP Stitching, GFRP Anchor, Holling, H-Type e Self-Locking), o que ressalta a importância do tema.

Além disso, alguns documentos mostram análises de mais de um sistema de ancoragem. Os métodos FRP Stitching GFRP Anchor e Holling possuem uma publicação cada; enquanto CarboStress e CREatE com três; e EBRIG e H-Type, com quatro. Os métodos Gradient, Gear Gripd, MF-EBR, FRP-Spike, EBROG, FRP U-Wraps, Self-Locking e HB-FRP possuem entre 7 e 15 documentos.

2.4.3 Frequência das publicações por Países

A Figura 2.6 mostra as interseções das pesquisas desenvolvidas sobre os sistemas de ancoragem por continentes. A Ásia, com 76 documentos, possui citações em 86,66% dos métodos de ancoragem, o que se justifica pelo fato de 60% desses métodos (EBROG, EBRIG, Holling, GFRP Anchor, FRP U-Jackets, Gear-Gripd, H-Type, HB-FRP e Self-Locking) terem suas primeiras publicações por autores desse continente ou elaborados em coautoria.

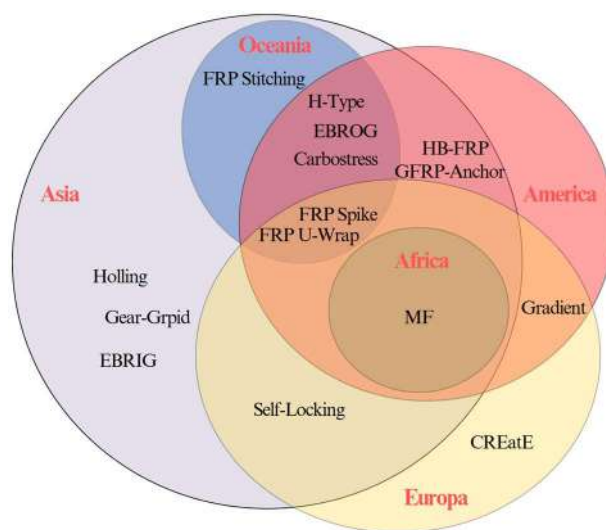


Figura 2.6 - Diagrama de Venn mostrando a abordagem dos mecanismos por continente.

A América do Norte, com 20 documentos, faz referência a 60% dos métodos e teve autores nas primeiras publicações de dois sistemas (CarboStress e FRP-Spike). A Europa, com 18 documentos, originou os métodos CREatE e Gradient. Já a Oceania, com 11 documentos, teve autores nas primeiras publicações do sistema FRP Stitching e apresentou colaboradores nos trabalhos dos sistemas FRP U-Wraps e H-Type. Ambos os continentes citam 40% dos métodos. A África, com dois documentos, faz referência apenas ao método MF. Métodos recentes, como CREatE, Gear-Gripd, EBRIG e Holling foram abordados exclusivamente nos continentes de origem.

A Figura 2.7 mostra a distribuição global das pesquisas. Foram identificados estudos em 19 países, com destaque para China (45), EUA (18), Iran (14) e Austrália (11) com mais de 10 publicações. Outros países relevantes incluem Emirados Árabes Unidos (9), Portugal (7), Suíça (5) e Canadá (5). Os demais países, como Suécia, Itália, Egito, Iraque, Reino Unido, Espanha, Kuwait, Bangladesh, Japão, Coreia do Sul e Nova Zelândia, possuem um número menor ou igual a cinco documentos.

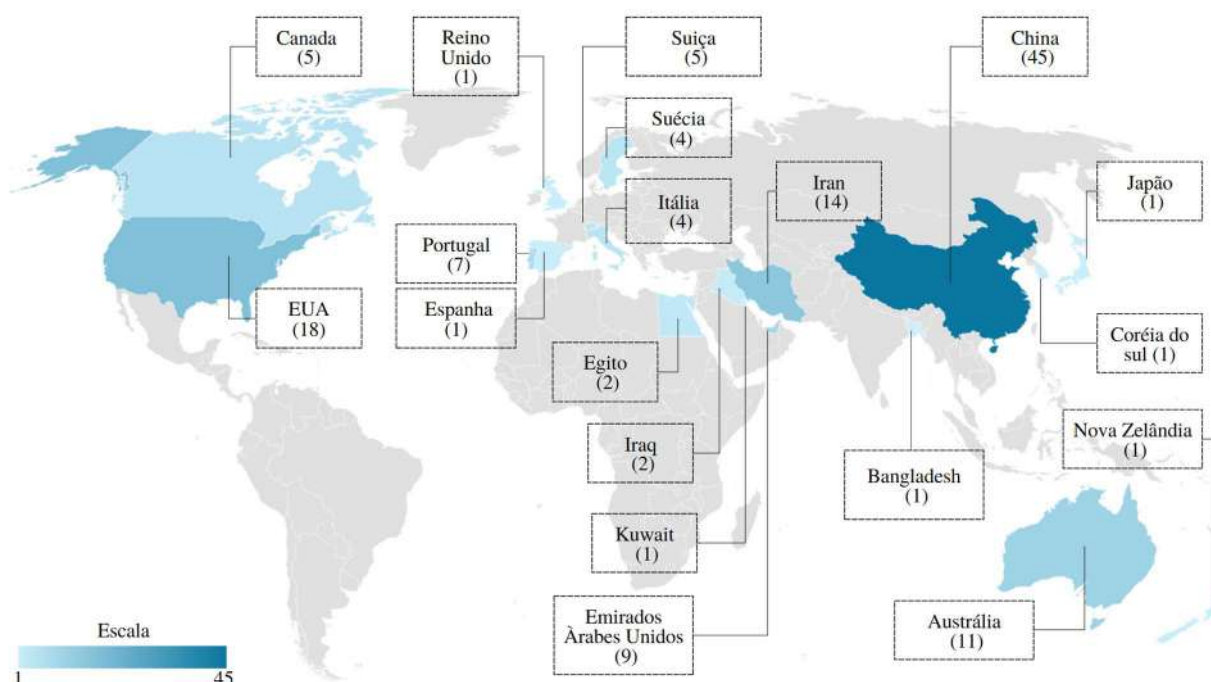


Figura 2.7- Número de publicações por países.

2.4.4 Análise de Palavras-chave

A Figura 2.8 mostra a análise da densidade em rede das palavras-chave, realizada utilizando o software VOSviewer, evidenciando tendências de pesquisa ao longo do tempo. O tamanho das bolhas indica a frequência das palavras-chave, enquanto as cores representam o período de uso predominante.

Os dados bibliométricos foram tratados manualmente para padronização, evitando duplicação por variação de idiomas. Considerou-se um mínimo de três ocorrências, sendo 35 das 233 palavras-chave elegíveis. Nos últimos cinco anos, destacam-se como mais utilizadas: Sheets, Reinforced Concrete Beams; Joints; Systems; Strips; Spike Anchors; e Prestress.

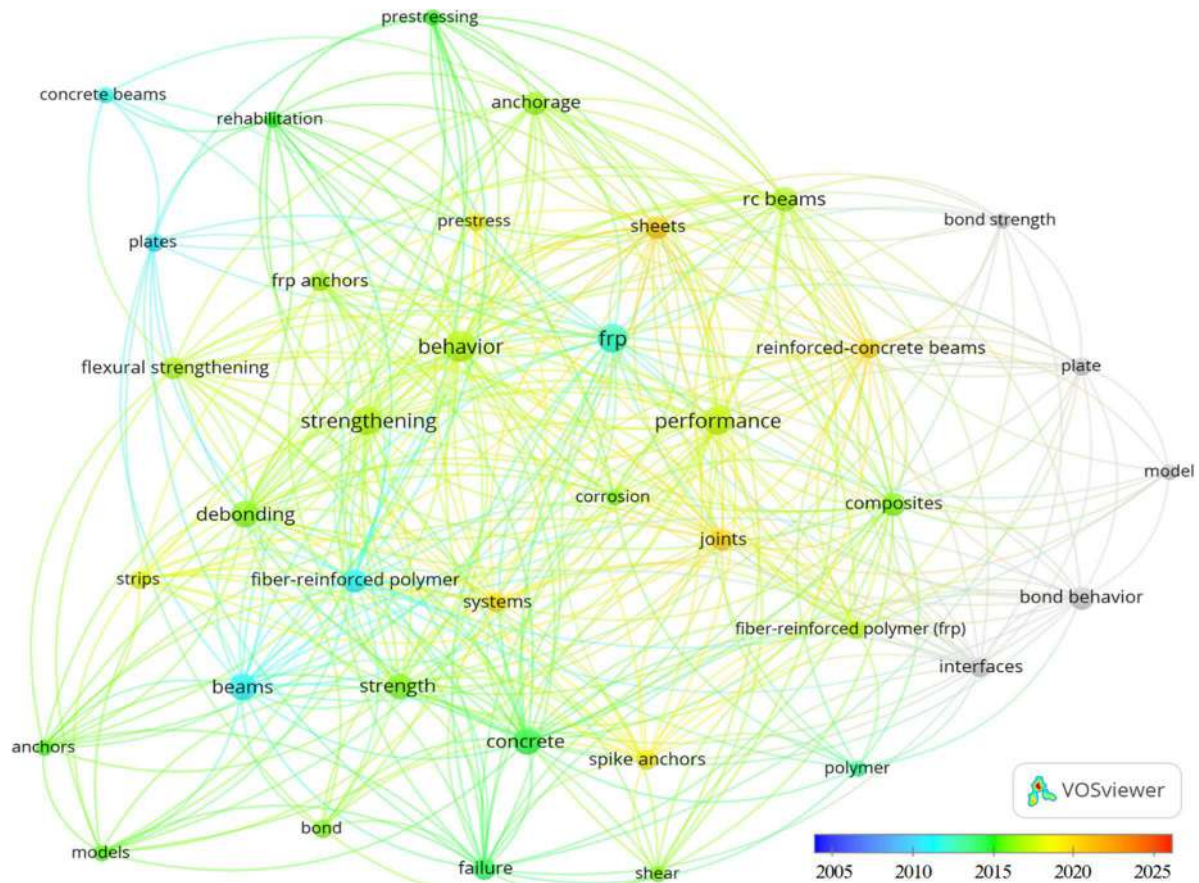


Figura 2.8 - Análise de palavras-chave.

2.4.5 Rede de coautoria

A Figura 2.9 mostra a rede de coautoria obtida com o auxílio do software VOSviewer, onde a escala de cores indica o número médio de citações por documento e o tamanho das bolhas representa a quantidade de publicações. A análise utilizou dados bibliográficos das bases consultadas neste estudo, considerando um mínimo de três ocorrências por autor.

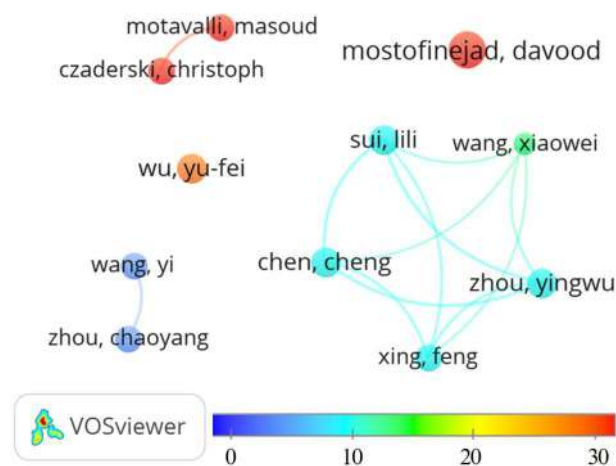


Figura 2.9 - Rede de coautoria.

Dos 170 autores identificados, 11 atingiram esse critério, formando cinco grupos de pesquisa. Destacam-se: Mostofinejad D. (com EBROG e EBRIG, FRP U-Jackets); Wu Y. (com HB-FRP); Czaderski C. (com Gradient); Wang Yi (com Self-Locking); e Chen C. (com HB-FRP e H-Type).

2.4.6 Rede de cocitação de documentos

Na Figura 8 é mostrado a rede de cocitação gerada no software VOSviewer, evidenciando interconexão entre as publicações mais citadas nos documentos analisados. Foi adotado um mínimo de sete ocorrências, e, das 711 referências identificadas, apenas nove atingiram o critério estabelecido, formando dois grupos principais. Os grupos abordam mecanismos de ancoragem aplicados em reforço com CFRP, diferenciando-se pelo enfoque: o grupo verde investiga o comportamento e a eficiência dos reforços através de ensaios experimentais; enquanto o grupo vermelho propõe aprimoramentos teóricos, experimentais e prático para sistemas ancorados.

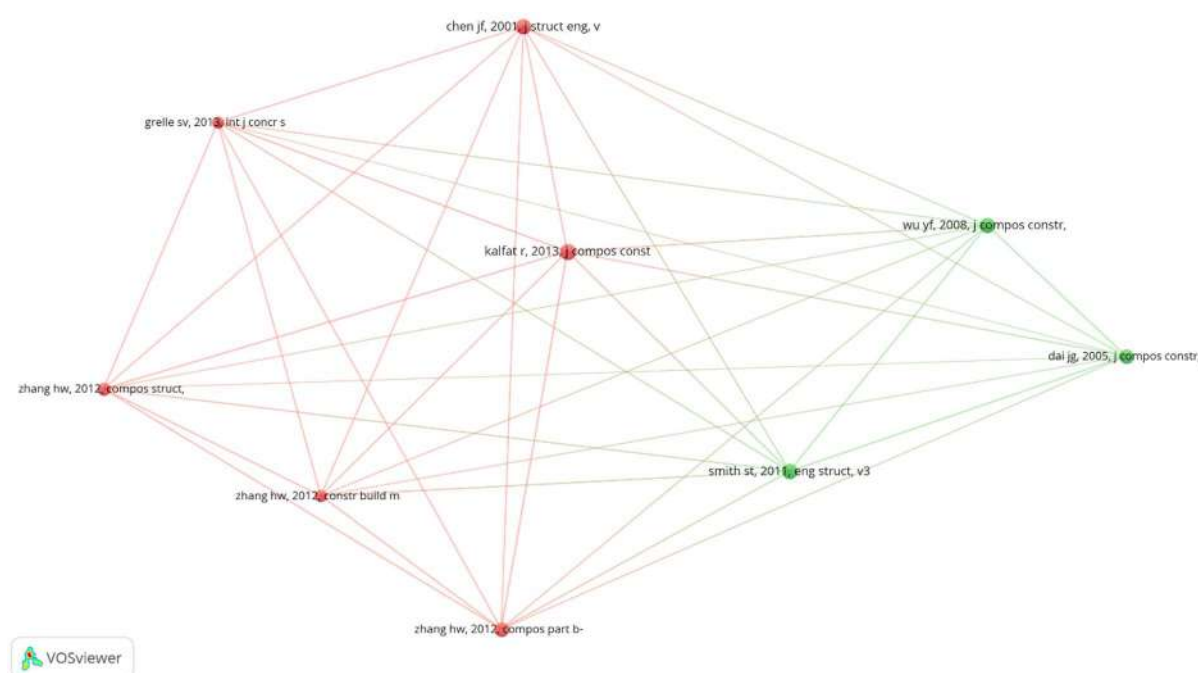


Figura 2.10 - Cocitação de documentos.

2.5 Avanços de pesquisas com mecanismos de ancoragem

2.5.1 Mecanismos metálicos baseados na fricção e atrito

O sistema mechanical fastener (MF) consiste no uso de conectores inseridos

em furos pré ou pós-perfurados no reforço e no concreto adjacente, podendo combinar a ancoragem mecânica com a técnica EBR (MF-EBR) ou se utilizar apenas das ancoragens mecânicas (MF-FRP). Esse sistema já foi aplicado tanto em ensaios localizados de aderência (Bank e Arora, 2007; Elsayed *et al.*, 2009; Coelho *et al.*, 2012; Sena-Cruz *et al.*, 2012b; McCoy *et al.*, 2019) quanto em ensaios de vigas de concreto armado reforçadas com o sistema MF (Iamanna *et al.*, 2004; Lee *et al.*, 2009; Ebead, 2011; Sena-Cruz *et al.*, 2012a; Sena-Cruz *et al.*, 2012b; El-Maaddawy *et al.*, 2013).

As principais variáveis estudadas foram o número de conectores (Iamanna *et al.*, 2004, Lee *et al.*, 2009, Ebead, 2011), tipo de conector (Bank e Arora, 2007), tipo de carregamento (Sena-cruz *et al.*, 2012a), tempo de exposição à corrosão (El-Maaddawy *et al.* 2013, El-Maaddawy *et al.*, 2014), largura do reforço (El-Maaddawy *et al.*, 2013, El-Maaddawy *et al.*, 2014), e comprimento de aderência (El-Maaddawy *et al.*, 2013, El-Maaddawy *et al.*, 2014, Ebead, 2011).

O sistema MF foi eficiente em evitar a ruptura por descolamento do CFRP e aumentar a resistência à flexão de vigas em até 125%. Embora não haja recomendações normativas para projeto de reforço à flexão por esse sistema, cinco trabalhos propõem equações de projeto para sua utilização (Bank e Arora, 2007; Lee *et al.*, 2009; Napoli *et al.*, 2013; Martinelli *et al.*, 2014; Ebead e Saeed, 2014).

Assim como o sistema MF, o sistema HB-FRP combina a técnica EBR com ancoragem mecânica adicional. Porém, a ancoragem ocorre pelo atrito e pressão de uma chapa de aço colada sobre o reforço e fixada com conectores embutidos no concreto pré ou pós-instalado sem a perfuração do FRP. Essa técnica foi testada em ensaios localizados (Yun *et al.*, 2008; Wu e Liu, 2013; Wu *et al.*, 2016; Zhou *et al.*, 2018; Chen *et al.*, 2018; Gao *et al.*, 2022; Dong, 2023). Existem dois modelos de dimensionamento para o sistema HB (Wu *et al.*, 2010; Chen *et al.*, 2019).

Como reforço à flexão em vigas de concreto armado avaliando a influência do número de camadas (Wu e Huang, 2008), Wu *et al.*, 2011), do comprimento de aderência (Wu *et al.*, 2010), nível de pré-fissuração (Guan *et al.*, 2011), número e espaçamento das âncoras (Mostafa e Razaqpur, 2013), além da espessura do reforço e torque no conector (Chen *et al.*, 2019). Há uma variação desse método na qual as chapas e conectores de aço são substituídos por um conjunto monolítico de FRP (Mostafa e Razaqpur, 2013).

O sistema Self-locking consiste no envolvimento das extremidades das

lâminas de reforço em chapas ou pinos de aço fixados à viga por conectores metálicos, aqui a ancoragem ocorre pelo atrito entre o mecanismo e o FRP. Esse sistema é aplicado em reforço com CFRP protendido (Wei *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2024), com estudos avaliando a taxa de corrosão, carga de protensão (Wei *et al.*, 2021), e o número de camadas de reforço (Wang *et al.*, 2024).

Outros estudos investigam sua aplicação em vigas reforçadas à flexão com CFRP não protendidos (Zhou *et al.* 2018; Zhou *et al.* 2020a; Zhou *et al.* 2020b; He *et al.* 2023; Zhou *et al.* 2023a; Zhou *et al.*, 2023b; Wang *et al.*, 2024. Há estudos que incluem ensaios localizados de aderência (Zhou *et al.*, 2020; He *et al.*, 2023; Zhou *et al.*, 2023a; Zhou *et al.*, 2023b), e modelos de dimensionamento (Dong *et al.*, 2021; He *et al.*, 2023; Zhou *et al.*, 2023b).

O sistema H-Type utiliza uma chapa de aço em formato “H”, cuja haste de ligação entre o concreto e o reforço tem a intenção de melhorar a ductilidade do elemento reforçado. Esse mecanismo foi aplicado em vigas reforçadas com CFRP não protendido (Zhou *et al.*, 2018) considerando variações na área da haste. Também foi utilizado em reforços com FRP protendido (Chen *et al.*, 2021), onde foram analisadas cargas de protensão e a resistência do concreto. O H-type possuem estudos sobre aderência (Zhou *et al.*, 2017; Zhou *et al.*, 2018; Chen *et al.*, 2018), e modelos de dimensionamento com CFRP não protendido (Zhou *et al.*, 2018).

O sistema Gear-Gripd possui três variantes. A Primeira, *Wave-Shaped-Gear-Grip* (WSGG), é aplicado exclusivamente em vigas reforçadas à flexão com CFRP protendido (Zhuo *et al.*, 2009) e em ensaios de aderência (Zhuo e LI, 2007; Chen *et al.*, 2009). A segunda, baseada em chapas planas de carbono, foi testada em reforço à flexão com CFRP protendido (Zhang e Shang, 2017a; Zhang e Shang, 2017b; Shang *et al.* 2012; Jing e Ping, 2018), contando com apenas um modelo de dimensionamento (Jing e Ping, 2018).

A terceira variante emprega duas chapas planas conectadas por um elemento que atravessa o FRP, sendo aplicada em reforço não protendido, também dispondo de um modelo de dimensionamento (Bengar e Shahmansouri, 2020). A Tabela 2.3 apresenta os principais insights e lacunas dos trabalhos.

Tabela 2.3 - Principais insights e lacunas dos mecanismos de aço.

Mecanismos	Principais Insights	Principais Lacunas
HB FRP	- O aumento de resistência variou de 13% a 76%; - A resistência total deste mecanismo consiste na força de união adesiva e na resistência adicional da ancoragem (Wu e Huang 2008, Wu <i>et al.</i> 2010, Chen <i>et al.</i> 2019); - Fatores como maiores espessuras do reforço (Chen <i>et al.</i> 2019), diâmetro menores no conector (Chen <i>et al.</i> 2019; Wu e Huang, 2008) e intensidade do torque nos conectores (Wu <i>et al.</i> 2011) influenciam diretamente os modos de ruptura.	- Desempenho a longo prazo sob condições ambientais e carga constante; - Comportamento sob carga cíclica; - Aplicação com reforço protendido; - Limites de taxa de reforço, diâmetros dos fixadores e torque. - Efeito de diferentes técnicas EB.
H-Type	- O aumento de resistência variou de 6% a 41%; - A combinação do mecanismo com o método de colagem garantem um comportamento mais dúctil da estrutura, uma vez que o mecanismo é ativado somente após o descolamento do FRP (Zhou <i>et al.</i> 2018); - A ancoragem aumenta significativamente a rigidez elástica à flexão e a ductilidade, particularmente em amostras de concreto de alta resistência (Chen <i>et al.</i> 2021).	- Desempenho a longo prazo sob condições ambientais, diferentes níveis de protensão do reforço e carga constante; - Testes com variações na taxa de reforço, taxa de aço, comprimento de aderência, pré-fissuração.
MF	- O aumento de resistência variou de -17% a 125%; - Neste sistema de ancoragem é indicado aplicar em FRP multidirecional, sendo que os unidirecional são suscetíveis a falhas por rasgamento ou rolamento devido a ligação direta do reforço com os fixadores (El-Maaddawy <i>et al.</i> 2013, Ebead, 2011, Lee <i>et al.</i> 2020); - Mesmo para FRP multidirecional é indicado que os conectores não se concentrem somente em regiões de maior tensão, mas sim distribuídos ao longo do comprimento do reforço;	- Desempenho a longo prazo sob carga constante; - Testes com variações no torque dos fixadores, níveis de pré-fissuração e corrosão da viga e taxa de aço; - Comparação do comportamento em concreto de baixa, média e alta resistência;
Gear-Gripd	- O aumento de resistência variou de 10% a 33%; - A combinação dos mecanismos de ancoragem com técnicas de colagem externa aumenta a ductilidade e reduz a fricção na ligação (Bengar e Shahmansouri, 2020); - As perdas de protensão observadas nos trabalhos são mínimas, com deslizamento máximo de 0,043.mm entre o reforço e a ancoragem durante 150 dias (Zhuo <i>et al.</i>, 2009).	- Desempenho a longo prazo sob condições ambientais, diferentes níveis de protensão do reforço e carga constante; - Comportamento sob carga cíclica; - Testes com variações no torque dos fixadores, níveis de e corrosão, pré-fissuração e taxa de aço da viga;
Self-Locking	- O aumento de resistência variou de 18% a 112%; - A combinação com técnicas de colagem prorroga a fissuração inicial e potencializa o desempenho do mecanismo (Zhou <i>et al.</i> 2023b, Zhou <i>et al.</i> 2018, Zhou <i>et al.</i> 2020a, Wang <i>et al.</i> 2024); - A exposição a cloreto aumentou significativamente a perda de protensão de 7% sem exposição para 40% com exposição (Wei <i>et al.</i> 2021); - A rigidez dos conectores dos mecanismos, afeta as tensões interfaciais e o descolamento do reforço (Zhou <i>et al.</i> 2023b); - A injeção de adesivo na ancoragem teve um efeito insignificante, indicando que o atrito por si só é suficiente para o travamento (Zhou <i>et al.</i> 2020a).	- Desempenho a longo prazo sob carga constante; - Comportamento sob carga cíclica; - Testes com variações no torque dos fixadores, pré-fissuração e taxa de aço da viga, comprimento de aderência; - Comparação entre os mecanismos;

2.5.2 Mecanismos baseados na ligação de aderência

O sistema CREAtE consiste na ancoragem das extremidades do reforço em furos que se iniciam na face inferior e se estendem até o núcleo da estrutura reforçada, após uma curva de transição esculpida diretamente no concreto ou pré-fabricada (WO2016005941A1). A fixação do FRP é estabelecida por meio de um agente adesivo. Este sistema tem sido aplicado em vigas de concreto armado reforçadas com CFRP não protendido (CHASTRE *et al.*, 2016; Azevedo *et al.*, 2022; WO2016005941A1), com avaliações de resistência ao fogo e comparação de desempenho com técnicas convencionais, como EBR e NSM.

No método EBROG, ranhuras são criadas na superfície tracionada do elemento reforçado, e preenchidas com adesivo para fixar o FRP ao concreto. Estudos

aplicaram essa técnica em vigas de concreto armado (Mostofinejad *et al.*, 2014; Mostofinejad e Moghaddas, 2014; Mostofinejad e Khozaei, 2015; Sabzi *et al.*, 2020; Abed e Sultan *et al.*, 2021), variando aspectos como a geometria das ranhuras (Mostofinejad e Khozaei, 2015), taxa de fibra (Mostofinejad *et al.*, 2014, Mostofinejad e Khozaei, 2015), taxa de aço (Mostofinejad e Moghaddas, 2014), resistência do concreto (Sabzi *et al.*, 2020), tipo de fibra e número de camadas (Abed e Sultan *et al.*, 2021).

Para este método apenas um modelo de dimensionamento foi desenvolvido (Moghaddas e Mostofinejad, 2019), além de ensaios localizados de aderência (Ghaleh e Mostofinejad, 2022; Moghaddas e Mostofinejad, 2019; Mostofinejad e Mahmoudabadi, 2010).

No sistema EBRIG, as ranhuras são preenchidas tanto pelo adesivo quanto pelo FRP. Estudos aplicaram essa técnica em vigas de concreto armado (Mostofinejad *et al.*, 2014). Esse método demonstra confiabilidade em aplicações com alta demanda de aderência, retardando a fissuração e o descolagem do FRP devido à maior área de contato com o concreto em relação ao EBROG. Para o EBRIG também foram realizados ensaios localizados de aderência (Mostofinejad e Shameli, 2013; Ghaleh e Mostofinejad, 2022).

O sistema Gradiente consiste no aquecimento segmentado do reforço, acelerando a cura da resina e liberando gradualmente a força de protensão. Existem diferentes formas ancoragem gradiente (Stoecklin e Meier, 2003; Michels *et al.*, 2013; Yang *et al.*, 2019). Estudos avaliaram o comportamento deste sistema em vigas reforçadas à flexão com CFRP protendido (Stoecklin e Meier, 2003; Aram *et al.*, 2008; Michels *et al.*, 2013; Yang *et al.*, 2019; Yang *et al.*, 2021), testando variáveis como cargas de protensão (Aram *et al.*, 2008; Motavalli *et al.*, 2011), Yang *et al.*, 2019), Nível de fissuração da viga Yang *et al.*, 2021), resistência do concreto (Michels *et al.*, 2013) e comparação com outros métodos de ancoragem (Stoecklin e Meier, 2003). Ensaios localizados analisaram os mecanismos de aderência (Michels *et al.*, 2012; Aram *et al.*, 2008). A Tabela 2.4 apresenta os principais insights e lacunas dos trabalhos.

Tabela 2.4 – Principais Insights e lacunas dos mecanismos baseados na ligação de aderência.

Mecanismos	Principais Insights	Principais Lacunas
CREatE	- O aumento de resistência variou de 75% a 113%; - Na comparação com métodos de reforço convencionais, como EBR e NSM o sistema de ancoragem CREatE apresentou melhor desempenho nos testes de flexão como comportamento mais dúctil e aumento da carga de ruptura (CHASTRE <i>et al.</i>, 2016 e Azevedo <i>et al.</i> 2022). Além de maior resistência ao fogo (Azevedo <i>et al.</i> 2022).	- Desempenho a longo prazo sob condições ambientais, e carga constante; - Comportamento sob carga cíclica; - Testes com variações de pré-fissuração e taxa de aço da viga, e taxa de reforço, tipo de resina e comprimento de aderência.
EBROG	- O aumento de resistência variou de 26% a 138%; - O padrão de ranhura longitudinal gera maior incremento de resistência entre os demais, com limitações sobre a profundidade e largura da ranhura (Mostofinejad e Mahmoudabadi, 2014); - Este mecanismo é mais eficaz em aplicações com taxa de reforço menores (Mostofinejad <i>et al.</i> 2014; Mostofinejad e Mhogadas, 2014); - Este método é mais eficiente quanto aplicado em vigas com concreto de alta resistência, uma vez que as ranhuras tornam o elemento suscetível à ruptura por delaminação do cobrimento de concreto (Sabzi <i>et al.</i> 2020).	- Desempenho a longo prazo sob condições ambientais, e carga constante; - Comportamento sob carga cíclica; - Resistência ao fogo; - Variar o Tipo de resina, pré-fissuração da viga, largura do FRP, comprimento de aderência,
EBRIG	- O aumento de resistência variou de 58% a 132%; - Essa ancoragem demonstra confiabilidade para aplicações onde a aderência é crítica, com maior capacidade de retardar a carga de fissuração e descolamento do FRP em comparação ao EBROG (Mostofinejad <i>et al.</i> 2014).	- Desempenho a longo prazo sob condições ambientais, e carga constante; - Comportamento sob carga cíclica; - Resistência ao fogo; - Vações do tipo de resina, pré-fissuração da viga, taxa de aço, taxa de fibra e comprimento de aderência,
Gradient	- O aumento de resistência variou de 6% a 411%; - Em vigas com o comprimento de ancoragem curtos, predominantemente em regiões de cisalhamento, o mecanismo é ineficaz devido as tensões localizadas ocasionando em rupturas prematuras (Aram <i>et al.</i>, 2008; Michels <i>et al.</i>, 2013).	- Desempenho a longo prazo sob condições ambientais, e carga constante; - Comportamento sob carga cíclica; - Resistência ao fogo; - Variações do tipo de resina, taxa de aço, taxa de fibra e comprimento de aderência.

2.5.3 Mecanismos de PRF baseados na fricção e atrito

As âncoras de PRF Spike são constituídas por múltiplas fibras, com uma extremidade agrupada em formato de pino e a outra dispersa em leque. Estudos investigaram seu desempenho em vigas de concreto armado reforçadas à flexão com CFRP não protendido (Smith *et al.*, 2013; Al-Atta *et al.*, 2022; Assad *et al.*, 2024), analisando variáveis como a inclinação e o posicionamento das âncoras (Smith *et al.*, 2013), largura do reforço (Smith *et al.*, 2013; Pudleiner *et al.*, 2019), número de camadas (Pudleiner *et al.*, 2019; Al-Atta *et al.*, 2022), diâmetros dos pinos (Al-Atta *et al.*, 2022), número de âncoras (Pudleiner *et al.*, 2019; Assad *et al.*, 2024) e tipo de resina (Al-Atta *et al.*, 2022).

Dois modelos de dimensionamento foram propostos (Llauradó *et al.*, 2017; Castillo *et al.*, 2019), além de estudos sobre os mecanismos de aderência por ensaios localizados (Pudleiner *et al.*, 2019; Dong *et al.*, 2023; Muciaccia *et al.*, 2022; Zhang e Smith, 2017; Llauradó *et al.*, 2017; Ozbakkaloglu *et al.*, 2017; Castillo *et al.*, 2019; Alotaibi, 2024).

No sistema PRF stitching uma ranhura transversal é criada na superfície da viga, permitindo que as extremidades do FRP EB sejam ancoradas com pinos de FRP na superfície interna da ranhura. Esse procedimento reduz os esforços de ancoragem no cobrimento de concreto. Eslami *et al.*, (2019) testaram esse método em vigas reforçadas à flexão com CFRP não protendido, variando o número de âncoras e hibridização com o sistema FRP-Spike.

No sistema PRF U-Wrap, um laminado de FRP colado externamente é confinado por tiras de PRF envolvidas e coladas nas faces da seção transversal da viga. Esse sistema foi aplicado em vigas de concreto armado reforçadas à flexão com CFRP não protendido (Smith e Tang, 2003; Buyle-Bodin e David, 2004; Hasnat *et al.*, 2016; Fu *et al.*, 2017; Fu *et al.*, 2018; Mostofinejad *et al.*, 2019; Zaki *et al.*, 2024).

As variáveis analisadas incluíram o comprimento de aderência (Smith e Tang, 2003), largura do reforço (Buyle-bodin e David, 2004; Hasnat *et al.*, 2016; Mostofinejad *et al.*, 2019), inclinação da ancoragem (Buyle-bodin e David, 2004; Fu *et al.*, 2017; Fu *et al.*, 2018), número e espaçamento das âncoras (Zaki *et al.*, 2024). Dois modelos de dimensionamento foram sugeridos (Smith e Tang, 2003; Hasnat *et al.*, 2016). Além disso, estudos adicionais abordaram ensaios de aderência (Ceroni *et al.*, 2010; Lee *et al.*, 2016; Yalim *et al.*, 2008; Zaki *et al.*, 2024).

Zaki e Rasheed (2020) testaram dois tipos do sistema GFRP-Anchor. O Primeiro utilizou barras de GFRP inseridas em ranhuras ao longo das faces laterais das vigas, próximas à armadura longitudinal primária. O segundo empregou remendos de mantas de GFRP distribuídos ao longo dos lados de tensão das vigas, variando o número de camadas de PRF. A Tabela 2.5 apresenta os principais insights e lacunas dos trabalhos que apresentam sistemas de ancoragem com PRF baseado na fricção e atrito.

Tabela 2.5 – Principais Insights e lacunas dos mecanismos de PRF.

lecanismos	Principais Insights	Principais Lacunas
FRP-Spike	- O aumento de resistência variou de 32% a 171%; - As âncoras com maior teor de fibra, com diâmetro entre 14mm e 20 mm [Assad <i>et al.</i> (2024), Pudleiner <i>et al.</i> (2019), Smith <i>et al.</i> 2013] e mais numerosas [Pudleiner <i>et al.</i> (2019), Smith <i>et al.</i> 2013] proporcionaram comportamento estrutural mais dúctil com melhor controle no modo de ruptura e incremento de resistência em comparação às âncoras com menor teor de fibra e menos numerosas, que geralmente resultam em falhas prematuras devido a concentração excessiva de esforços [Al-atta <i>et al.</i>, (2022)]; - A inclinação dos ângulos dos pinos de ancoragem influenciou positivamente a carga máxima [Smith <i>et al.</i> 2013]; - hibridizações com outros mecanismos demonstra opção promissora, potencializando os efeitos por sinergia [Al-Atta <i>et al.</i> (2022), Eslami <i>et al.</i>, (2019)].	- Desempenho a longo prazo sob condições ambientais, e carga constante; - Resistência ao fogo; - Variações da taxa de aço, e comprimento de aderência.

Tabela 2.5 – Principais Insights e lacunas dos mecanismos de PRF.

lecanismos	Principais Insights	Principais Lacunas
FRP U-Wrap	- O aumento de resistência variou de 41% a 482%; - As configurações de aplicações com tiras inclinadas em 45° mostraram-se mais eficazes que as demais inclinações, com modo de falha mais dúctil [Buyle-bodin e David (2004), Fu et al., (2017), Fu et al., (2018)], geralmente associado ao esmagamento do concreto em vez da descolagem prematura do reforço; - Uma limitação pouco discutida é sobre a interação entre a âncora e o reforço. No entanto observa-se que com a transferência de tensões garantida há melhoria significativa no desempenho da ancoragem, com comportamento mais dúctil e maior incremento de resistência [Mostofinejad et al. 2019].	- Desempenho a longo prazo sob condições ambientais, e carga constante; - Comportamento sob carga cíclica; - Resistência ao fogo; - Variações do tipo de resina, taxa de aço.
FRP Stitching	- O aumento de resistência variou de 15% a 53%; - As ancoragens posicionadas dentro das ranhuras permitem que os esforços sejam reduzidos no cobrimento de concreto; - Hibridizações com o mecanismo FRP Spike, potencializou os efeitos de incremento de resistência e ductilidade [Eslami et al., (2019)].	- Desempenho a longo prazo sob condições ambientais e carga constante; - Comportamento sob carga cíclica; - Resistência ao fogo; - Testes com variações de níveis de corrosão, pré-fissuração, taxa de aço da viga, taxa de fibra do reforço e teor de fibra da ancoragem; - Desempenho individual da ancora e da ranhura.
GFRP Anchor	- O aumento de resistência variou de 60% a 178%; - A técnica com barras de GFRP nas laterais geraram maior incremento de resistência em relação a técnica com mantas de GFRP. [Zaki e Rasheed (2020)].	- Desempenho a longo prazo sob condições ambientais e carga constante; - Comportamento sob carga cíclica; - Resistência ao fogo; - Testes com variações de níveis de corrosão, pré-fissuração, taxa de aço da viga, taxa de reforço.

2.6 Modos de ruptura de vigas com sistema de ancoragem

No sistema MF, as falhas mais comuns foram associadas à ruptura da ancoragem do conector ou ao rasgamento do compósito (El-Maaddawy et al., 2013; Ebead, 2011), conforme Figuras 2.11c e 2.11d. No sistema Self-locking, os modos de ruptura foram distribuídos entre esmagamento do concreto (38,46%), ruptura do FRP (30,76%) e descolamento do reforço (30,76%).

No HB, predominou a ruptura do FRP, responsável por 56,09% das vigas (Wu et al., 2011; Chen et al., 2019; Mostafa; Razaqpur, 2013; Wu; Huang, 2008; Guan et al., 2011). Outros modos incluíram descolamento do reforço (17,07%) (Mostafa; Razaqpur, 2013; Wu et al., 2010), 14,63% falhas nas ancoragens como pryout, breakout e arrancamento (Figura 2.6a) (Chen et al., 2019; Wu; Huang, 2008), delaminação do cobrimento de concreto (7,31%) (Wu et al., 2010) e cisalhamento (4,87%) (Guan et al., 2011).

Em relação ao H-Type, 22,22% das falhas ocorreram principalmente por escoamento da haste de ancoragem (Figura 2.11e) (Chen et al., 2021; Zhou et al., 2018) e esmagamento do concreto (11,11%) (Chen et al., 2021). O sistema Gear-Gripd apresentou modos de ruptura por descolamento do reforço (Bengar;

Shahmansouri, 2020), esmagamento do concreto (Bengar; Shahmansouri, 2020; Zhang; Shang, 2017) e ruptura do PRF (Zhang; Shang, 2017).

No sistema CREAtE houveram falhas por descolamento e ruptura do PRF (Chastre *et al.*, 2016; Azevedo *et al.*, 2022). No sistema EBROG, os principais modos de ruptura foram delaminação do cobrimento de concreto (53,57%) (Sabzi *et al.*, 2020; Abed e Sultan, 2021; Mostofinejad e Khozaei, 2015), ruptura do FRP (28,57%) (Mostofinejad *et al.*, 2014; Abed e Sultan, 2021; Mostofinejad e Khozaei, 2015; Mostofinejad e Moghaddas, 2014), descolamento do reforço (14,28%) (Mostofinejad *et al.*, 2014; Sabzi *et al.*, 2020) e esmagamento do concreto (3,57%) (Mostofinejad e Moghaddas, 2014).

O sistema EBRIG apresentou modos de ruptura por delaminação do cobrimento e ruptura do FRP. Já o sistema Gradiente apresentou 41,67% de ruptura do FRP (Michels *et al.*, 2013), 33,33% por descolamento do FRP (Yang *et al.*, 2021; Stoecklin e Meier, 2003) e 25% por delaminação do cobrimento de concreto (Aram *et al.*, 2008)

Nas vigas com FRP Spike ocorreu principalmente descolamento do reforço (31,25%) (Al-Atta *et al.*, 2022; Smith *et al.*, 2013; Assad *et al.*, 2024), 25% por falhas na ancoragem por arrancamento e/ou ruptura (Figura 2.11b) (Al-Atta *et al.*, 2022; Smith *et al.*, 2013; Assad *et al.*, 2024; Ekenel *et al.*, 2006), ruptura do reforço (21,88%) (Al-Atta *et al.*, 2022; Smith *et al.*, 2013) e esmagamento do concreto (21,88%) (Ekenel *et al.*, 2006; Abdalla *et al.*, 2023).

O sistema FRP U-Wrap apresentou falhas variadas: 31,67% por falhas na ancoragem devido a descolamento e/ou ruptura (Smith e Teng, 2003; Hasnat *et al.*, 2016; Zaki *et al.*, 2024; Abdalla *et al.*, 2023), conforme mostra a Figura 2.11f, 25% por delaminação do cobrimento (Smith e Teng, 2003; Fu *et al.*, 2017, 2018; Hasnat *et al.*, 2016), 21,67% por ruptura do reforço (Smith e Teng, 2003; Fu *et al.*, 2018), 15% por descolamento do reforço (Smith e Teng, 2003; Fu *et al.*, 2017; Bodin e David, 2004; Mostofinejad *et al.*, 2019), 5% por esmagamento do concreto (Fu *et al.*, 2018; Smith e Teng, 2003) e 1,67% por cisalhamento (Hasnat *et al.*, 2016).

No sistema FRP Stitching, todas as vigas romperam por ruptura do FRP, e um modelo de dimensionamento foi proposto (autor não especificado). No sistema GFRP-Anchor, os modos de ruptura foram 50% por descolamento do reforço, 37,5% por esmagamento do concreto e 12,5% por ruptura do FRP.

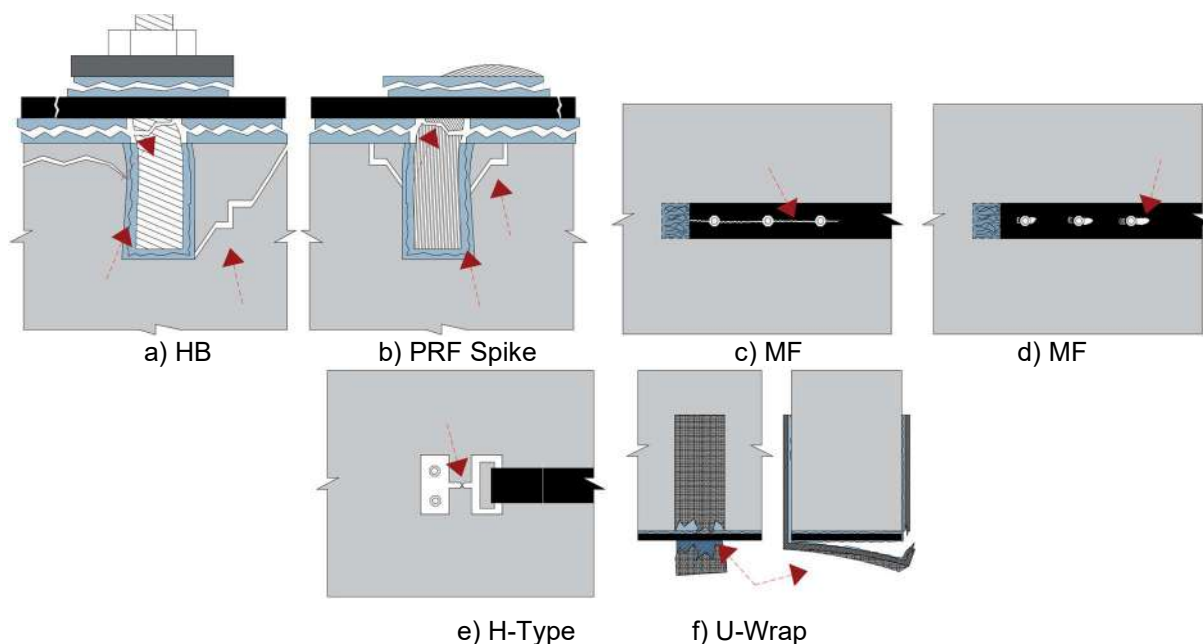


Figura 2.11 - Novos modos de ruptura.

2.7 Vigas reforçadas com PRFC e sistema de ancoragem HB.

2.7.1 Wu e Huang (2008)

Este trabalho foi o primeiro a propor o sistema de ancoragem HB-FRP, e seu objetivo limitou-se a demonstrar a eficácia da ancoragem no aumento da relação de vínculo entre o reforço e o elemento reforçado. Para isso, foram feitos 4 espécimes, todos com as mesmas características geométricas, incluindo um de referência, que foi reforçado pelo método EBR (S1), e os demais utilizaram ancoragem distribuída ao longo do comprimento do reforço (S2, S3 e S4) com variações na taxa de reforço. Observa-se o modelo experimental na Figura 2.12. Nos espécimes com maior taxa de reforço, adotou-se uma largura maior para evitar falha por esmagamento.

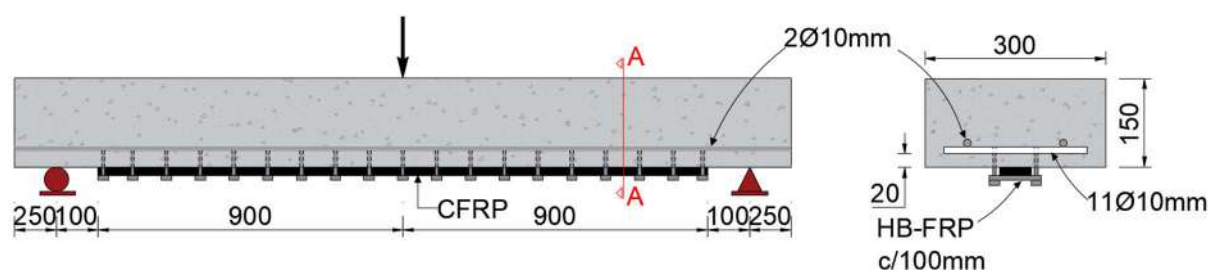


Figura 2.12 - Ensaio de flexão realizado por Wu e Huang (2008) (mm).

A Tabela 2.6 apresenta nesta mesma ordem: a identificação das vigas, as

características geométricas, o número de faixas de reforço usadas no método *Wet-Layup*, o espaçamento das ancoragens, a força de ruptura (P_u), a flecha no meio do vão na carga última (δ_u) e os modos de ruptura observados. A Figura 2.13 mostra a sintetização dos modos de ruptura das vigas com ancoragem.

Tabela 2.6 - Resultados obtidos nos ensaios realizados por Wu e Huang, (2008).

	Dimensões (mm)			Camadas de CFRP	Espaçamento das ancoragens(mm)	P_u (KN)	δ_u (mm)	Modos de Ruptura
	B_w	h	l					
S1	300	150	2500	2	-	19,08	13,90	DB
S2				2	100	39,70	39,70	F.R
S3				4	100	47,60	47,70	F.R
S4				6	100	50,48	50,48	A.F



a) Ruptura do FRP (S2)



b) Ruptura do FRP (S3)



c) Arrancamento do HBF-RP (S4)

Figura 2.13 - Modos de ruptura observados por Wu e Huang, (2008).

Todas as vigas romperam com uma carga maior que a ruptura da viga de referência. Nesse sentido, os autores concluíram que a ligação interfacial nos elementos reforçados com o método HB-FRP aumentou 7,5 vezes a resistencia de vigas de concreto armado e foi maior que o incremento de vigas reforçadas com EB-FRP. A viga S1 rompeu com o descolamento do FRP (DB), as vigas S2 e S4 romperam com a ruptura do FRP (FR) e a Viga S4 rompeu com a falha na ancoragem (AF).

2.7.2 Wu et al., (2010)

Neste trabalho foram moldadas nove vigas, destas, duas serviram de referência e foram reforçadas com o método EBR, sendo uma para cada grupo de vigas. A Figura 2.14 apresenta o programa experimental realizado. Todas as vigas possuem o mesmo comprimento (2800mm) e tiveram a mesma taxa de reforço, a diferença entre os grupos está nas dimensões da seção transversal e no tipo de ensaio realizado, de modo que o grupo “A” (Figura 2.14a) corresponde às cinco vigas com

seção de 180mm x 350mm e foram submetidas ao ensaio de três pontos, enquanto as quatro vigas do grupo “B” (Figura 2.14b) possuem seção de 350mm x 180mm e foram submetidas ao ensaio de quatro pontos, exceto a viga HB9-100b-T, que foi submetida ao mesmo sistema de ensaio do grupo A.

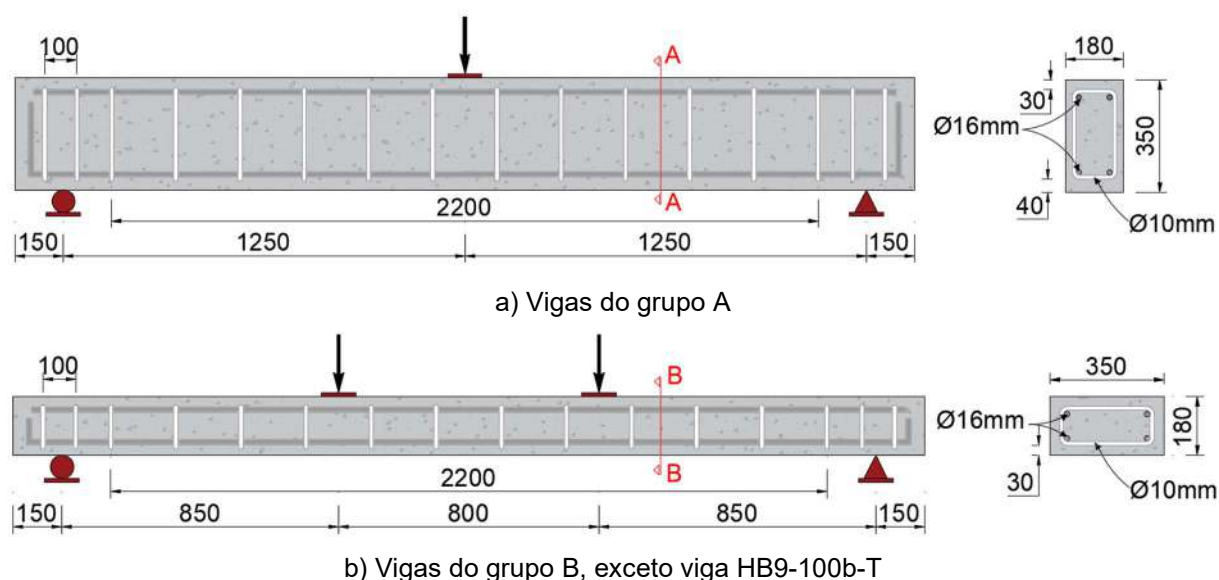


Figura 2.14 - Ensaios de flexão realizado por Wu et al., (2010) (mm).

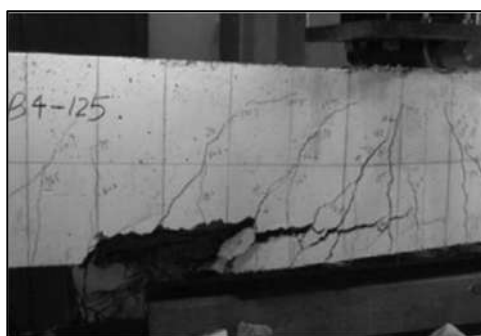
A Tabela 2.7 ilustra a identificação das vigas, as variáveis adotadas, os resultados de carga e deflexão última, e os modos de ruptura observados em cada ensaio. Nesse sentido, três variáveis foram observadas nesse trabalho. A primeira é referente as dimensões das vigas.

A segunda é referente ao espaçamento das ancoragens, em que “a” corresponde à distância entre a primeira ancoragem e o meio do vão, “b” corresponde ao espaçamento das ancoragens dentro do vão de flexão e “c” corresponde ao espaçamento dentro do vão de cisalhamento.

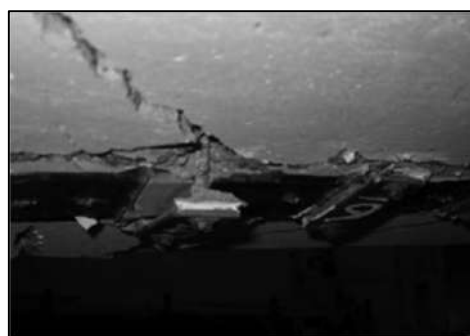
E a Terceira variável diz respeito ao comprimento do reforço ancorado, que corresponde ao trecho específico no vão de cisalhamento. Os resultados observados neste estudo reafirmaram a eficácia da pesquisa anterior, considerando que houve o aumento na resistência em todas as vigas, quando comparadas com suas referências. Os modos de ruptura observados podem ser observados na Figura 2.15.

Tabela 2.7 - Descrição dos ensaios realizados por Wu *et al.*, (2010).

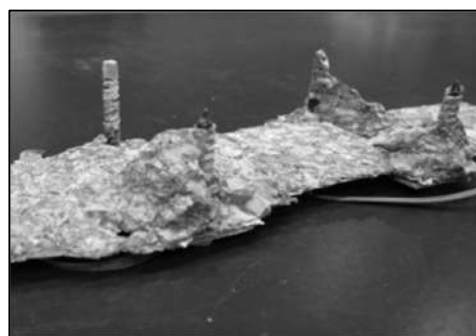
Viga	Seção		Espaçamento das ancoragens (mm)			Comprimento de ancoragem (mm)	P_u (KN)	δ_u (mm)	Modos de Ruptura
	B_w	H	a	b	c				
EB1-a-T			-	-	-	1125	108,32	12,4	DB
HB2-200a-T			100	-	200	1125	111,52	17,0	IF
HB3-150a-T	180	350	75	-	150	1125	149,92	32,7	CS
HB4-125a-T			62,5	-	125	1125	145,44	32,5	CS
HB5-100a-T			50	-	100	1125	158,24	37,6	CS
HB6-200b-F			75	200	200	725	96,00	49,7	AF
HB7-100b-F			75	200	100	725	114,35	67,2	AF
EB8-b-F	350	180	-	-	-	725	69,88	29,4	DB
HB9-100b-T			75	-	100	1125	144,47	72,6	AF



a) Delaminação do cobrimento (HB4-125a-T)



b) Arrancamento da ancoragem (HB9-100b-T)



c) Faixa de CFRP após a descolagem (HB9-100b-T)

Figura 2.15- Modos de ruptura observados por Wu *et al.*, (2010).

As vigas de referência EB1 e EB8 romperam com a descolagem do FRP (DB). A falha observada na Viga HB2 foi por deslizamento do FRP na interface do concreto (IF), embora este resultado tenha sido descartado, vale a pena destacar a atenção que deve ser dada a preparação da superfície, uma vez que, neste caso foi a causa da falha. As demais vigas do grupo A romperam com a delaminação da cobertura de concreto (CS) conforme pode ser observado na Figura 2.10a, evidenciando que a resistência total da ligação compreende a resistência da ligação adesiva e o adicional

fornecido pela ancoragem. Como o modo de ruptura CS não é desejável, foram introduzidos os testes do grupo B, que possuem maior área de cobrimento e consequentemente uma maior resistência à falha por delaminação, note que nestas vigas houve a falha na ancoragem (Figura 2.10b), e em algumas partes do reforço o concreto foi puxado pelo conector, evidenciando falha de cone (Figura 2.10c).

2.7.3 Wu *et al.*, (2011)

Neste trabalho foram realizados ensaios de pull-out para determinar o torque e o diâmetro ideal para os conectores roscáveis. As variáveis analisadas foram barras roscadas de aço carbono e inoxidável com 8 e 6mm de diâmetro, os torques variaram de 10N.m a 50N.m. As características do ensaio localizado podem ser observadas na Figura 2.16. Os autores chegaram à conclusão de que o conector ideal para aquela aplicação foi o de aço carbono com 8mm de diâmetro, com um torque de 15N.m.

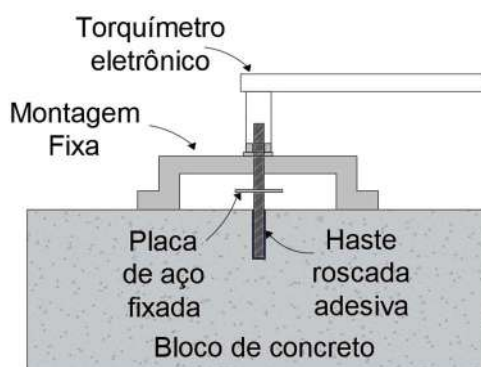


Figura 2.16 - Ensaio Pull-Out. Traduzido de Wu *et al.*, (2011).

Além disso foram moldadas 11 vigas com o objetivo de avaliar a eficácia do método HB-FRP. A viga C1 foi reforçada pelo método EBR e serviu como referência para as demais reforçadas e ancoradas com HB-FRP distribuído ao longo do reforço. As vigas foram divididas em duas categorias (C e D) em função das dimensões dos espécimes. Observa-se as características dos ensaios e dos espécimes, na Figura 2.17, assim como, as variáveis consideradas e os resultados obtidos no programa experimental, na Tabela 2.8.

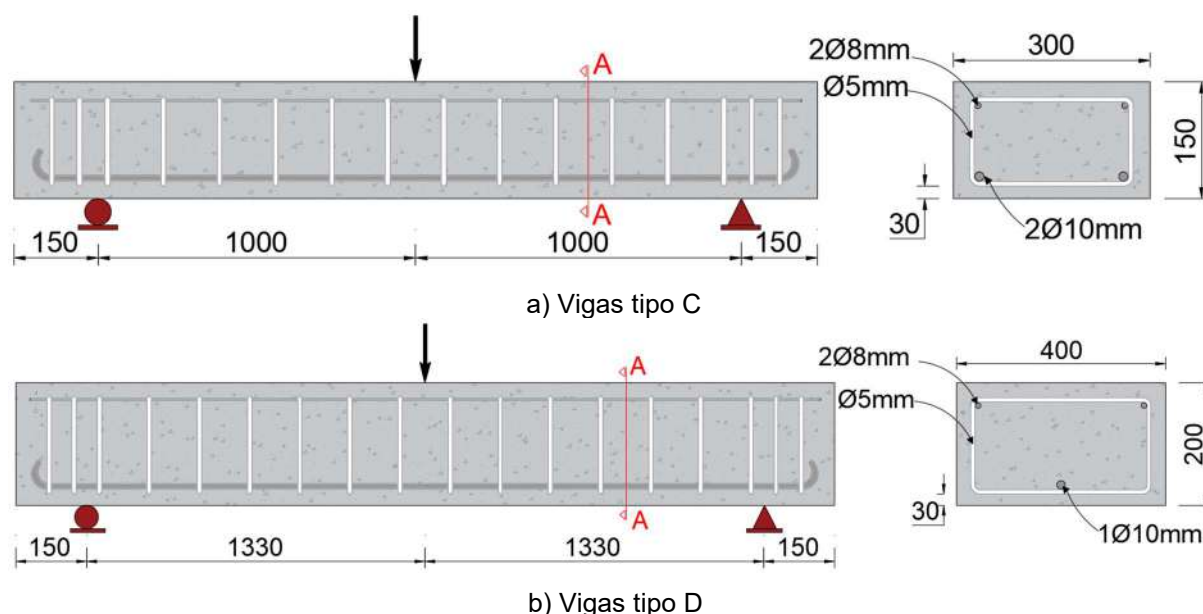


Figura 2.17 - Ensaio de flexão de três pontos realizados por Wu *et al.*, (2011) (mm).

Tabela 2.8 - Resultados obtidos nos ensaios realizados por Wu *et al.*, (2011).

Vigas	Dimensões (mm)			Faixas de FRP	Espaçamento das ancoragens (mm)	P_u (KN)	δ_u (mm)	Modos de Ruptura
	B_w	h	L					
C1-Ref				2	-	19,14	16,84	DB
C2				2	100	26,63	20,57	F.R
C3				2	150	29,81	21,37	F.R
C4				3	100	32,82	24,76	F.R
C5	300	150	2300	3	150	30,05	24,03	F.R
C6				3	200	34,62	33,43	F.R
C7				4	100	39,26	28,92	F.R
C8				4	150	41,05	32,10	F.R
C9				4	200	42,76	32,99	F.R
D1	400	200	2960	6	100	53,27	40,57	F.R
D2				7	100	64,02	48,65	F.R

O mecanismo de ancoragem apresentou capacidade resistente ao deslizamento, inclusive em vigas com maiores taxas de reforço. O conector permaneceu no regime elástico. Em comparação com a viga de referência, as vigas reforçadas tiveram uma distribuição de deformação mais uniforme nas faixas de FRP, evidenciando que o sistema de ancoragem permite a transmissão de uma carga maior em relação a referência. A Ruptura da viga de referência ocorreu pela descolagem do FRP. Todas as vigas com ancoragem romperam com uma carga superior à de referência e falharam com a Ruptura do FRP, conforme mostra a Figura 2.18.



Figura 2.18 - Falha por Ruptura do FRP. Wu *et al.*, (2011).

2.7.4 Guan *et al.*, (2011)

Foram ensaiadas nove vigas com seção transversal de 150mm x 250mm, comprimento de 2700mm e mesma taxa de reforço. As características dos ensaios realizados são mostrados na Figura 2.19. A viga BM2, BM4, BM6 e BM8 foram reforçadas pelo método EBR e serviram como referência para as vigas BM3, BM5, BM7 E BM9, respectivamente, estas que foram reforçadas pelo método HB-FRP. A viga BM1 não foi reforçada e serviu como referência para determinar o nível de pré-fissuração das vigas reforçadas, esta foi a variável adotada nesta pesquisa.

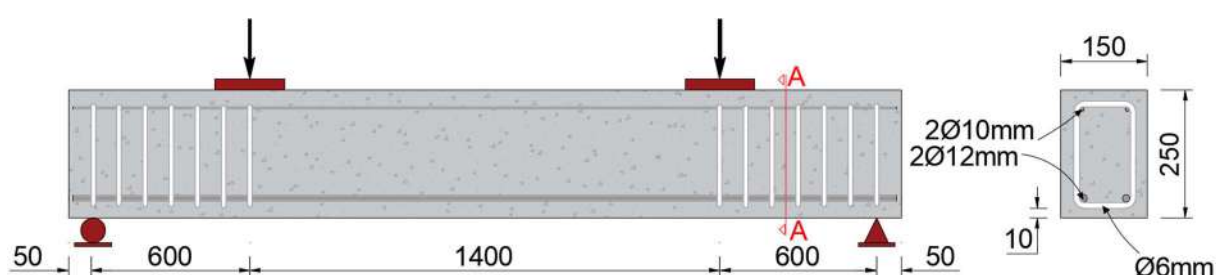


Figura 2.19 - Ensaio de flexão de quatro pontos realizados por Guan *et al.*, (2011) (mm).

A Tabela 2.9 apresenta a identificação das vigas, as características geométricas a variável adotada e os resultados obtidos. Todas as vigas reforçadas tiveram um aumento na capacidade resistente de flexão, de modo que a pré-fissuração tem pouco efeito na capacidade resistente das vigas, diferentemente do observado nas vigas de referência. Além disso, as ancoragens evitaram a falha por descolamento do PRF observadas em todas as vigas reforçadas pelo método EBR.

Tabela 2.9 - Resultados obtidos nos ensaios realizados por Guan *et al.*, (2011).

Viga	Seção		Pré-fissuração	Espaçamento das ancoragens (mm)	P_u (KN)	δ_u (mm)	Modos de Ruptura
	B_w	h					
BM1			Intacta	-	96,4	59,90	-
BM2-EB			Intacta	160	118,8	17,64	DB
BM3-HB			Intacta	160	133,2	44,59	SR
BM4-EB			50%	160	117,2	21,95	DB
BM5-HB	150	250	50%	160	139,4	39,44	SR
BM6-EB			70%	160	96,4	23,05	DB
BM7-HB			70%	160	139,0	39,07	FR
BM8-EB			90%	160	95,8	14,16	DB
BM9-HB			90%	160	138,1	46,23	FR

Os modos de ruptura observados nas vigas reforçadas com o método HB-FRP estão mostrados na Figura 2.20. O modo de falha da viga BM3 e BM5 foi a ruptura por cisalhamento por compressão oblíqua (SR). Nas vigas BM7 e BM9 ocorreu a ruptura do FRP (FR). Um comportamento interessante relatado pelos autores, é que antes das rupturas primeiro ocorre a remoção gradual das ancoragens.



a) Ruptura por cisalhamento (BM3)



b) Ruptura por cisalhamento (BM5)



c) Ruptura do FRP (BM7)



d) Ruptura do FRP (BM9)

Figura 2.20 - Modos de ruptura observados por Guan *et al.*, (2011).

2.7.5 Chen *et al.*, (2019)

As variáveis adotadas nesta pesquisa foram a taxa de reforço e o torque aplicado nos conectores da ancoragem. Para isto foram testadas 10 vigas com geometria e taxas de armaduras idênticas, e foram divididas em dois grupos de 5

vigas, o primeiro grupo recebeu uma camada de CFRP e variou o torque em 3N.m, 6N.m e 12N.m, nas vigas reforçadas com o método HB-FRP. O segundo grupo recebeu quatro faixas de CFRP e variou o torque em 10N.m, 15N.m e 20N.m. Ambos os grupos contaram com uma viga sem reforço e uma viga reforçada pelo método EBR, que serviram de referência para os demais ensaios. A Figura 2.21 mostra as características dos ensaios realizados e a Tabela 2.10 apresenta a identificação das vigas ensaiadas, as dimensões da seção transversal, as variáveis adotadas, os resultados de carga e deflexão, e os modos de ruptura observados.

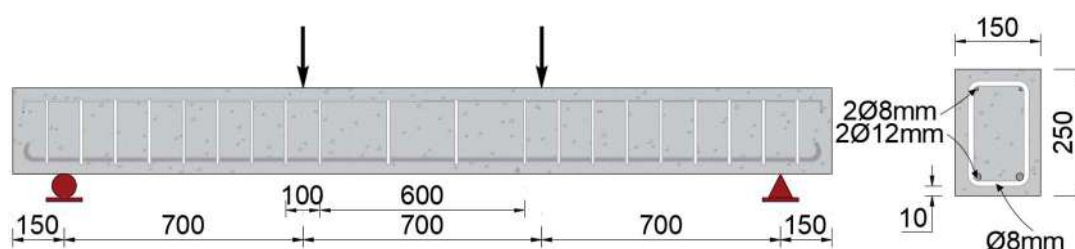


Figura 2.21 - Ensaios de flexão de quatro pontos realizados por Chen *et al.*, (2019) (mm).

Tabela 2.10 - Resultados obtidos nos ensaios realizados por Chen *et al.*, (2019).

Viga	Seção		Número de faixas	Torque nos conectores (N.m)	P_u (KN)	δ_u (mm)	Modos de Ruptura
	B_w	h					
CB1	150	250	0	-	57,66	15,31	CC
EB-1-0			1	0	62,10	19,87	DB
HB-1-3			1	3	64,88	26,99	FR
HB-1-6			1	6	70,16	26,02	FR
HB-1-12			1	12	72,35	23,76	FR
CB2			0	-	62,45	22,76	CC
EB-4-0			4	0	72,47	15,39	DB
HB-4-10			4	10	80,38	21,90	AF
HB-4-15			4	15	100,23	23,11	AF
HB-4-20			4	20	109,62	26,66	AF

Com base nos resultados apresentados os autores concluíram que a ancoragem proporcionou o aumento na resistência e melhor desempenho dúctil. A taxa de reforço aumenta a rigidez à flexão dentro da faixa elástica quando o modo de falha é a ruptura do FRP, e muda o modo de falha para o desprendimento da ancoragem. O aumento no confinamento aumenta a capacidade de carga quando o modo de ruptura é o desprendimento da ancoragem, e muda o modo de falha para a ruptura do FRP. A Figura 2.22 ilustra os modos de ruptura observados nas vigas

reforçadas com HB-FRP. Em ambos os grupos as vigas sem reforço (CB) e as vigas reforçadas com EBR (EB) romperam com o esmagamento do concreto e pelo descolamento do FRP induzido por fissuras intermediárias, respectivamente. As vigas com uma camada de FRP falharam com a ruptura do FRP e as vigas com maior taxa de reforço romperam com o desprendimento da ancoragem.



a) Falha na ancoragem



b) Ruptura do FRP

Figura 2.22 - Modos de ruptura observados por Chen *et al.*, (2019).

2.8 Banco de dados

O banco de dados incluiu 312 ensaios experimentais em vigas de concreto armado reforçadas à flexão com CFRP e sistemas de ancoragem. O desempenho desses sistemas no aumento da resistência foi avaliado pela relação M/M_{Ref} , onde M é o momento resistente das vigas reforçadas com ancoragem e M_{Ref} é o momento resistente das vigas de referência sem reforço. Para avaliar o incremento de ductilidade, utilizou-se a relação δ/δ_{Ref} , sendo δ a deflexão no meio do vão da viga reforçadas, e δ_{Ref} a deflexão nas viga sem reforço. A Tabela 2.11 apresenta as características geométricas e propriedades dos materiais das vigas, além das variáveis analisadas e os modo de ruptura.

Tabela 2.11 – Banco de dados

Sistema	Referências	Variáveis	d (mm)	ρ_y (%)	ρ_r (%)	f_c (MPa)	Modo de Ruptura*
CREatE	Chastre et al., 2016	Técnica de reforço	268.0-283.0	0.80-0.84	0.12-0.12	18.5-24.1	FR
	Azevedo et al., 2024	Temperatura	86.0	0.39	0.10	29.5	FR
EBROG	Mostofinejad et al., 2014	Taxa de fibra (ρ_f)	118.0	0.71	0.07-0.21	35.4-38.4	FR, DB
	Mostofinejad e Moghaddas, 2014	Taxa de aço (ρ_v)	106.0-108.0	0.39-1.78	0.03-0.07	41.4-45.1	FR, CC
	Mostofinejad e Khozaei, 2015	Tipo de ranhura e ρ_f	98.0	0.85	0.07-0.18	36.0	FR, CS
	Sabzi et al., 2020	f_c , Arranjo do aço	251.0-255.0	1.21	0.04	25.0-50.0	DB, CS
EBRIG	Abed et al., 2021	Tipo de PRFs e L_f	128.0	0.65	0.07-0.67	29.3-31.1	FR, CS
	Mostofinejad et al., 2014	ρ_f	118.0	0.71	0.07-0.21	35.5-37.7	FR, CS
FRP-Spike	Smith et al., 2013	Arranjo do aço	105.0	0.37	0.22-0.44	39.9-45.6	FR, DB, AF
	Pudleiner et al., 2019	Tipo de ancoragem	115.7	0.80	1.54	27.6	CC, AF
	Al-Atta et al., 2022	po de PRFs e Resina, L_f	147.0	0.46	0.05-0.28	55.5	FR, DB, AF
	Abdalla et al., 2023	Diâmetro do conector e NA	157.0	0.58	0.31	44.0	DB, AF
titching	Assad et al., 2024	Número de ancoragem (NA)	202.0	0.65	0.07	44.6	CS
	Eslami et al., 2019	NA	202.0	0.45	0.03-0.11	30.7	FR
FRP U-Wrap	Smith e Tang, 2003	l_e	204.0-206.0	0.50-0.51	0.60-0.73	39.4-60.7	FR, DB, CS
	Buyle-Bodin e David, 2004	B_f e ângulo da ancoragem	267.0	0.77	0.53	40.0	DB
	Hasnat et al., 2016	Posição da ancoragem, B_f e e_f	161.0	0.42	0.40	47.5-48.3	AF, CS, S
	Fu et al., 2017	Ângulo da ancoragem	506.0	0.26	0.02-0.03	50.4-55.2	DB, CS
	Fu et al., 2018	h_d e ângulo da ancoragem	407.0	0.28	0.11-0.44	45.3	FR, CC, CS
	Mostofinejad et al., 2019	h_d , B_f , sistema de ancoragem	115.0	1.14	0.21-0.32	28.0	FR, DB
	Abdalla et al., 2023	NA e S_d	277.0	0.96	0.67	30.5	AF
	Zaki et al., 2024	Tipo de ancoragem	202.0	0.65	0.07	44.6	AF
Gear-gripd	Zhuo et al., 2009	Tipo de ancoragem	186.0	1.44	0.19	73.2-75.9	DB, CC
	Zhang e Shang, 2017a	Tipo de ancoragem	354.0	0.43	0.05	28.9-33.2	FR, CC
	Bengar e Shahmansouri, 2020	Tipo de ancoragem	332.5	1.49	0.02	25.0	NR*
Gradient	Michels et al., 2013	Tipo de ancoragem	NR*	NR*	0.11	NR*	DB
	Aram et al., 2008	Carga de protensão	112.0	0.81	0.16	47.1-55.1	CS
	Yang et al., 2021	f_c	188.0	0.19	0.05	54.0-69.4	FR
	Stoecklin e Meier, 2003	Nível de fissuração	220.0	0.61	0.19	51.1	DB
FRP Anchor	Zaki et al., 2020	L_f	255.5	1.04	0.38	38.0	FR, DB, CC
H-Type	Chen et al., 2021	Área da haste deformável	222.0	0.68	0.04	20.0	FR, AF
	Zhou et al., 2018	Nível de fissuração, f_c	432.0	1.06	0.08	22.7	FR, CC, AF
	Wu et al., 2011	L_f	115.0	0.45	0.03-0.11	58.0	FR, AF
HB-FRP	Chen et al., 2019	l_e , Posição da ancoragem	132.0-292.0	0.76-0.87	0.08	44.6-57.1	AF, DB, CS
	Mostafa e Razaqpur, 2013a	L_f , Posição da ancoragem	110.0-160.0	0.12-0.47	0.03-0.74	66.0	FR
	Wu e Huang, 2008	Nível de fissuração	228.0	0.66	0.053	50.4	FR, S
	Guan et al., 2011	NA, S_d	357.0	0.67	0.05-0.11	55.0	FR, DB
	Wu et al., 2010	e_f e Torque no conector	211.0	0.71	0.03-0.12	20.0-31.7	FR, AF
	Lamanna et al., 2004	e_f e NA	242.5	1.33	0.35	35.3	DB, CC
MF	Bank e Arora, 2007	Tipo de conector	463.7	0.16	0.25-0.38	42.0	CC
	Sena-Cruz et al., 2012	Tipo de carregamento	260.0	0.45	0.41	53.1	CC
	Lee et al., 2009	NA	98.0	0.51	1.08	28.8	CC
	El-Maaddawy et al., 2013	NA, l_e	101.0-110.0	0.57-1.59	0.87	36.0-42.0	DB, AF
	Ebead, 2011	Nível de corrosão, B_f , l_e	108.0	0.44	0.51-2.03	32.0	AF
	El-Maaddawy et al., 2014	Nível de corrosão, l_e	218.0	0.17	0.47	30.5	CC
	Zhou et al., 2020a	B_f	257.0	0.59-0.96	0.02-0.04	20.1	DB, CC
	Wei et al., 2021	B_f	255.0	0.59	0.22	36.0	DB, CC
Self-Locking	Zhuo et al., 2023	L_f	251.0	0.64	0.02-0.04	35.6	FR, CC
	Zhuo et al., 2020b	Tipo de ancoragem	251.0	0.96	0.02	46.7	FR
	Wang et al., 2024	B_f	201.8	0.61	0.04	33.8	FR, CC
	Yang et al., 2021	Técnica de preparação da superfície	221.0	0.91	0.19	51.1	DB
	He et al., 2023	L_f	261.0	1.16	0.06	42.3	FR, DB, CC
	Zhou et al., 2018	Nível de corrosão e protensão	252.0	0.60	0.22	36.0	FR, CC

*Obs. FR= FRP ruptura; DB= decolamento; CC= esmagamento do concreto S = cisalhamento; AF= Falha na ancoragem; CS= delaminação.

2.9 Análise do incremento de resistência

A Figura 2.23 apresenta o incremento de resistência em função da taxa de fibra dos grupos de mecanismos de ancoragem. O eixo x representa a taxa de fibra (ρ_f) e o eixo y o incremento de resistência ($M/M_{Ref}-1$). A Figura 2.23a exibe a análise

das ancoragens de aço. Os marcadores vermelhos representam o sistema Self-Locking; azul, HB-FRP; laranja, H-Type; verde, Gear-Gripd; e amarelo, MF. Os valores máximos de resistência foram de 112% (Yang *et al.*, 2021), 76% (Chen *et al.*, 2019), 41% (Zhou *et al.*, 2018), 27% (Bengar e Shahmansouri, 2020) e 125% (Ebead, 2011), respectivamente. A maioria das técnicas resultou em aumento de resistência, exceto três espécimes do sistema MF (Ebead, 2011), que falharam devido ao arrancamento do conector.

Resistências inferiores a 15% foram observadas na técnica H-Type (Chen *et al.*, 2021) e Gear-Gripd (Zhou *et al.*, 2009), associadas ao uso baixas taxas de fibra (0,08% e 0,02%) em vigas superarmadas (taxas de aço de 1,06% e 1,49%). Nota-se um crescimento da resistência com o aumento da taxa de fibra no intervalo de 0,02% a 1,54%, embora alguns espécimes apresentem redução devido a falhas no mecanismo, como o descolamento do reforço e arrancamento da ancoragem.

A Figura 2.23b apresenta os mecanismos baseados na preparação da superfície e técnicas de aderência. Os marcadores vermelhos representam o sistema Gradient; azul, EBROG; laranja, CREatE; e verde, EBRIG. Os valores máximos de resistência em uma faixa de taxas de fibra de 0,03% a 0,67%, foram de 411% (Michels *et al.*, 2013), 138% (Mostofinejad e Khozaei, 2015), 113% (Azevedo *et al.*, 2022), 132% (Mostofinejad *et al.*, 2014), respectivamente.

Os resultados demonstraram a eficiência das técnicas aprimoradas de preparação da superfície, permitindo maior aproveitamento da resistência do reforço. Nos casos de resistência máxima, ocorreu ruptura do FRP (Michels *et al.*, 2013, Mostofinejad e Khozaei, 2015; Azevedo *et al.*, 2022), exceto no método EBRIG, onde houve delaminação do cobrimento de concreto (Mostofinejad *et al.*, 2014). A delaminação do cobrimento do concreto foi o modo de falha predominante, especialmente em taxas de fibra mais altas (Aram *et al.*, 2008; Abed e Sultan, 2021), evidenciando limitações para essas técnicas.

A Figura 2.23c mostra à análise dos mecanismos de FRP. Os marcadores vermelhos representam o mecanismo FRP-Spike; azul, U-Wrap; Laranja, FRP Stitching; verde; GFRP Anchor; e amarelo, HB-FRP. Os valores máximos de resistência em uma faixa de taxas de fibra de 0,03% a 1,54%, foram de 171% (Ekenel *et al.*, 2006), 482% (Hasnat *et al.*, 2016), 53% (Eslami *et al.*, 2019), 178% (Zaki *et al.*, 2020) e 72% (Mostafa e Razaqpur, 2013), respectivamente.

Todas as técnicas resultaram em incremento de resistência, com tendência

de aumento conforme a taxa de fibra. Nos espécimes com carga máxima, os métodos HB-FRP, FRP-Spike e FRP Stitching apresentaram ruptura do FRP, enquanto U-Wrap e GFRP Anchor falharam por descolamento. De modo geral, o desempenho dos mecanismos depende tanto da taxa de reforço quanto da eficiência da técnica, como demonstrado por espécimes que, sem variação na taxa de fibra, apresentaram incremento de resistência.

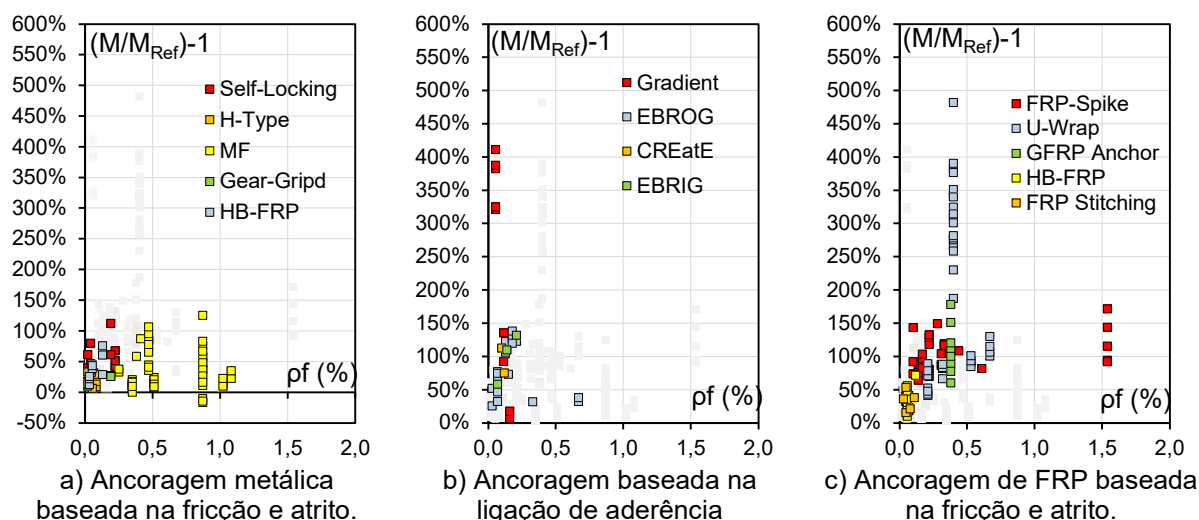


Figura 2.23 - Análise do incremento de resistência.

O uso de mecanismos de ancoragem no reforço à flexão de vigas de concreto armado com PRFC proporciona aumento significativo de resistência. A Figura 2.24a resume os incrementos mínimos e máximos de resistência de cada sistema de ancoragem, onde o eixo x representa os mecanismos aplicados em sistemas com o FRP protendido, não protendido ou em ambos. Já o eixo y representa a relação M/M_{REF} .

Na Figura 2.24b é mostrado uma comparação dos incrementos de resistência dos sistemas de ancoragens em relação a técnica EBR, utilizando a relação M/M_{EBR} , onde M_{EBR} é a resistência à flexão da viga reforçada por EBR. É importante notar que algumas técnicas não apresentaram aumento significativo de resistência em relação ao método EBR, como EBROG, FRP-Spike, U-Jacktes, HB-FRP, MF e H-Type. Esse comportamento decorre de inadequações na preparação da superfície reforçada (Wu *et al.*, 2010; Sabzi *et al.*, 2020; Al-Atta *et al.*, 2022), evidenciando a importância da combinação de ancoragem com técnicas de preparação da superfície.

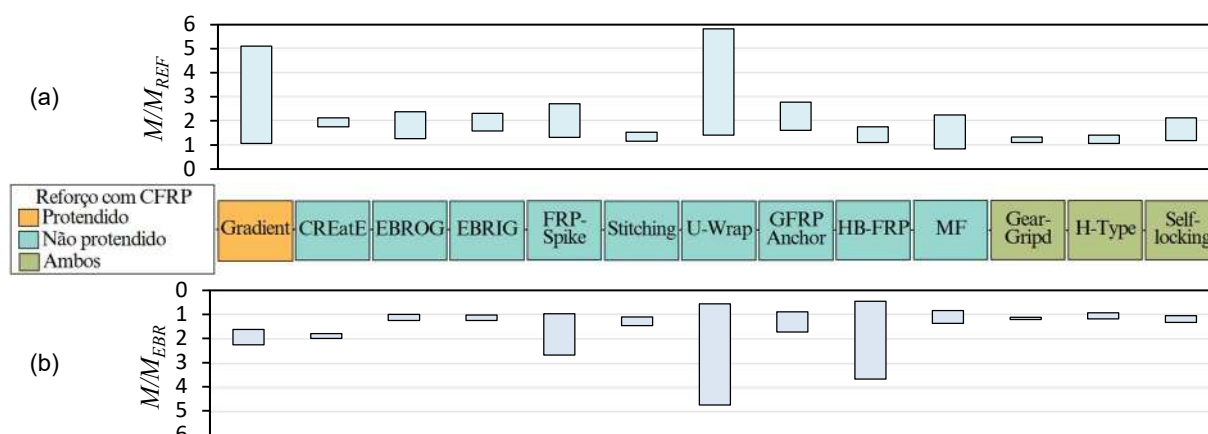


Figura 2.24 - Incremento de resistência mínimos e máximos.

2.10 Análise do incremento de ductilidade

A Figura 2.25 mostra o incremento de ductilidade em função da taxa de fibra das vigas reforçadas com os sistemas de ancoragem. O eixo x representa a taxa de fibra (ρ_f) e o eixo y representam a relação $\delta/\delta_{Ref} - 1$. A Figura 2.25a mostra a análise dos mecanismos de aço., onde os marcadores vermelhos representam o mecanismo Self-Locking; azul, HB-FRP; Laranja, H-Type; verde, Gear-Gripd; amarelo, MF. Algumas técnicas não geraram incremento de ductilidade, como no Self-Locking (Zhuo *et al.*, 2023, Zhuo *et al.*, 2020, Wang *et al.*, 2024, Yang *et al.*, 2021, He *et al.*, 2023), HB-FRP (Chen *et al.*, 2019, Guan *et al.*, 2011), H-Type (Chen *et al.*, 2021), Gear-Gripd (Zhang e Shang, 2017; Zhuo *et al.*, 2009) e MF (Bank e Arora, 2007; Sena-Cruz *et al.*, 2012; El-Maaddawy *et al.*, 2013; Ebead, 2011).

Observa-se uma tendência de redução da ductilidade para menores taxas de fibra, especialmente no intervalo de 0,02% a 0,25%, onde predominou a ruptura do FRP. Em contrapartida, alguns exemplares apresentaram incremento de ductilidade com baixas taxas de reforço, como Self-Locking (Zhou *et al.*, 2018; Zhuo *et al.*, 2023, Zhou *et al.*, 2020), HB-FRP (Chen *et al.*, 2019), H-Type (Chen *et al.*, 2021; Zhou *et al.*, 2018) e Gear-Gripd (Zhuo *et al.*, 2009), devido a falhas nos mecanismos de ancoragem, como arrancamento e perda de engrenamento. Essas diferenças sugerem interação entre as armaduras de flexão e o reforço externo. Além disso, observa-se que o arranjo das ancoragens pode influenciar significativamente incremento de ductilidade, independente da taxa de fibra.

A Figura 2.25b mostra a avaliação das ancoragens baseadas em técnicas de preparação da superfície e de aderência. Os marcadores vermelhos representam a

técnica Gradient; azul, EBROG; Laranja, CREAtE; e verde, EBRIG. A maioria das ancoragens deste grupo reduziu a ductilidade, exceto um caso no sistema EBROG (Mostofinejad e Moghaddas, 2014), onde a taxa de fibra foi de 0,07% e uma taxa de aço, significativamente superior ($\rho_s = 1,78\%$). O modo de ruptura nesse caso foi o esmagamento do concreto, ao contrário dos demais espécimes, cuja a falha predominante foi ruptura do FRP (Michels *et al.*, 2013; Mostofinejad *et al.*, 2014; Abed e Sultan, 2021; Mostofinejad e Khozaei, 2015; Mostofinejad e Moghaddas, 2014; Azevedo *et al.*, 2022; WO 2016/005941), delaminação do cobrimento de concreto (Aram *et al.*, 2008; Mostofinejad *et al.*, 2014; Abed e Sultan, 2021; Mostofinejad e Khozaei, 2015), e descolamento do FRP (Yang *et al.*, 2021; Stoecklin e Meier, 2003).

Nota-se uma influência da taxa de fibra na ductilidade: taxas menores facilitam rupturas prematuras do FRP, enquanto taxas mais elevadas podem levar a falhas como delaminação do cobrimento de concreto ou descolamento do reforço. Estudos adicionais são necessários para determinar a faixa ótima da taxa de fibra em cada método de ancoragem

A Figura 2.25c mostra a análise das ancoragens de FRP, onde marcadores vermelhos representam FRP-Spike; azul, FRP U-Jackets; laranja, FRP Stitching; verde, GFRP Anchor; e amarelo, HB-FRP. O incremento de ductilidade foi observado apenas nos sistemas FRP-Spike (Al-Atta *et al.*, 2022; Smith *et al.*, 2013) e FRP U-Wrap (Hasnat *et al.*, 2016), onde os modos de ruptura predominantes foram falhas na ancoragem (Smith *et al.*, 2013; Hasnat *et al.*, 2016) e ruptura do FRP (Al-Atta *et al.*, 2022; Smith *et al.*, 2013).

Há uma tendência de aumento da ductilidade com taxas de fibras mais elevadas, especialmente nos sistemas FRP-Spike e HB-FRP, já para os demais métodos, a variação da taxa de reforço não foi significativa. Assim, a influência do arranjo das ancoragens é relevante considerando apenas o número e posicionamento. Nos elementos com ductilidade reduzida, os modos de ruptura predominantes foram ruptura do FRP (Mostafa e Razaqpur, 2013; Al-Atta *et al.*, 2022; Eslami *et al.*, 2019; Mostofinejad *et al.*, 2019), descolamento do FRP (Zaki *et al.*, 2020; Mostofinejad *et al.*, 2019; Bodin e David, 2004; Mostofinejad *et al.*, 2019; Zaki *et al.*, 2020), falhas na ancoragem (Al-Atta *et al.*, 2022; Assad *et al.*, 2024; Zaki *et al.*, 2024; Abdalla *et al.*, 2023).

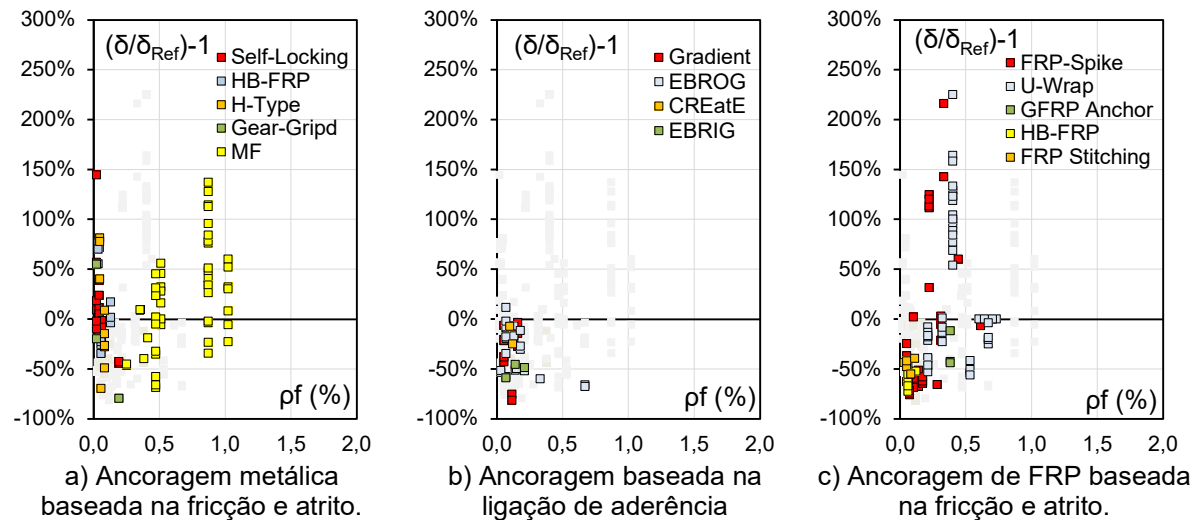


Figura 2.25 - Análise do incremento de ductilidade.

A Figura 2.26 mostra a relação entre o incremento de resistência e incremento de ductilidade. O eixo x representa a relação $\delta/\delta_{REF} - 1$ e o eixo y representa a relação $M/M_{Ref} - 1$. Os marcadores representam os espécimes analisados. Alguns métodos proporcionaram aumento tanto da resistência quanto ductilidade, como HB-FRP (Chen *et al.*, 2019), H-Type (Zhou *et al.*, 2018; Chen *et al.*, 2021), FRP-Spike [Al-Atta *et al.*, 2022; Smith *et al.*, 2013; Assad *et al.*, 2024), EBROG (Mostofinejd e Moghaddas, 2014), FRP U-Jackets (Mostofinejad *et al.*, 2019; Hasnat *et al.*, 2016), Gear-gripd (Bengar e Shahmansouri, 2020; Zhuo *et al.*, 2009), MF (Ebead, 2011; El-Maaddawy *et al.*, 2013; El-Maaddawy *et al.*, 2013; Lamanna *et al.*, 2004) e Self-Locking (Zhou *et al.*, 2023; Zhou *et al.*, 2020; Zhou *et al.*, 2018). No entanto, a maioria das técnicas de ancoragem resultou em incremento de resistência à custa da ductilidade, um comportamento também identificado por Chen *et al.*, (2021).

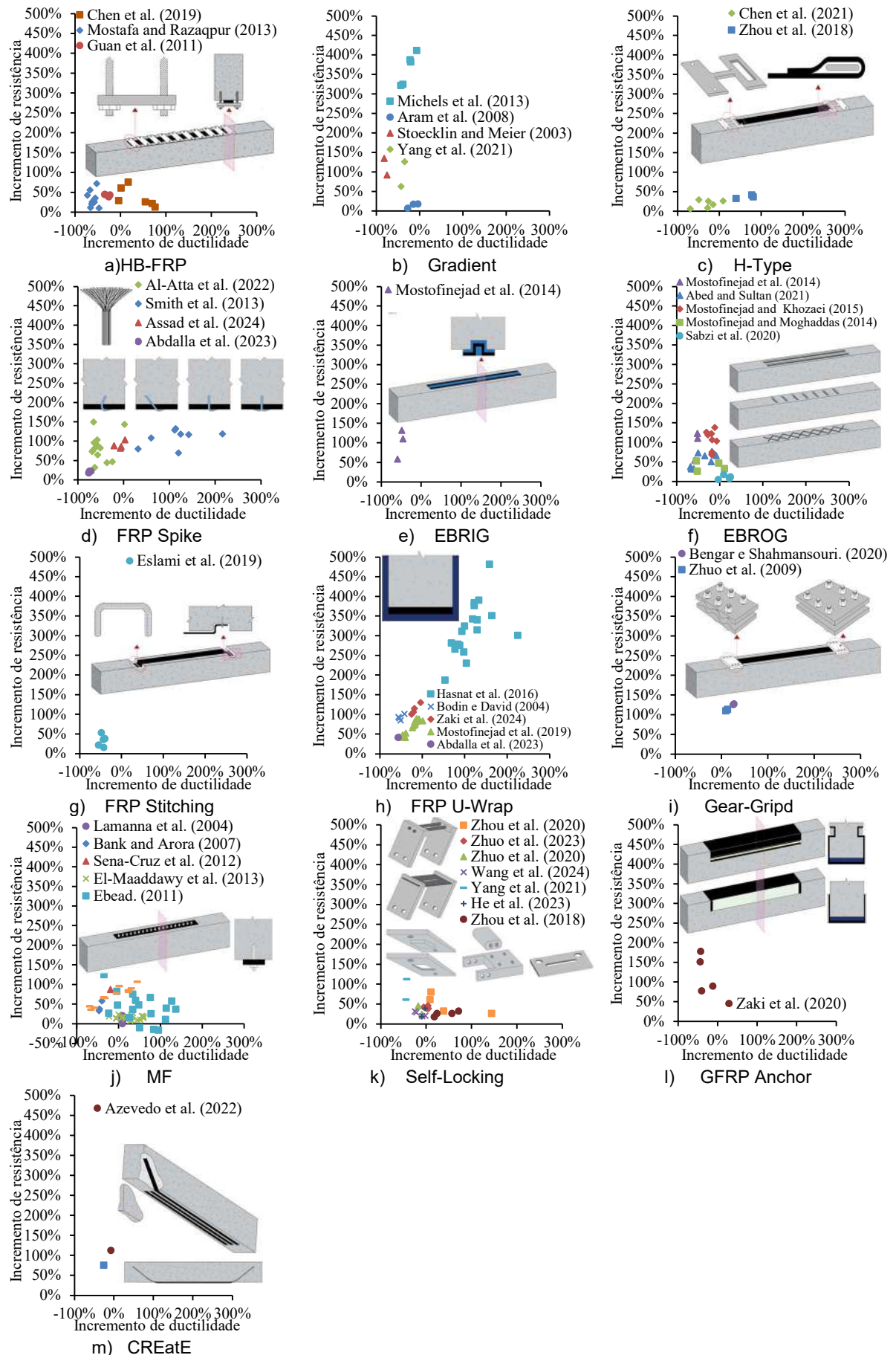


Figura 2.26 - Relação entre o incremento de resistência e o incremento de ductilidade.

2.11 Principais insights sobre a revisão e banco de dados

A revisão sistemática analisou avanços na aplicação de mecanismos de ancoragem para reforço à flexão de vigas de concreto armado utilizando Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono (PRFC). A análise bibliométrica identificou as principais publicações, pesquisadores influentes e a evolução das pesquisas na área. A distribuição geográfica revelou a predominância de estudos na Ásia, especialmente na China, Irã e Emirados Árabes Unidos, com contribuições relevantes também da América do Norte e Europa. As principais conclusões estão listadas abaixo:

1. **Publicações e Tendências de Pesquisa:** Os estudos estão concentrados em periódicos de alto impacto, como o *Journal of Composites for Construction* e *Construction and Building Materials*. A análise de palavras-chave pelo software VOSviewer revelou temas recorrentes, incluindo reforço de vigas de concreto, sistemas de ancoragem e pré-tensionamento. Além disso, redes de coautoria e cocitação demonstraram colaborações significativas entre autores e instituições, favorecendo o avanço científico na área.
2. **Metodologias de Pesquisa:** As investigações foram classificadas em abordagens experimentais e teóricas, destacando a necessidade de integração entre ensaios laboratoriais e modelagem computacional para otimização dos sistemas de ancoragem.
3. **Impacto dos Sistemas de Ancoragem:** Os sistemas de ancoragem aumentam significativamente a eficiência estrutural do reforço, reduzindo os efeitos prejudiciais do descolamento prematuro do CFRP. Devendo a escolha do mecanismo de ancoragem considerar as condições específicas de cada projeto, exigindo uma seleção criteriosa.
4. **Principais Sistemas Estudados:** Entre os 13 mecanismos analisados, destacaram-se os baseados em fricção e atrito, como Self-Locking e HB-FRP, devido à capacidade de dissipar energia e melhorar a ductilidade. E os sistemas EBROG e Gradient mostraram-se eficazes na prevenção do descolamento da fibra, contribuindo para o aumento da capacidade resistente das vigas.
5. **Eficiência dos Sistemas:** A análise dos modos de ruptura indicou que a maioria das técnicas de ancoragem proporcionou incrementos significativos na capacidade de carga, alcançando até 482%. Entretanto, a eficiência desses sistemas depende não apenas da taxa de reforço, mas também do tipo de ancoragem empregado.

6. Classificação dos Sistemas: A classificação dos sistemas de ancoragem permitiu uma análise mais específica:
 - Grupo A (Atrito): Sistemas como HB-FRP, MF, Self-Locking, H-Type e Gear-Grip mostraram-se eficientes, evidenciando modos de ruptura predominantes, como falha do FRP, descolamento do reforço e falhas na ancoragem. No entanto, são necessários estudos adicionais sobre o desempenho sob condições ambientais severas, como exposição a cloretos e carregamentos constantes.
 - Grupo B (Preparação de Superfície e EB): Sistemas como CREatE, EBROG, EBRIG e Gradient apresentaram melhoria na aderência e controle da fissuração. Contudo, investigações são necessárias para avaliar a resistência ao fogo e o comportamento sob cargas cíclicas.
 - Grupo C (Ancoragem por FRP): Sistemas como FRP-Spike, FRP-Stitching e FRP U-Wrap demonstraram potencial na redução de tensões na interface reforço-concreto. Estudos adicionais são recomendados para compreender a interação entre diferentes fibras e resinas, bem como o comportamento sob exposição prolongada.
7. Resistência vs. Ductilidade: A relação entre incremento de resistência e ductilidade é complexa e varia conforme o tipo de ancoragem. Algumas técnicas proporcionam ganhos simultâneos em ambas as propriedades, enquanto outras promovem aumento de resistência à custa da ductilidade. Isso reforça a necessidade de balanceamento desses fatores no dimensionamento dos sistemas de reforço.
8. Direções Futuras: Novos estudos devem considerar a interação entre a armadura interna e o reforço externo, além de investigar a influência de parâmetros geométricos e de aderência no comportamento global das vigas reforçadas. Avanços nesse campo permitirão aprimorar a aplicação dos sistemas de CFRP na reabilitação de estruturas de concreto armado, garantindo soluções mais eficazes e duráveis.

2.12 Recomendações normativas

2.12.1 ABNT NBR 8800 (2024) - Verificações para a chapa de aço da ancoragem.

2.6.1.1 Pressão de contato em furos

A Figura 2.27 mostra um exemplo do modo de ruptura considerada para este caso. A força resistente de cálculo à pressão de contato na parede de um furo, já levando em conta o rasgamento entre dois furos consecutivos ou entre um furo externo e a borda (deve ser atendido também o exposto no item 6.3.3.2 da ABNT NBR 8800, 2008). No caso de furos-padrão, furos alargados, furos pouco alongados em qualquer direção e furos muito alongados na direção da força quando a deformação no furo para força de serviço for uma limitação de projeto considera-se o seguinte:

$$F_{c,Rd} = \frac{1,2 \cdot l_f \cdot t \cdot f_u}{\gamma_{a2}} \leq 2,4 d_b t f_u / \gamma_{a2} \quad (2.1)$$

Onde:

l_f = distância, na direção da força, entre a borda do furo e a borda do furo adjacente ou a borda livre;

d_b = diâmetro do parafuso;

t = espessura da parte ligada;

f_u = resistência à ruptura do aço da parede do furo;

γ_{a2} = coeficiente de minoração das resistências na ruptura.

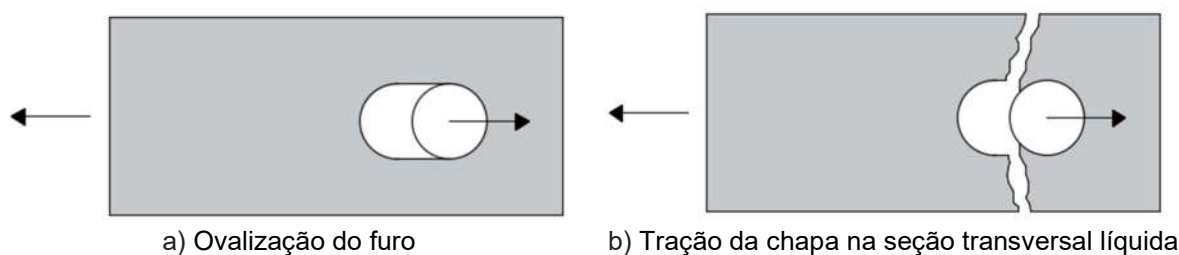


Figura 2.27 - Rupturas na ligação da chapa de aço com conectares. ABNT NBR 8800 (2008).

2.6.1.2 Colapso por rasgamento

Para o estado limite de colapso por rasgamento, a força resistente é determinada pela soma das forças resistentes ao cisalhamento de uma ou mais linhas de falha e à tração em um segmento perpendicular. Esse estado-limite deve ser verificado junto a ligação em extremidades de vigas com a mesmas recortada para encaixe e em situações similares, tais como em barras tracionadas e chapas de nó (a situação típica considerada neste estudo está ilustrada na Figura 2.28). A força

resistente de cálculo ao colapso por rasgamento é dada por:

$$F_{t,Rd} = \frac{1}{\gamma_{a2}} (0,60 \cdot f_u \cdot A_{nv} + C_{ts} \cdot f_u) \leq \frac{1}{\gamma_{a2}} (0,60 \cdot f_y \cdot A_{gv} + C_{ts} \cdot f_u \cdot A_{nt}) \quad (2.2)$$

Onde:

A_{gv} = área bruta sujeita a cisalhamento;

A_{nv} = área líquida sujeita a cisalhamento;

A_{nt} = área líquida sujeita à tração;

C_{ts} = 1,0 quando a tensão de tração na A_n for uniforme, e 0,5 quando não uniforme.

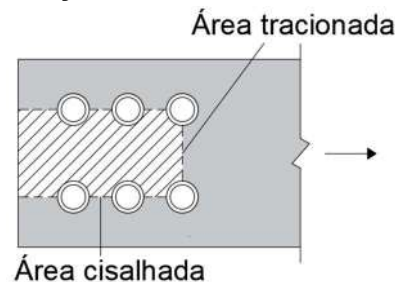


Figura 2.28 - Ruptura por cisalhamento de bloco de chapa de ligação. Estruturas de aço (2009).

2.12.2 ACI 318-M (2025) - Verificações da ancoragem com parafusos no concreto

2.6.2.1 Resistência ao cisalhamento do conector

Neste tópico serão descritos somente as verificações possíveis para o sistema de ancoragem utilizado nesta pesquisa. Com isso, os possíveis modos de ruptura da ancoragem foram identificados como o cisalhamento do conector, Breakout e Pryout. A Figura 2.29 ilustra o modo de ruptura por cisalhamento do conector, induzido por uma força horizontal, o procedimento de cálculo para a verificação da resistência ao cisalhamento do conector é descrito a seguir.

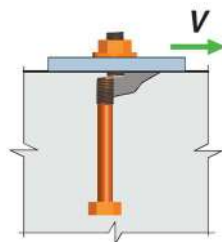


Figura 2.29 - Ruptura por cisalhamento do conector. ACI 318-M (2019).

Para âncoras de parafuso com cabeça fundida e gancho e para âncoras instaladas posteriormente onde as mangas não se estendem através do plano de cisalhamento a resistência ao cisalhamento do conector (V_{sa}) pode ser obtida por:

$$V_{sa} = 0,6 \cdot A_{se,V} \cdot f_{uta} \quad (2.3)$$

Onde:

$A_{se,V}$ = Área efetiva da seção transversal do conector;

f_{uta} = Resistência ao escoamento do conector.

2.6.2.2 Resistência à ruptura do concreto das âncoras em cisalhamento (*Breakout*)

O *Breakout* está representado na Figura 2.30, a sua verificação é obtida considerando que a resistência em elementos com o cisalhamento paralelo à borda ($V_{||}$) é equivalente a uma ou duas vezes a resistência obtida na verificação do cisalhamento perpendicular à borda ($V_{\perp}$). A resistência ao *breakout* pode ser obtido através dos seguintes procedimentos de cálculo:

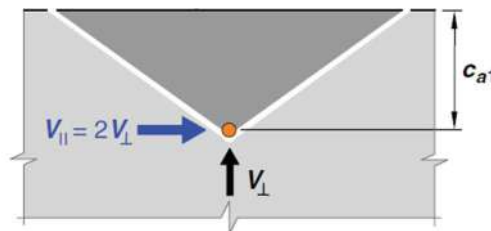


Figura 2.30 - Ruptura por arrancamento do concreto (Breakout). ACI 318-M (2019).

As equações de resistência ao cisalhamento assumem um ângulo de ruptura de aproximadamente 35 graus e consideram a teoria da mecânica da fratura. Os efeitos de múltiplas âncoras, espaçamento de âncoras, distância da borda e espessura do elemento de concreto na resistência nominal à ruptura do concreto em cisalhamento são incluídos aplicando os fatores de redução de A_{Vc}/A_{Vco} , $\psi_{ec,V}$, $\psi_{ed,V}$, $\psi_{c,V}$, $\psi_{h,V}$.

$$V_{cbg} = \frac{A_{Vc}}{A_{Vco}} \cdot \psi_{ec,V} \cdot \psi_{ed,V} \cdot \psi_{c,V} \cdot \psi_{h,V} \cdot V_b \quad (2.4)$$

Onde:

$$\psi_{ec,V} = \frac{1}{\left(1 + \frac{e'_{V}}{1,5 C_{a1}}\right)} \leq 1,0;$$

$$\psi_{ed,V} = \begin{cases} \text{se } C_{a2} \geq 1,5 C_{a1}, \psi_{ed,V} = 1,0 \\ \text{se } C_{a2} < 1,5 C_{a1}, \psi_{ed,V} = 0,7 + 0,3 \frac{C_{a2}}{1,5 C_{a1}}; \end{cases}$$

$\psi_{c,V}$ = Fator de influência da fissuração na região da ancoragem, para $\emptyset < 13$, $\psi_{c,V} = 1,0$;

$$\psi_{h,V} = \sqrt{\frac{1,5 C_{a1}}{h_a}} \geq 1,0.$$

A resistência básica de ruptura do concreto de uma única âncora ao cisalhamento em concreto fissurado (V_b), não deve exceder o menor entre as seguintes equações:

$$V_b = \left(0,6 \cdot \left(\frac{A_{Vc}}{A_{Vco}}\right)^{0,2} \cdot \sqrt{d_a}\right) \cdot \lambda_a \cdot \sqrt{f'_c} \cdot (C_{a1})^{1,5} \quad (2.5)$$

Sendo o comprimento de suporte de carga da âncora para cisalhamento (l_e) igual ao comprimento de embutimento do conector (h_{ef}) para âncoras com uma rigidez constante ao longo de todo o comprimento da seção embutida, como pinos com cabeça e âncoras pós-instaladas com uma concha tubular ao longo de todo o comprimento da profundidade de embutimento; $l_e = 2$ vezes o diâmetro do conector (d_a) para âncoras de expansão controladas por torque com uma manga de distância separada da manga de expansão; $l_e \leq 8d_a$ em todos os casos.

$$V_b = 3,7 \cdot \lambda_a \cdot \sqrt{f'_c} \cdot (C_{a1})^{1,5} \quad (2.6)$$

2.6.2.3 Resistência ao Arrancamento de Concreto (*Pryout*) de grupo de âncoras

A Figura 2.31 mostra um exemplo do modo de ruptura *pryout*, indicando que a resistência ao cisalhamento de *pryout* pode ser aproximada, como uma a duas vezes a resistência à tração da âncora, com o menor valor apropriado para h_{ef} menor que

65 mm. Como é possível que a resistência de ligação das âncoras adesivas possa ser menor que a resistência à ruptura do concreto, é necessário considerar a seguinte Equação 2.7.

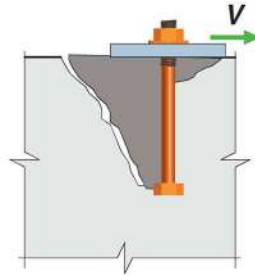


Figura 2.31 - Ruptura ao arrancamento do concreto (Pryout). ACI 318-M (2019).

$$V_{cpg} = k_{cp} \cdot N_{cbg} \quad (2.7)$$

Onde:

$$k_{cp} = \begin{cases} 1,0 & \text{para } h_{ef} < 65\text{mm} \\ 2,0 & \text{para } h_{ef} \geq 65\text{mm} \end{cases};$$

A resistência nominal de ruptura do concreto em tração (N_{cbg}) de um grupo de âncoras que satisfaça, deve ser calculado através da Equação 2.8.

$$N_{cbg} = \frac{A_{Nc}}{A_{Nco}} \cdot \psi_{ec,N} \cdot \psi_{ed,N} \cdot \psi_{c,N} \cdot \psi_{cp,N} \cdot N_b \quad (2.8)$$

Onde:

$$\psi_{ec,N} = \frac{1}{\left(1 + \frac{2e'_n}{3h_{ef}}\right)} \leq 1,0;$$

$$\psi_{ed,N} = \begin{cases} \text{se } C_{a,min} \geq 1,5 h_{ef}, \psi_{ed,N} = 1,0 \\ \text{se } C_{a,min} < 1,5 h_{ef}, \psi_{ed,N} = 0,7 + 0,3 \frac{C_{amin}}{1,5h_{ef}}; \end{cases}$$

$\psi_{c,N}$ = Fator de influência da fissuração na região da ancoragem, para ancoragem pós-instalada, $\psi_{c,N} = 1,4$;

$$\psi_{cp,N} = \begin{cases} \text{se } C_{a,min} \geq C_{ac}, \psi_{cp,N} = 1,0 \\ \text{se } C_{a,min} < C_{ac}, \psi_{ed,N} = \frac{C_{amin}}{C_{ac}} \geq \frac{1,5h_{ef}}{C_{ac}} \end{cases}$$

A Equação 2.9, para a resistência básica de ruptura do concreto (N_b), foi derivada assumindo a ruptura do concreto com um ângulo de aproximadamente 35 graus, considerando conceitos de mecânica de fratura.

$$N_b = k_c \cdot \lambda_a \cdot \sqrt{f'_c} h_{ef}^{1,5} \quad (2.9)$$

Onde:

$K_c = 7$, para ancoragens pós instaladas.

2.12.3 ACI 318-M (2025) - Resistência Seccional de Vigas de Concreto Armado

Entre as hipóteses assumidas para o cálculo da resistência das seções sob flexão está o fato de que o equilíbrio deve ser satisfeito em cada seção, considerando que a deformação varia proporcionalmente com a distância da linha neutra e a resistência à tração do concreto deve ser desprezada, a deformação última do concreto é fixada em $\varepsilon_c = 0,003$. Dessa forma a linha neutra (c) da seção pode ser calculada através da equação de equilíbrio a seguir:

$$\alpha_1 f'_c \beta_1 b c + A'_s f_s = A_s f_s \quad (2.10)$$

Onde:

A_s = Área de aço da armadura tracionada;

A'_s = Área de aço da armadura comprimida;

b = Largura da seção;

c = Profundidade da linha neutra;

f'_c = Resistência à compressão do concreto;

f_s = Tensão de escoamento do aço;

$\alpha_1 = 0,85$ ou obtido através $\alpha_1 = \frac{3\varepsilon'_c \varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3\beta_1 \varepsilon_c'^2}$.

O parâmetro β_1 pode ser determinado através das Equação 2.11a e 2.11b

$$\beta_1 = \begin{cases} 0,65 & \text{Para } f'_c > 55\text{MPa}, \\ 0,85 & \text{Para } 17\text{MPa} < f'_c < 28\text{MPa}; \\ 0,85 - \left(\frac{0,05(f'_c - 28)}{7} \right) & \text{Para } f'_c > 28\text{MPa}. \end{cases} \quad (2.11a)$$

$$\beta_1 = \frac{4\varepsilon'_c - \varepsilon_c}{6\varepsilon'_c - 2\varepsilon_c} \quad (2.11b)$$

Onde:

$$\varepsilon'_c = \frac{1,7 f'_c}{E_c}$$

Determinação do momento resistente:

$$M_n = A_s \cdot f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad (2.12)$$

Onde:

d = Altura útil

Verificação do cortante, sendo a igual ao vão de cisalhamento:

$$V = \frac{Mn}{a} < V_n = V_c + V_s \quad (2.13)$$

Contribuição do concreto ao cisalhamento como o menor entre:

$$V_c = 0,42\lambda\sqrt{f'_c} \cdot b \cdot d \quad (2.14)$$

$$V_c = \left(0,17 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'_c} + \frac{Nu}{6 \cdot Ag} \right) \cdot b \cdot d \quad (2.15)$$

Onde:

$$\lambda = \sqrt{\frac{2}{1+0,004 \cdot d}} \leq 1;$$

Nu = Carga axial direta;

Ag= Área bruta do concreto.

Contribuição da armadura na resistência ao cisalhamento:

$$V_s = A_{sw} \cdot f_s \frac{d}{s_w} \quad (2.16)$$

$$V_{smax} = 0,66 \cdot \sqrt{f_c} \cdot b \cdot d \quad (2.17)$$

Onde:

A_{sw} = Área de aço da armadura de cisalhamento;
 s_w = Espaçamento da armadura

2.12.4 ACI 440 2R (2017) Reforço com FRPs Colados Externamente

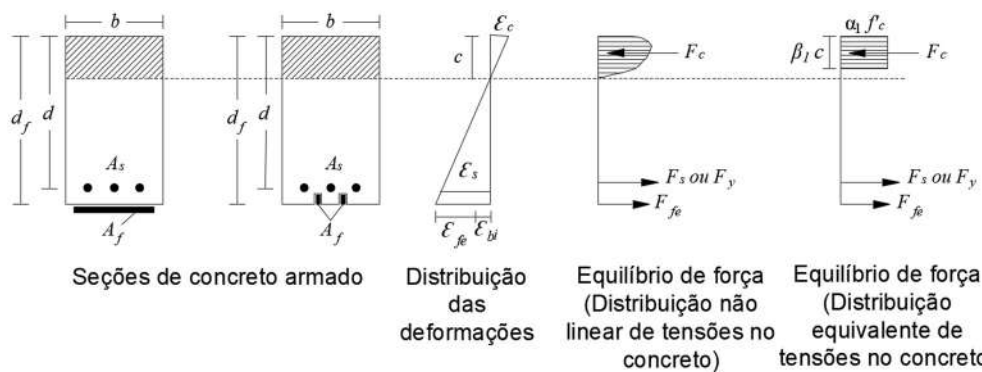


Figura 2.32 - Resistência seccional de vigas sob flexão no ELU. ACI 440-2R (2017).

A resistência máxima à flexão de vigas reforçadas com polímeros reforçados com Fibras (FRP) deve ser calculada com base na compatibilidade de deformações, equilíbrio de forças e modo de falha dominante, conforme observa-se na Figura 2.32. Dessa forma a linha neutra (c) da seção pode ser calculada através da equação de equilíbrio a seguir:

$$\alpha_1 f'_c \beta_1 b c = A_s f_s + A_f f_{fe} \quad (2.18)$$

Onde:

A_f = Área do FRP;
 A_s = Área de aço da armadura tracionada;
 b = Largura da seção;
 c = Linha neutra;
 f'_c = Resistência à compressão do concreto;
 $\alpha_1 = 0,85$ ou obtido através $\alpha_1 = \frac{3\epsilon'_c \epsilon_c - \epsilon_c^2}{3\beta_1 \epsilon_c'^2}$.

O parâmetro β_1 pode ser determinado através das Equações 2.19:

$$\beta_1 = \begin{cases} 0,85 & \text{Para } 17\text{MPa} < f'_c < 28\text{MPa} \\ 1,05 - 0,05 \left(\frac{f'_c}{7} \right) & \text{Para } f'_c > 28\text{MPa} \end{cases} \quad (2.19a)$$

$$\beta_1 = \frac{4\varepsilon'_c - \varepsilon_c}{6\varepsilon'_c - 2\varepsilon_c} \quad (2.19b)$$

A tensão no aço (f_s) é calculado a partir da deformação no aço (ε_s), considerando o comportamento elástico-plástico do aço, conforme pode ser observado nas seguintes equações:

$$f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y \quad (2.20)$$

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \left(\frac{d - c}{d_f - c} \right) \quad (2.21)$$

Com isso a resistência nominal à flexão (M_n) de uma viga reforçada externamente com FRP pode ser obtida através das equações apresentadas a seguir.

$$M_n = A_s \cdot f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \psi_f \cdot A_f \cdot f_{fe} \left(d_f - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad (2.22)$$

Onde:

d = Altura útil;

d_f = Altura do FRP em relação a face comprimida da viga;

f_{fe} = Tensão efetiva da fibra

$\psi_f = 0,85$.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Características das vigas

Nesta pesquisa, foram estudadas seis vigas de concreto armado com as mesmas geometrias e armadura transversal. As vigas apresentam 2200mm de comprimento, 1550mm de vão entre o eixo dos apoios, e seção transversal em forma de T, com altura total (h) de 280mm, base da alma (bw) de 180 mm, espessura da mesa (hf) de 80mm e largura da mesa (bf) de 350mm. As vigas foram dimensionadas para resistirem mais à força cortante em comparação à flexão. Para isto, nas armaduras transversais de todas as vigas foram utilizados 21 estribos com barras de diâmetro de 12,5mm ($\emptyset_W$) espaçados a cada 100mm (S_W). A variação adotada está na taxa de armadura de flexão (ρ_y). Sendo que três vigas foram dimensionados com duas barras de aço com diâmetro de 12,5mm ($\rho_y=0,44\%$) e as outras três foram dimensionados com três armaduras de flexão com diâmetro de 16mm ($\rho_y=1,12\%$). A Figura 3.1 ilustra as características das vigas analisadas neste trabalho.

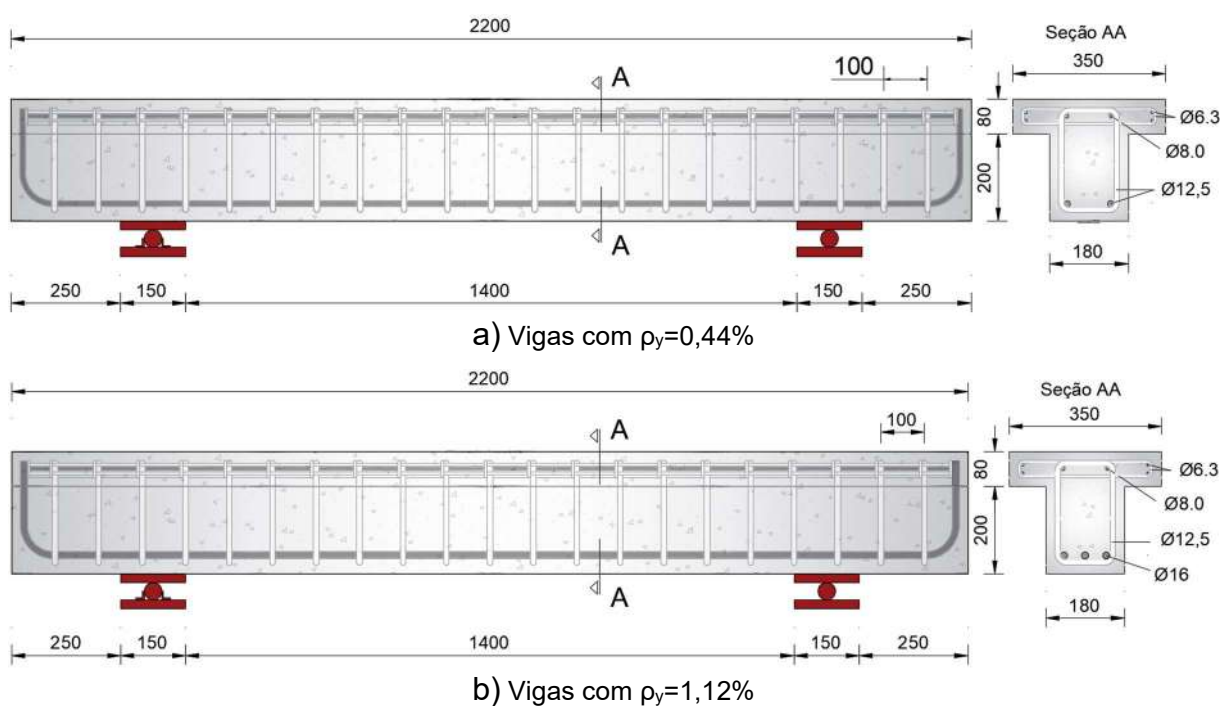


Figura 3.1 - Características das vigas do programa experimental (mm).

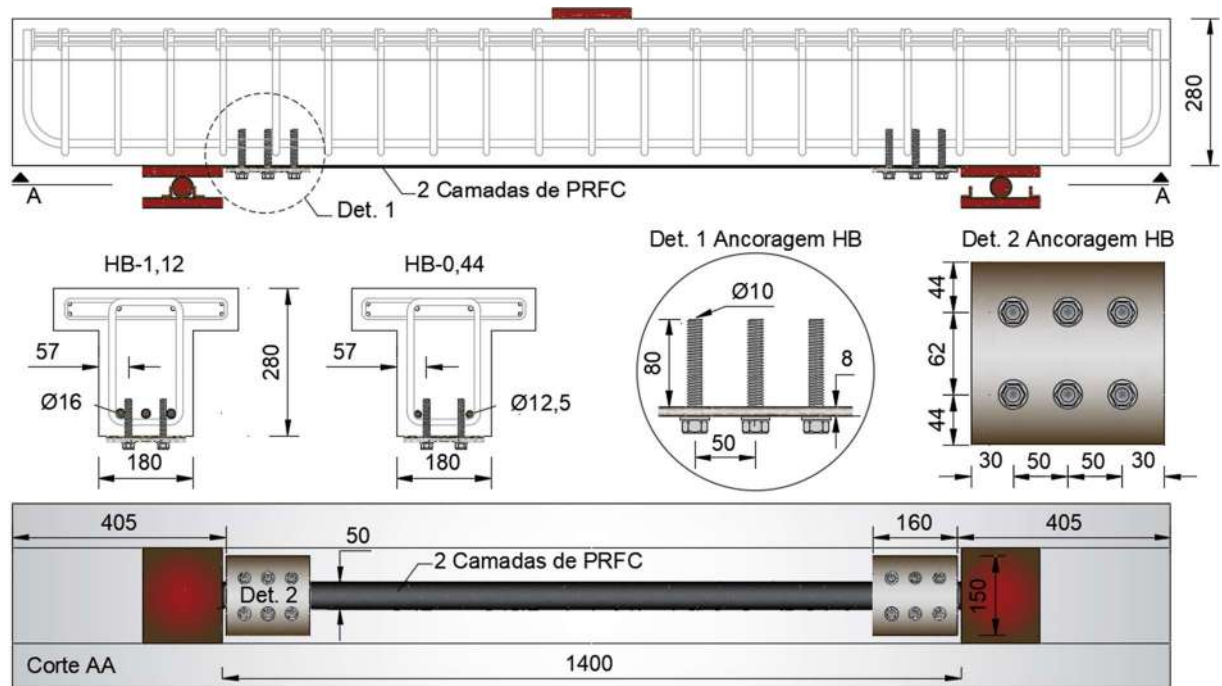
3.2 Sistema de reforço

Duas vigas não receberam aplicação de reforço (Ref-0,44 e Ref-1,12), as demais vigas foram reforçadas à flexão com a mesma taxa de fibra, para o qual foi utilizado laminado de fibra de carbono com espessura de 1,2mm (t_f), largura de 50mm (b_f), densidade de 1,6g/cm³ colado longitudinalmente na superfície inferior da viga. A área de fibra foi comum em ambos os sistemas de reforço (120mm²). No entanto, para as vigas com ancoragem HB (HB-0,44 e HB-1,12) foram utilizadas duas camadas de laminação, enquanto nas vigas com a ancoragem FT (FT-0,44 e FT-1,12) foram utilizadas duas faixas coladas simetricamente em relação ao eixo longitudinal da viga. Essa variação foi imposta pelas limitações de dimensionamento das ancoragens, como distância mínima das bordas (HB) e a sobreposição de camadas (FT).

A ancoragem HB é composto por parafusos de alta resistência com diâmetro de 10mm embutidos em furos pré estabelecidos e chapa de aço com espessura de 8,0mm, conforme mostra a Figura 3.2a. Enquanto na ancoragem FT foi utilizado laminado unidirecional com camadas sobrepostas, conforme mostra a Figura 3.2b. Observa-se as características das armaduras e do reforço de cada viga na Tabela 3.1, que também apresenta as áreas de aço (A_s) e de reforço (A_f), e a taxa de aço (ρ).

A aplicação do reforço mostrado na Figura 3.3 foi parcialmente semelhante para ambos os sistemas, com inclusão de atividades extras conforme demanda do tipo de ancoragem, como a perfuração da superfície e a sobreposição de camadas de CFRP do reforço no sistema com ancoragem HB, e a sobreposição de camadas de CFRP da ancoragem FT. Foi feita a preparação do substrato com o desbaste da camada superficial de concreto com lixadeira e disco de desbaste. Utilizou-se uma escova de arame adaptada em uma lixadeira para a remover partículas menores. Além disso, a superfície foi lavada com jato de água.

Com as vigas secas iniciou-se o processo de aplicação manual do reforço, onde aplicou-se uma camada de resina epoxi com uma espátula para a regularização do substrato da viga e uma camada uniforme de 2mm sobre o laminado. Em seguida o laminado foi pressionado sobre o substrato com um rolo de pressão, até o extrairamento da resina nas bordas do PRFC. Após o número de camadas desejado foi aplicado o mecanismo de ancoragem durante a trabalhabilidade da resina, formando um conjunto monolítico entre a ancoragem e o reforço.



a) Sistema de ancoragem HB.

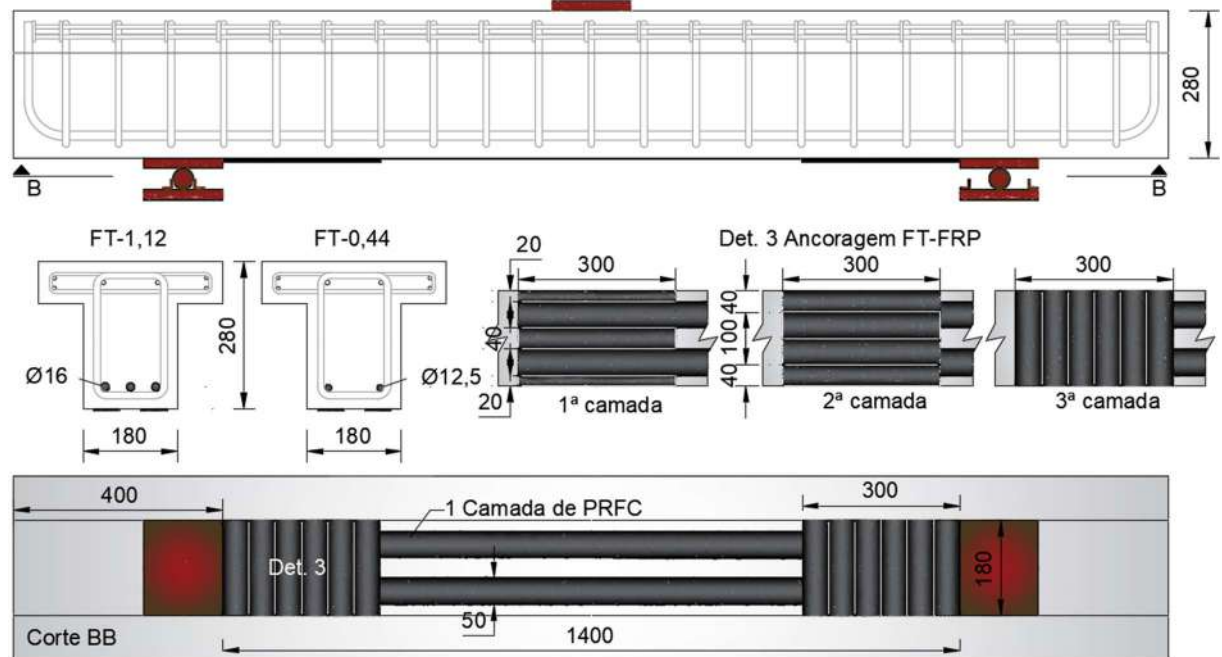
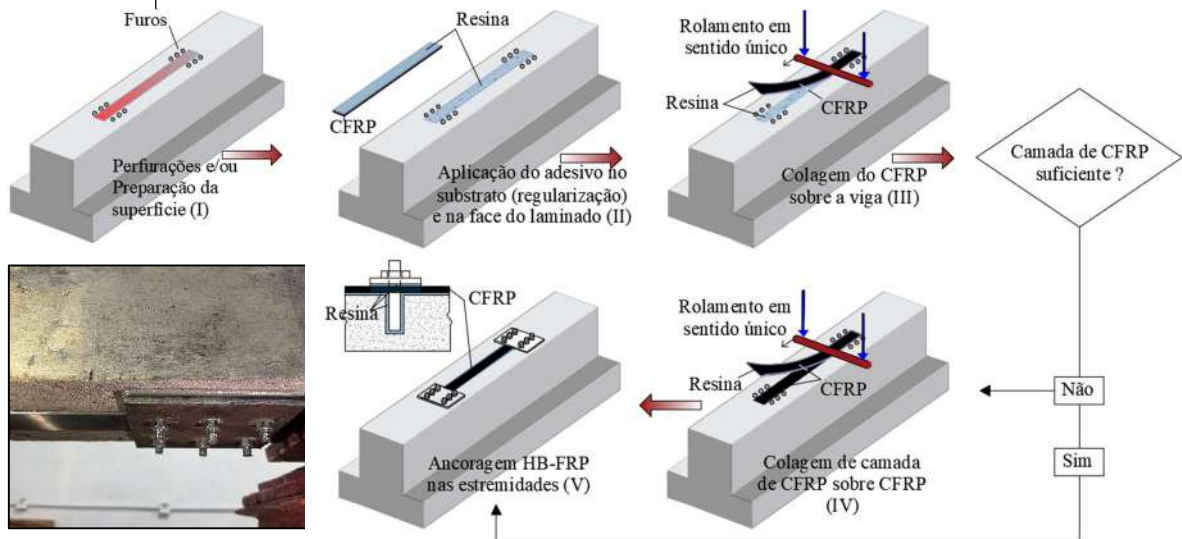
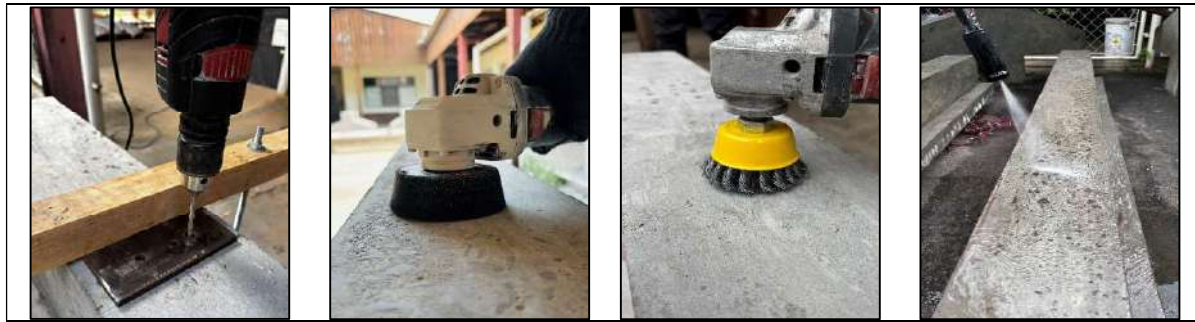
b) Sistema de ancoragem FT.
Figura 3.2 - Sistemas de reforço.

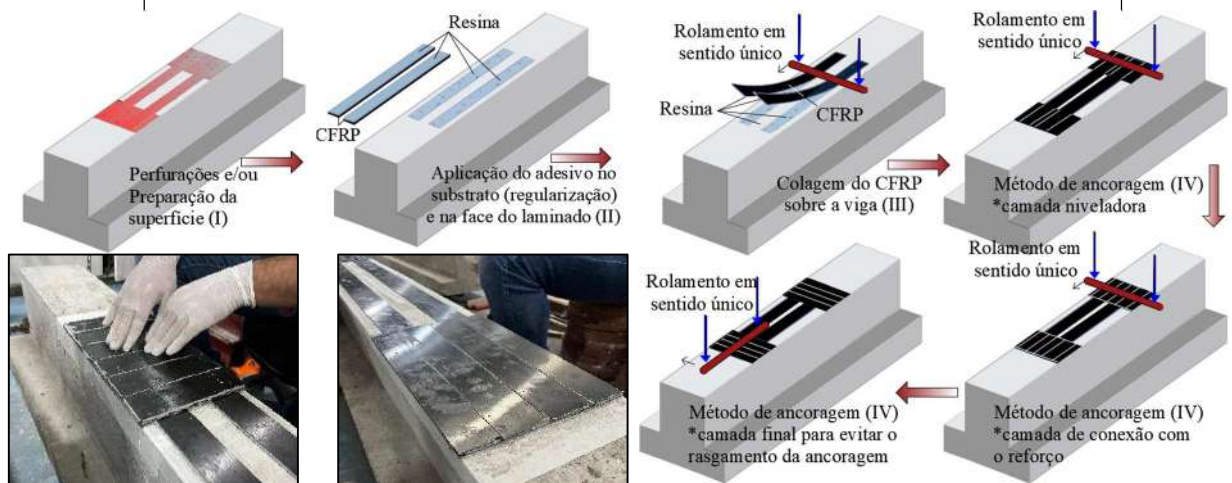
Tabela 3.1 - Características das armaduras das vigas.

Vigas	Armadura Transv.			N	Armadura longitudinal				ρ_y	n	nf	Reforço			
	$\varnothing_w$ (mm)	S_w (mm)	A_{sw} (mm ²)		$\varnothing_y$ (mm)	A_s (mm ²)	A_s' (mm ²)	(%)				b_f (mm)	t_f (mm)	A_f (mm ²)	ρ_f (%)
REF-0,44										-	-	-	-	-	-
HB-0,44	12,5	100	245,4	2	12,5	245,4	225,2	0,44		2	1	50	1,2	120	0,18
FT-0,44										1	2	50	1,2	120	0,18
REF-1,12										-	-	-	-	-	-
HB- 1,12	12,5	100	245,4	3	16,0	603,2	225,2	1,12		2	1	50	1,2	120	0,18
FT-1,12										1	2	50	1,2	120	0,18

Obs= N (número de barras) n (número de camadas de Laminado), nf (número de faixas).



a) Sistema HB



b) Sistema FT

Figura 3.3 - Método de aplicação do reforço.

3.3 Sistema de ensaio

O método de ensaio das vigas foi de flexão simples, como observado na Figura 3.4. Para isto, foi aplicado um carregamento crescente e controlado por uma máquina hidráulica universal com capacidade de carga de 3000kN, na qual o controle de velocidade do ensaio é feito manualmente. Foi utilizada uma célula de carga com mesma capacidade de carga da máquina. A força foi aplicada sobre uma área de 180x200mm. Para registrar as deformações e deslocamentos das vigas foram instalados nas armaduras, no concreto e no material de reforço, Extensômetros, Potenciômetros e *Linear Variable Differential Transformer* (LVDT). Os dados foram registrados por um Sistema de Aquisição de Dados ADS com 32 canais de entrada.

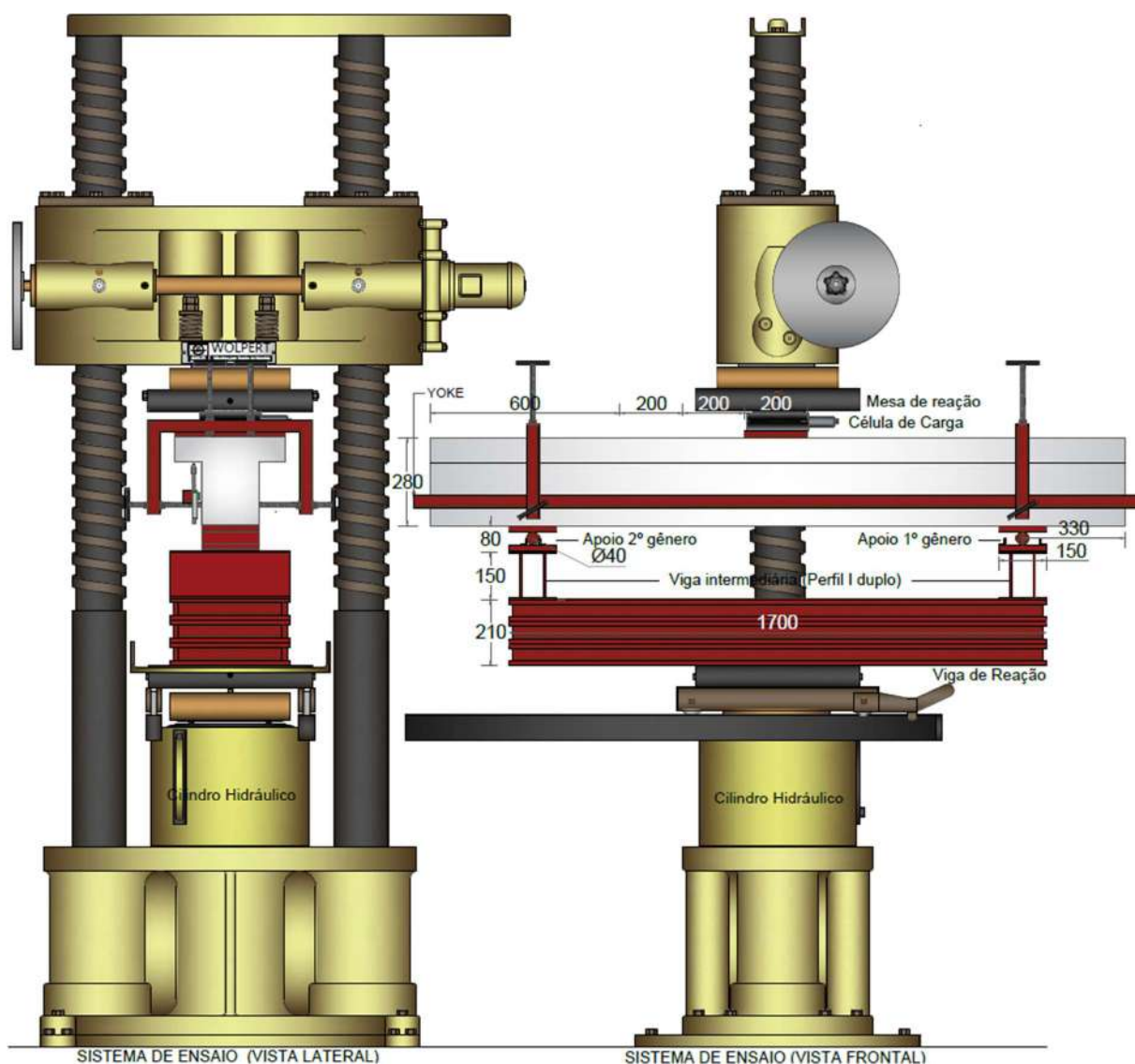


Figura 3.4 - Sistema de ensaio (mm).

3.4 Instrumentação

3.4.1 Deslocamentos verticais

Cinco medidores de deslocamento foram fixados em uma barra metálica fixa externa ao sistema (yoke), o êmbolo dos medidores ficaram apoiados na aba da mesa da viga, conforme mostra a Figura 3.5. O objetivo desta instrumentação foi medir os deslocamentos verticais ao longo do vão e obter a curvatura das vigas em diferentes passos de carga.

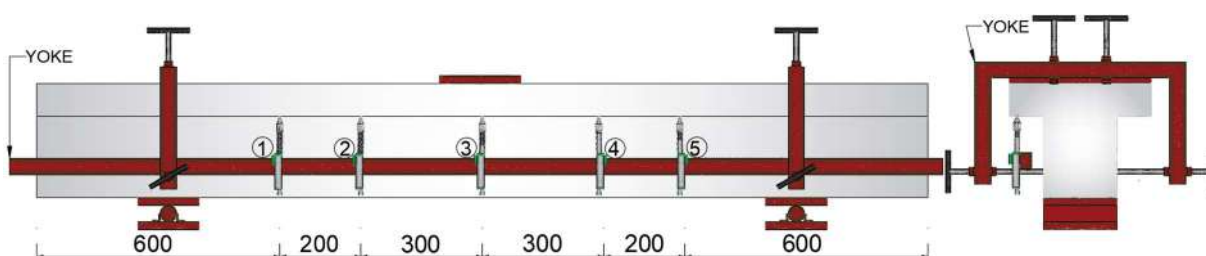


Figura 3.5 - Posicionamento dos potenciômetros para medir os deslocamentos verticais (mm).

3.4.2 Abertura de fissuras

Quatro potenciômetros foram posicionados no meio do vão das vigas para medir as aberturas de fissuras de flexão. Um potenciômetro foi posicionado na face inferior fixado mais próximo das laterais para evitar conflito nas vigas reforçadas (4). Os outros três foram posicionados na face lateral das vigas, sendo um na região da armadura de flexão (5) outro próximo a metade da alma da viga (6) e por último próximo à mesa da viga (7). O objetivo desta instrumentação foi verificar o controle da abertura de fissuras das vigas reforçadas em relação a referência. A Figura 3.6 mostra o posicionamento dos potenciômetros.

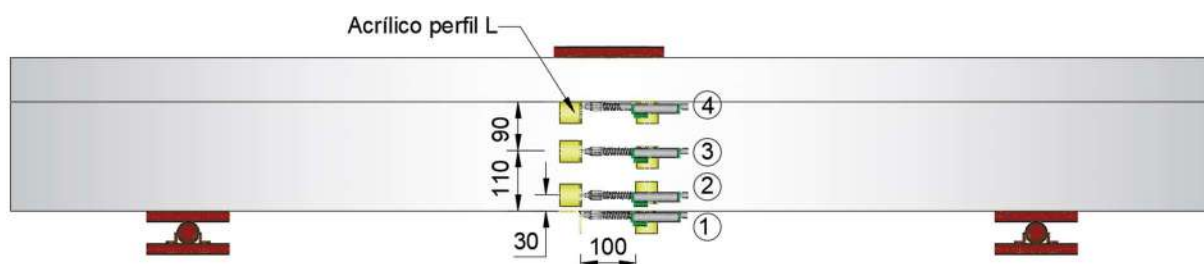


Figura 3.6 - Posicionamento dos LVDT's para medição das aberturas de fissuras (mm).

3.4.3 Deformações de flexão.

Para acompanhar as deformações de flexão ocorridas nas vigas, isto é, a tração nas armaduras longitudinais e a compressão do concreto, foram utilizados extensômetros elétricos de resistência. A Figuras 3.7 mostra a instrumentação dos dois tipos de vigas estudados, com três extensômetros no aço tracionado e comprimido e três extensômetros na superfície do concreto comprimida. Os extensômetros das armaduras de flexão tiveram um pequeno deslocamento no posicionamento devido ao conflito com as armaduras transversais.

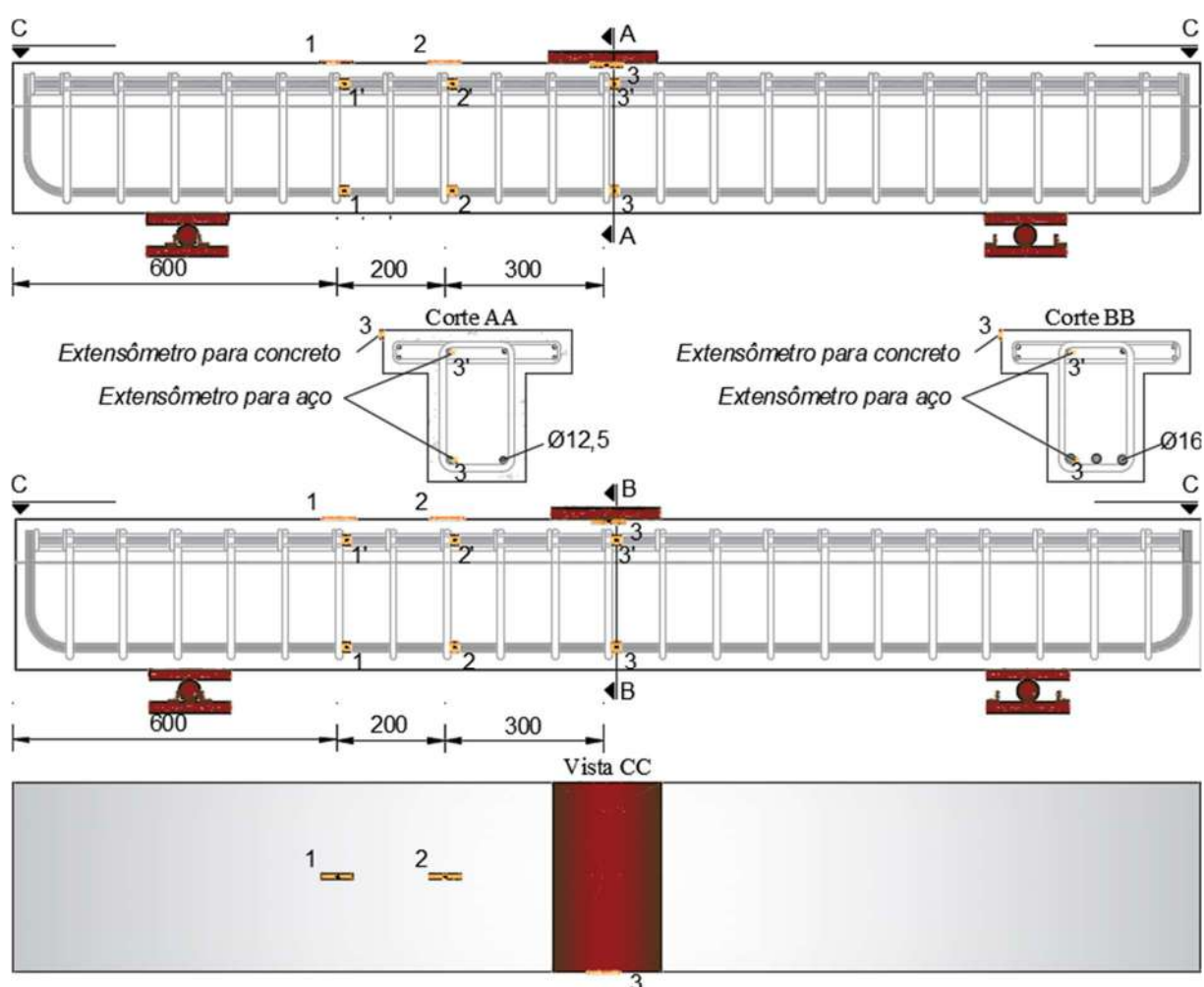


Figura 3.7 - Posicionamento dos extensômetros nas vigas (mm).

3.4.4 Deformações e escorregamento do lamidado

Cinco extensômetros foram colados no eixo longitudinal do laminado ao longo do comprimento para obtenção de dados sobre a deformação dos laminados de cada

viga reforçada. Assim, foi possível deduzir a partir de que momento e o quanto o reforço será solicitado, além da compreensão da distribuição de deformações ao longo do comprimento do reforço. Os deslocamentos oriundos da movimentação do laminado em relação a viga, foram medidos por dois potenciômetros fixados nas vigas com os êmbolos fixos no laminado. A Figura 3.8 ilustra o posicionamento da instrumentação para as duas configurações de reforço.

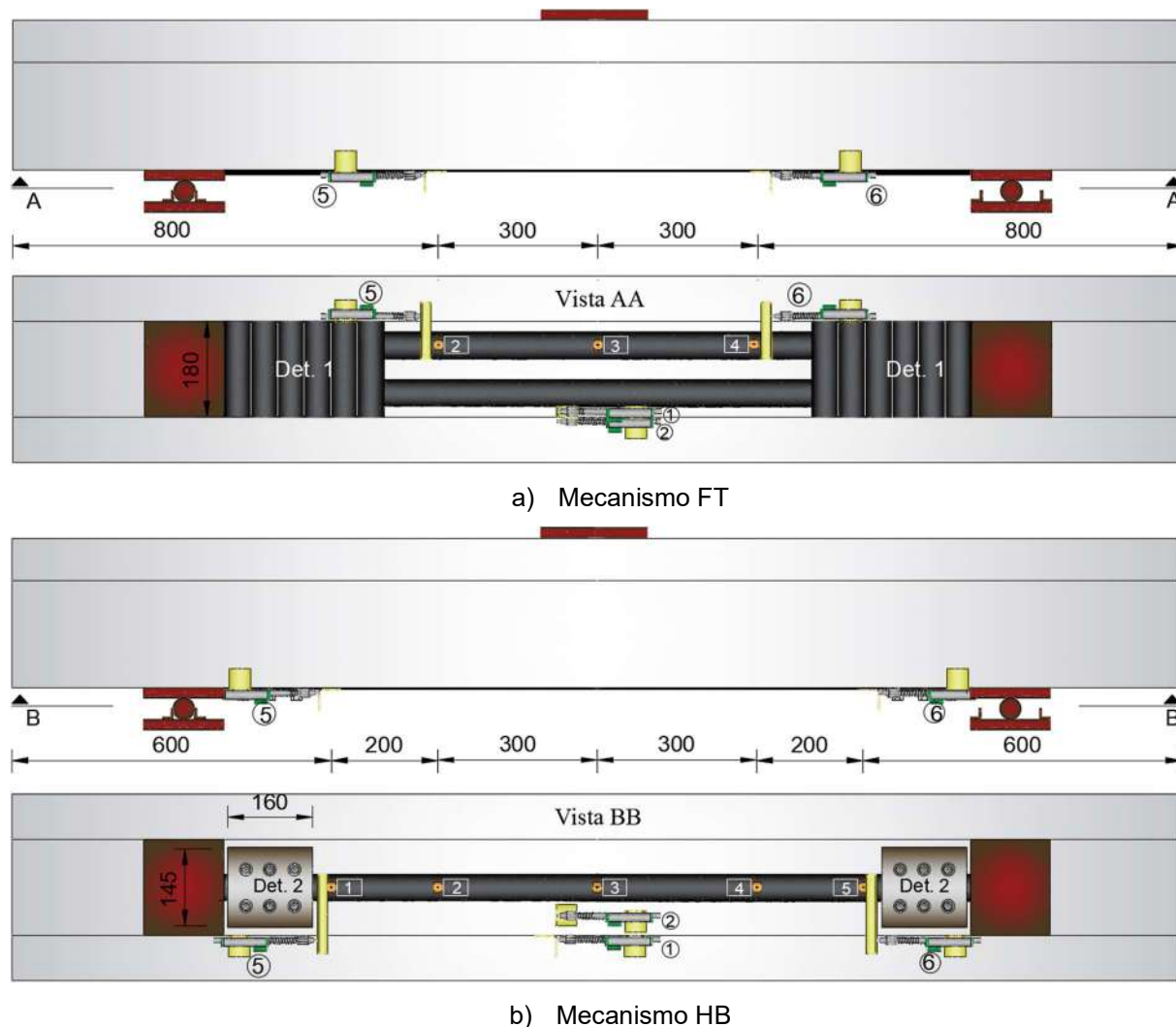


Figura 3.8 - Posição dos extensômetros e dos potenciômetros no laminado (mm).

3.5 Materiais

3.5.1 Caracterização do concreto

Utilizou-se a proporção de 1:1,6:2,4:0,43 correspondente ao Cimento Portland CP-III, areia natural, brita basáltica com diâmetro máximo de 19mm e água,

respectivamente. Simultaneamente à concretagem das vigas (Figura 3.10a), foram realizados testes de abatimento do tronco de cone (*Slump test*), conforme especifica a NBR 16889 (2020), por betonada, originando um *slump* médio de 13 ± 1 cm, também foram moldados nove Corpos de Prova (CPs) cilíndricos (Figura 3.19b) de 100mmx200mm por betonada, conforme a norma NBR 5738 (2015).

Os CPs ficaram expostos nas mesmas condições de exposição do elemento estrutural, desde os sete primeiro dias de cura, até o período do ensaio das vigas. Onde foram rompidos para a verificação da resistências médias do concreto à compressão (f_{ck}), tração por compressão diametral (f_{ct}) e módulo de elasticidade (E_c), onde foram obtidos 32MPa, 3,80MPa e 23,32Gpa, respectivamente. Estes ensaios foram realizados de acordo com as normas ABNT NBR 5739 (2015), ABNT NBR 7222 (2011), e ABNT NBR 8522 (2017). A Tabela 3.2 apresenta o resumo das características do concreto.



Figura 3.9 - Concretagem. a) Adensamento das vigas; b) Moldagem dos corpos de prova.

Tabela 3.2 – Características do Concreto.

Material	Traço utilizado por betonada			Propriedades mecânicas do concreto		
	Proporção	Quantidade (Kg)	<i>Slump test</i> (cm)	E_c (Gpa)	f_{ck} (Mpa)	f_{ct} (MPa)
Cimento	1,00	54,19	13±1	23,32	32 ± 3	3,80
Areia	1,60	78,04				
Brita	2,40	117,00				
Água	0,43	20,98				

3.5.2 Caracterização do PRFC e do aço

O sistema de ensaio de tração e as curvas de tensão/deformação do aço e do

laminado estão apresentados na Figura 3.10. O laminado de fibra de carbono utilizado no reforço foi produzido por pultrusão pela empresa MC Bauchemie e trata-se de um compósito com matriz de resina epóxi reforçado com fibra de carbono unidirecional. Cinco espécimes do laminado foram ensaiados à tração conforme instruções da ASTM D3039 (2021), e obteve-se tensão de ruptura (f_{tu}), módulo de elasticidade da fibra (E_f) e deformação máxima de 1824,75 MPa, 296,33 GPa e 6,65‰, respectivamente. A resina utilizada para a colagem do reforço nas vigas é um adesivo estrutural bicomponente à base de epóxi com densidade de 1,60 kg/dm³, módulo de elasticidade de 7,1 GPa e alongamento máximo de 0,01%.

As armaduras de flexão das vigas foram submetidas à ensaios de tração conforme a norma NBR ISSO 6892-1 (2018). Para o aço de 8,0mm obteve-se módulo de elasticidade de 231,7GPa, Tensão de escoamento de 524MPa e deformação de escoamento de 2,28‰. Para o aço de 12,5mm obteve-se módulo de elasticidade de 187,5GPa, Tensão de escoamento de 620MPa e deformação de escoamento de 3,31‰. Para o aço de 16mm obteve-se módulo de elasticidade de 191,4GPa, Tensão de escoamento de 576MPa e deformação de escoamento de 3,02‰. A Tabela 3.3 resume os resultados de caracterização desses materiais, além de mostrar as propriedades da resina, da chapa metálica e dos conectores utilizados no sistema HB.

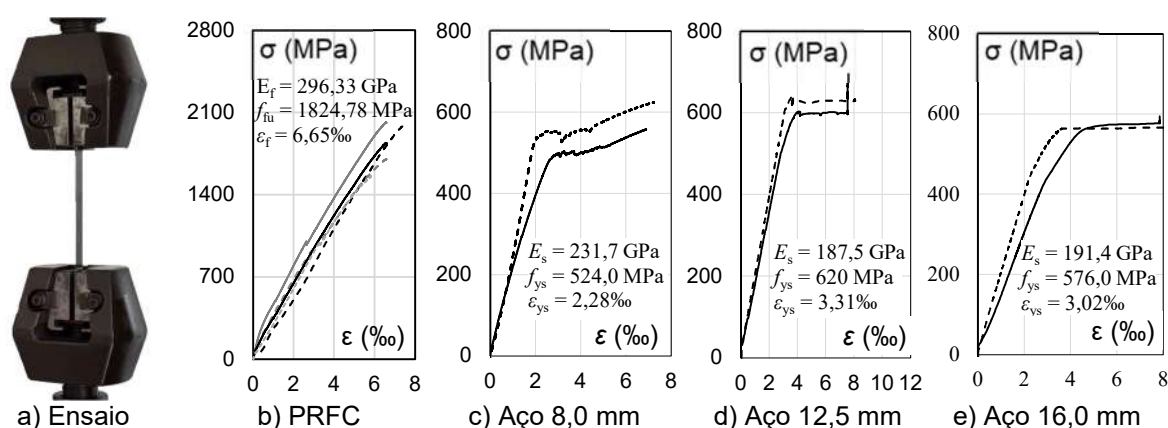


Figura 3.10 – Ensaio de tração do laminado e do aço das vigas.

Tabela 3.3 - Características mecânicas das armaduras.

Propriedades	PRFC	Resina Unidirecional Epoxi	Aço				
			Chapa	Conector	Armadura de flexão		
Espessura/diâmetro(mm)	1,2	1,0	8,0	12,5	8,0	12,5	16,0
Tensão de Ruptura à tração (Mpa)	1834,8	-	415,0	415,0	588,4	661,8	673,1
Tensão de escoamento (Mpa)	-	-	250,0	250,0	524,0	620,0	576,0
Módulo de elasticidade (Gpa)	296,3	7,1	215,0	215,0	231,7	187,5	191,4
Deformação (‰)	6,65	0,01	-	-	2,3	3,3	3,0

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Deslocamentos verticais

A Figura 4.1 apresenta as curvas de momento fletor em função do deslocamento vertical no meio do vão das vigas. Os eixos x representam o deslocamento vertical (δ) e os eixos y o momento fletor (M). As linhas contínuas em azul claro e escuro representam as vigas reforçadas e ancoradas com os mecanismos HB e FT, respectivamente. As vigas sem reforço (Ref.) estão representadas pela linha tracejada preta. Os mascadores representam a sucessão de eventos ocorridos durante os ensaios. As Figuras 4.1a e 4.1b mostram as vigas com taxa de aço de 0,44% e 1,12%, respectivamente.

O incremento de resistência e ductilidade foram verificados conforme definido anteriormente. A Tabela 4.1 apresenta os resultados das aferições no marco do momento na abertura de fissura (M_{cr}), escoamento do aço (M_y), Momento Máximo (M_{max}), Momento Último na ruptura do aço de flexão (M_u) e os seus respectivos deslocamentos δ_{cr} ; δ_y ; δ_{max} ; e δ_u .

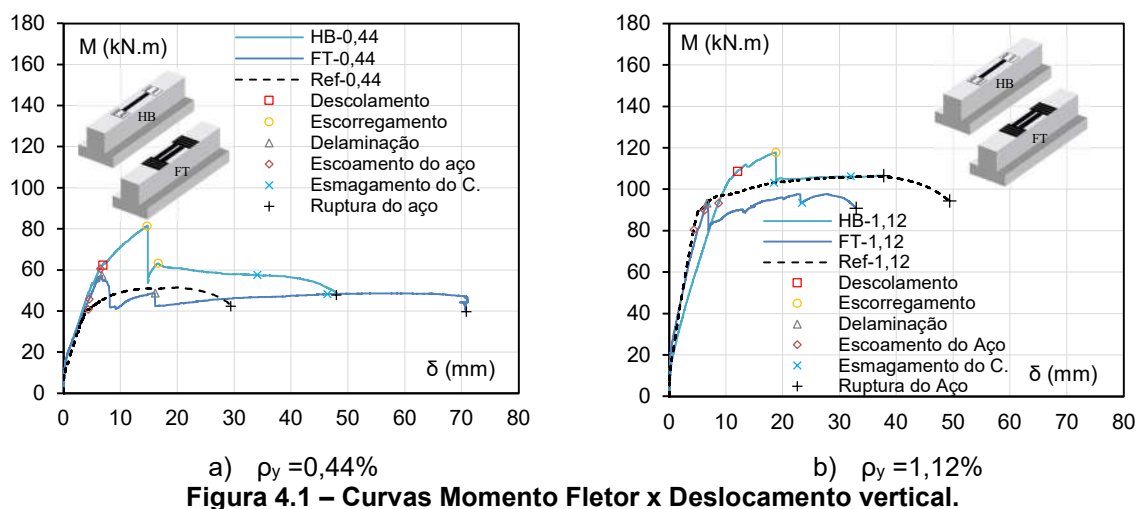


Tabela 4.1 - Resultados de carga, deslocamento, incremento de resistência e ductilidade.

Vigas	Momento (kN.m)				Deslocamento (mm)				Resistência			Ductilidade		
	M_{cr}	M_y	M_{max}	M_u	δ_{cr}	δ_y	δ_{max}	δ_u	$\frac{M_{cr}}{M_{Ref}}$	$\frac{M_y}{M_{Ref}}$	$\frac{M_{max}}{M_{Ref}}$	$\frac{\delta_{cr}}{\delta_{Ref}}$	$\frac{\delta_y}{\delta_{Ref}}$	$\frac{\delta_{max}}{\delta_{Ref}}$
Ref-0,44	10,41	40,86	51,53	42,29	0,12	4,33	19,75	19,36	-	-	-	-	-	-
FT-0,44	15,57	45,76	57,34	39,68	0,41	4,50	6,73	70,76	1,49	1,12	1,11	3,42	1,04	0,34
HB-0,44	15,76	60,57	81,67	47,85	0,40	6,45	14,76	47,93	1,51	1,48	1,58	3,33	1,49	0,75
Ref-1,12	12,81	80,47	106,32	94,38	0,01	4,31	36,58	49,30	-	-	-	-	-	-
FT-1,12	18,61	89,81	97,79	90,76	0,23	6,21	27,83	32,87	1,45	1,11	0,92	23,00	1,44	0,76
HB-1,12	18,42	93,42	117,72	106,52	0,57	8,68	18,78	37,72	1,45	1,16	1,10	57,00	2,01	0,51

Ao comparar o comportamento das vigas com diferentes taxas de aço, nota-se que para um mesmo nível de carregamento as vigas mais armadas apresentaram deslocamentos menores em relação às vigas menos armadas, essa diferença de rigidez está diretamente relacionada a variação da taxa de aço, uma vez que a taxa de reforço não variou.

A influência do reforço na rigidez dos elementos pode ser observada ao analisar os grupos de vigas individualmente. Nas vigas com menor taxa de aço houve um aumento da rigidez, ao comparar um mesmo nível de carregamento em relação à sua referência. O contrário foi observado nas vigas com maior taxa de aço, onde o reforço tornou o elemento mais flexível em relação à sua referência. Essa diferença parece estar relacionada ao escorregamento do reforço e a delaminação.

A ordem dos fenômenos foi comum aos mecanismos semelhante, em ambos os tipos de vigas. Nos elementos com HB, primeiro ocorreu o escoamento do aço, seguido do descolamento do reforço (DB), escorregamento do laminado (SL), Esmagamento do Concreto (EC) e a estricção do aço. Nas vigas com o sistema FT não houve o DB nem o SL, sendo observado o escoamento do aço seguido da delaminação do cobrimento de concreto (CC), EC e estricção do aço.

As vigas Ref-0,44; FT-0,44 e HB-0,44 alcançaram o momento máximo de 51,53kN.m, 57,34kN.m e 81,64kN.m, respectivamente. Enquanto as vigas Ref-1,12; FT-1,12 e HB-1,12 alcançaram 106,32kN.m; 97,79kN.m e 117,72kN.m, respectivamente. O incremento de resistência proporcionado pelo reforço foi maior nas vigas menos armada, com aumento de 11% e 58% na carga máxima para as vigas FT-0,44 e HB-0,44, respectivamente. Enquanto na viga HB-1,12 o incremento foi de 10% e na viga FT-1,12 não houve incremento.

Todas as vigas reforçadas apresentaram redução da ductilidade na carga máxima ($\delta_{max}/\delta_{Ref} < 1$). No caso das vigas com o sistema HB, a viga HB-0,44 apresentou uma perda de ductilidade de 25%, enquanto a HB-1,12 registrou uma redução mais significativa, de 49%. O comportamento oposto foi observado nas vigas com o sistema FT, sendo que a viga menos armada (FT-0,44) apresentou a maior perda de ductilidade, cerca de 66%, enquanto a viga FT-1,12 teve redução de 24%.

Ao analisar os deslocamentos verticais nos marcos de abertura de fissura (δ_{cr}/δ_{Ref}) e escoamento do aço (δ_y/δ_{Ref}), observa-se que os elementos reforçados foram mais flexíveis, especialmente no marco de abertura de fissura. Neste caso, o aumento em relação à referência foi mais acentuado, chegando a até 3,43 vezes nas

vigas menos armadas, como observado na FT-0,44, e alcançando um incremento de até 57 vezes na viga mais armada como observado na HB-1,12. Durante o escoamento do aço, os aumentos foram mais discretos, mas ainda relevantes, especialmente nas vigas com sistema HB, uma vez que a viga HB-0,44 apresentou um aumento de 49%, e a HB-1,12, de 100%. Já nas vigas FT, os aumentos foram de apenas 1% (FT-0,44) e 44% (FT-1,12), respectivamente.

Este comportamento está mais visível na Figura 4.2, que mostra os deslocamentos verticais ao longo do comprimento das vigas. De maneira geral houve pouco desbalanceamento na curvatura das vigas, sendo mais acentuados nas vigas onde houve a delaminação do cobrimento (FT-0,44 e FT-1,12). Isto ocorre devido a DC ocorrer somente em um dos vãos de cisalhamento, sem o descolamento da fibra, de modo que o outro vão permaneça com a influência do laminado. No caso das vigas HB-0,44 e HB-1,12 após o último escorregamento da fibra, a viga passa a ter influência à flexão somente da deformação residual do aço.

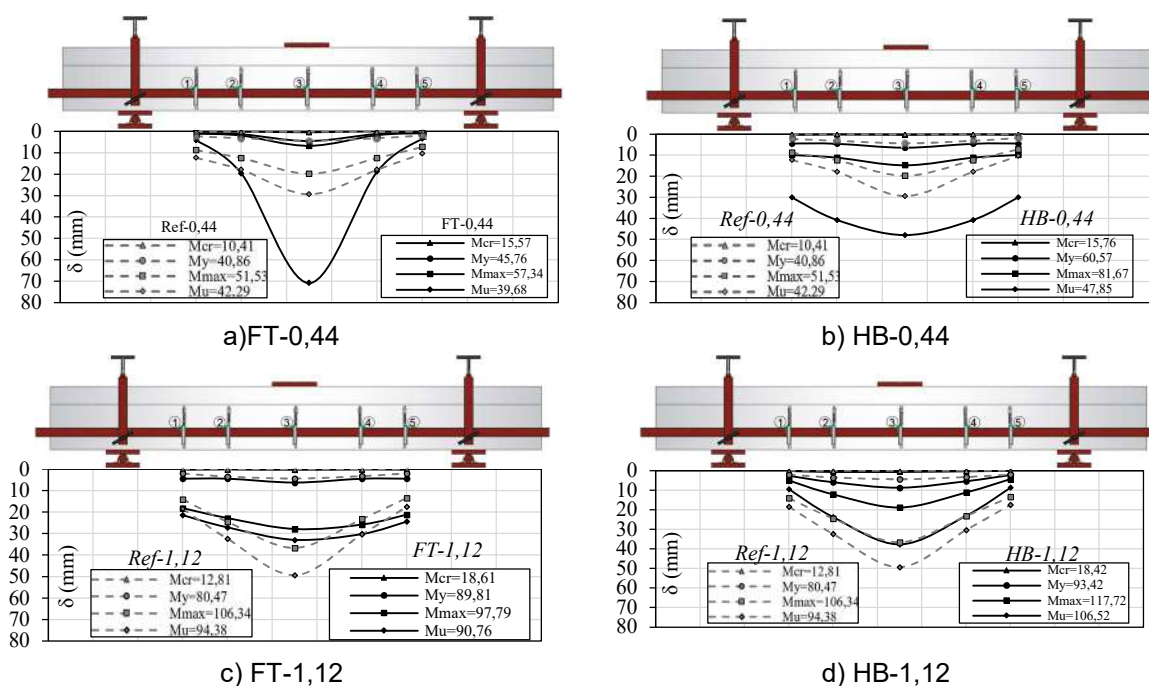


Figura 4.2 - Curvatura vertical.

4.2 Abertura de fissuras

A Figura 4.3 mostra o comportamento da abertura de fissuras durante os ensaios. O eixo y é referente ao momento (M) no meio do vão das vigas e o eixo x a abertura de fissuras (Cr). A linha contínua preta é referente ao potenciômetro

posicionado na face inferior da viga e as faixas subsequentes representam as leituras dos potenciômetros posicionados na face lateral das vigas, conforme definido no programa experimental.

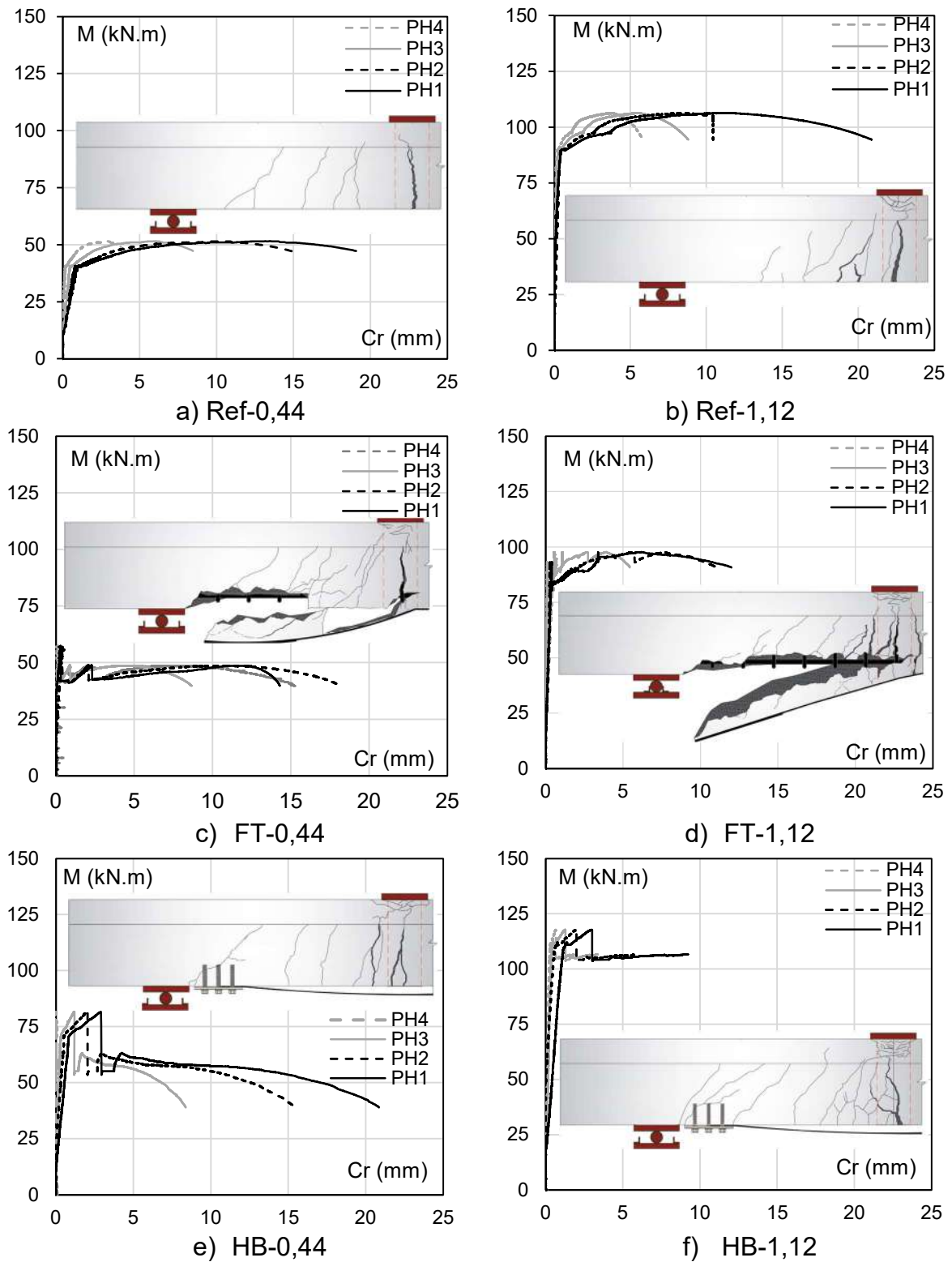


Figura 4.3 - Abertura de fissuras.

Nas vigas de referência a leitura foi precisa a uma fissura, nas demais vigas nota-se que há pelo menos duas fissuras compreendendo a faixa de leitura dos potenciômetros, destacada nas figuras com a linha tracejada vermelha. O padrão de fissuração mostrado nas figuras é referente ao estágio de carregamento último. As leituras dos potenciômetros 1 a 4 formam um padrão que obedece às leis de semelhança de triângulo. Observa-se o mesmo no pico das curvas e na última leitura, onde percebe-se uma escala bem definida entre as curvas.

Nota-se que para um mesmo nível de carregamento, as vigas com menor taxa de aço tiveram maior abertura de fissura em relação às vigas com maior taxa, isso é observado tanto nas vigas de referência quanto nas vigas reforçadas. As vigas reforçadas tiveram um maior controle da abertura de fissura durante a efetividade do reforço, em relação as suas respectivas referências. Não obstante, notam-se mais fissuras nas vigas reforçadas, com destaque para aquelas provocadas pelas ancoragens como fissuras de delaminação no sistema FT e fissuras de Pryout no mecanismo HB.

As vigas reforçadas aumentaram a carga de início de fissuração entre 45% e 51%. A abertura de fissura inicial medida pelo PH1 nas vigas Ref-0,44, FT-0,44 e HB-0,44 aconteceram com 10,41kN.m, 15,57kN.m e 15,76kN.m, respectivamente. Nas vigas Ref-1,12, FT-1,12 e HB-1,12 ocorreu com o carregamento de 12,84kN.m, 18,61kN.m e 18,42, respectivamente.

4.3 Deformações de flexão

A Figura 4.4 mostra os gráficos de momento fletor em função da deformação na seção do meio do vão das vigas ensaiadas. Os eixos y representam o momento fletor (M) e o eixo x representa a deformação (ϵ). A linha contínua cinza representa a deformação medida no concreto, as linhas pretas contínuas e tracejadas referem-se à deformações na armadura tracionada e comprimida, respectivamente, e a linha azul refere-se às deformações no laminado. As linhas vermelhas e tracejadas na vertical marcam a deformação de escoamento do aço (ϵ_{ys}) e de esmagamento do concreto (ϵ_c), e a horizontal marca o momento máximo alcançado.

Em todas as vigas é observado um aumento de deformação com a abertura de fissura inicial e manteve um comportamento linear até o escoamento do aço tracionado. Na viga Ref-0,44, houve o esmagamento do concreto, diferentemente das

demais onde as deformações do concreto alcançaram o seu limite de encurtamento ($-3,5\%$). No caso das vigas reforçadas, o esmagamento ocorreu somente após a carga máxima ser alcançada, uma vez que, as vigas reforçadas possuem um bloco de compressão maior em relação às vigas de referência, como pode ser observado nos perfis de deformação.

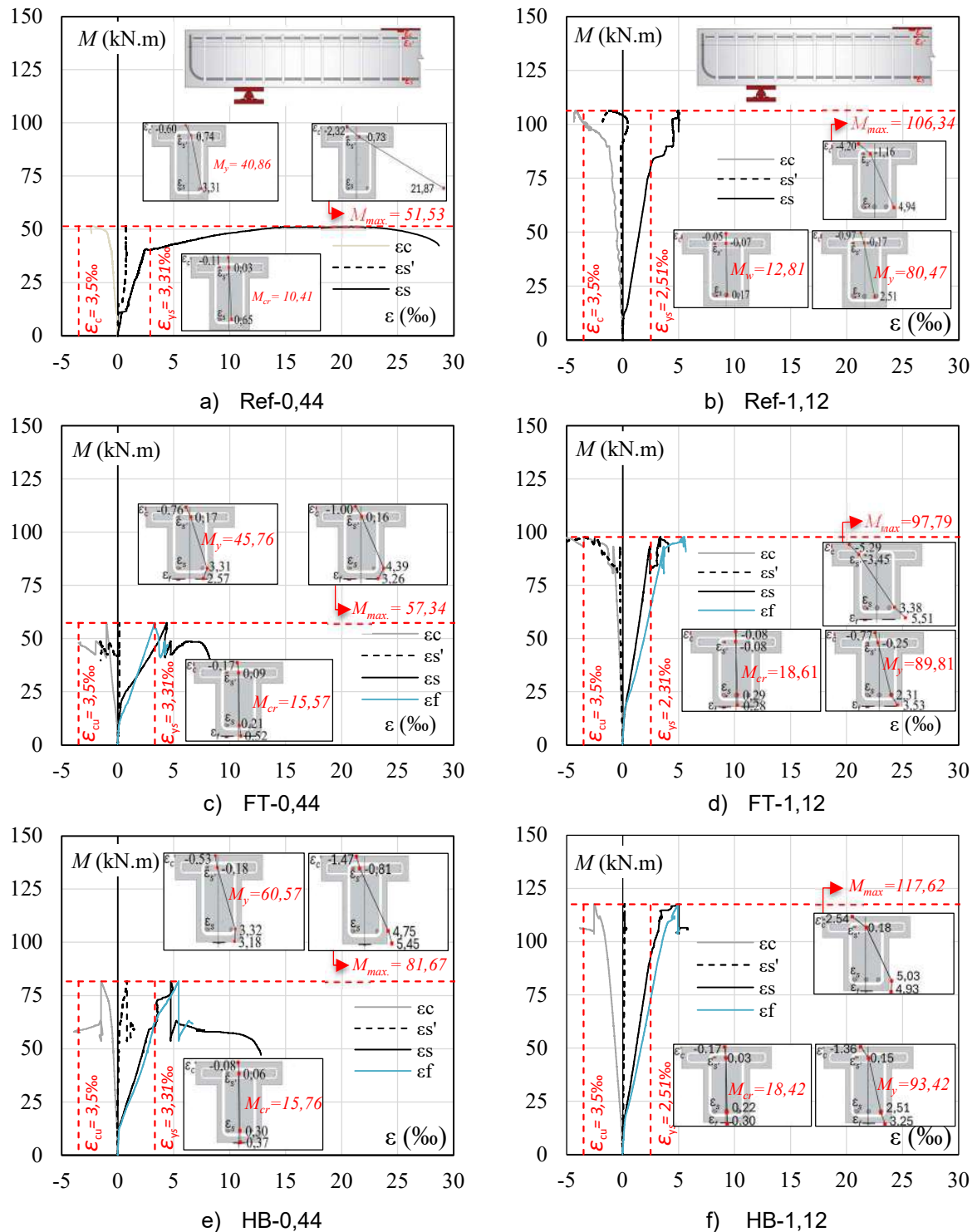


Figura 4.4 - Perfil de deformação no meio do vão.

A colaboração simultânea do aço e do laminado na resistência faz com que as cargas de escoamento do aço sejam maiores nas vigas reforçadas em relação às vigas de referência. As vigas Ref-0,44, FT-0,44 e HB-0,44 tiveram carga de escoamento do aço de 40,86kN.m, 45,76kN.m e 60,57kN.m, respectivamente. E nas vigas Ref-1,12, FT-1,12 e HB-1,12 o escoamento do aço ocorreu com 80,47kN.m, 89,81 kN.m e 93,43kN.m, respectivamente.

No caso das vigas com ancoragem FT, observa-se que o laminado continua influenciando o comportamento, mesmo após a delaminação. Na viga FT-0,44 (Figuras 4.3c) percebe-se este comportamento, onde a deformação do laminado é menor que a do aço, a partir de um determinado ponto. Provavelmente, devido ao progresso de fissuras de delaminação, aliviando as deformações no laminado. Este fator confirma-se na viga FT-1,12 (Figura 4.3d), onde não se observa distúrbios na deformação da fibra uma vez que a delaminação ocorreu na seção não monitorada.

A Figura 4.5 mostra o comportamento do laminado durante os ensaios das vigas reforçadas. Os eixos y representam o momento fletor (M) e os eixos x a deformação (ϵ). As curvas apresentadas referem-se às aferições dos extensômetros posicionados ao longo do comprimento do reforço. As linhas vermelhas e tracejadas na vertical representam as deformações de descolamento da ACI (ϵ_{fd}) e a observada no experimento (ϵ_{fdexp}).

Para um mesmo nível de carregamento, as vigas reforçadas com a ancoragem HB tiveram menores deformações no laminado, em relação às vigas reforçadas com o sistema FT com mesma taxa de aço. Note que não houve o descolamento do laminado nas vigas FT-0,44 e FT-1,12, confirmando a ideia da contribuição do reforço após a delaminação em um dos lados. Nas vigas HB-0,44 e HB-1,12 o descolamento ocorreu com uma deformação maior que a prevista pela ACI ($\epsilon_{fd} = 2,75\%$), sendo que o laminado descolou com a deformação de 3,49‰ e 3,77‰, respectivamente.

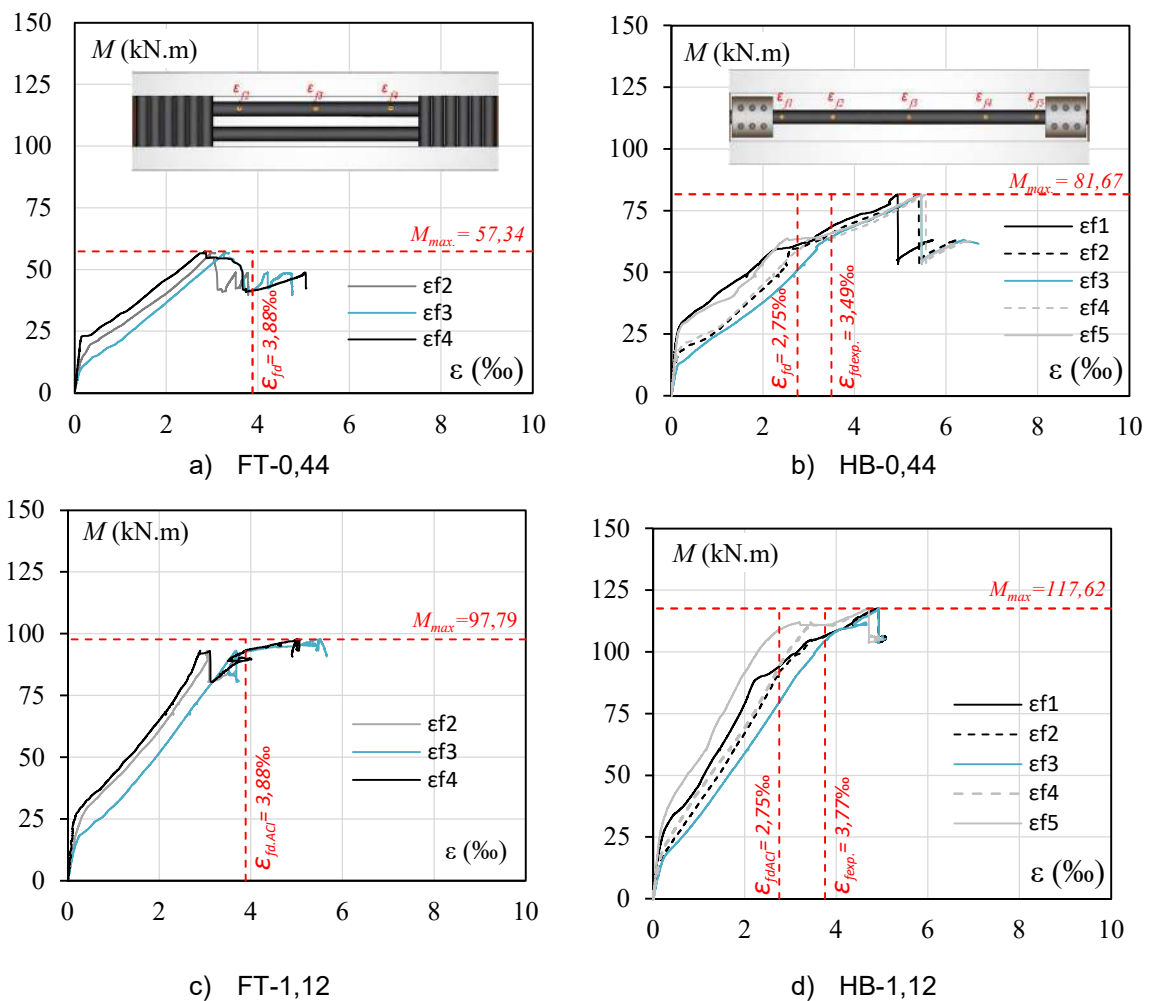
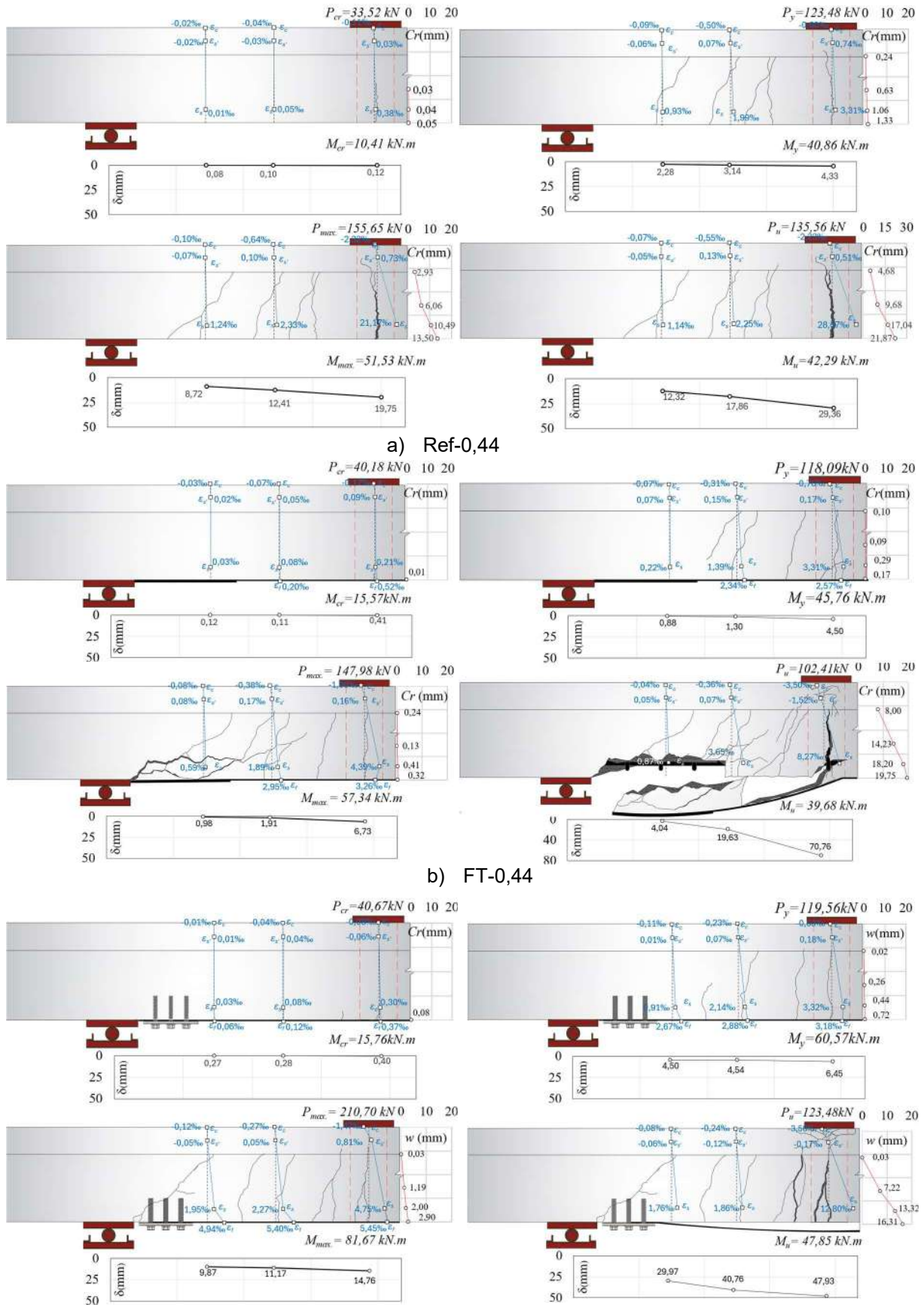


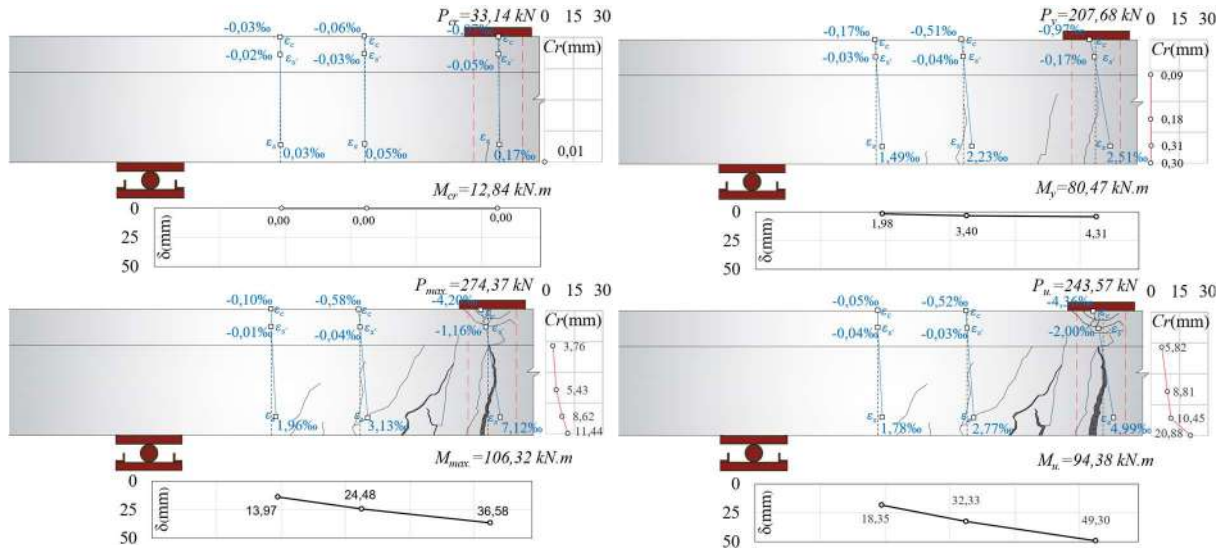
Figura 4.5 - Deformação no laminado.

As Figuras 4.6 e 4.7 mostra as vigas com taxa de aço de 0,44% e 1,12%, respectivamente. As figuras analíticas mostram o compilado das informações sobre deslocamento vertical, abertura de fissura, padrão de fissuração e o perfil de deformação. Além disso, a figura mostra o comportamento em diferentes estágios de carregamento, como na abertura de fissura inicial, no escoamento do aço, no carregamento máximo e no carregamento último.

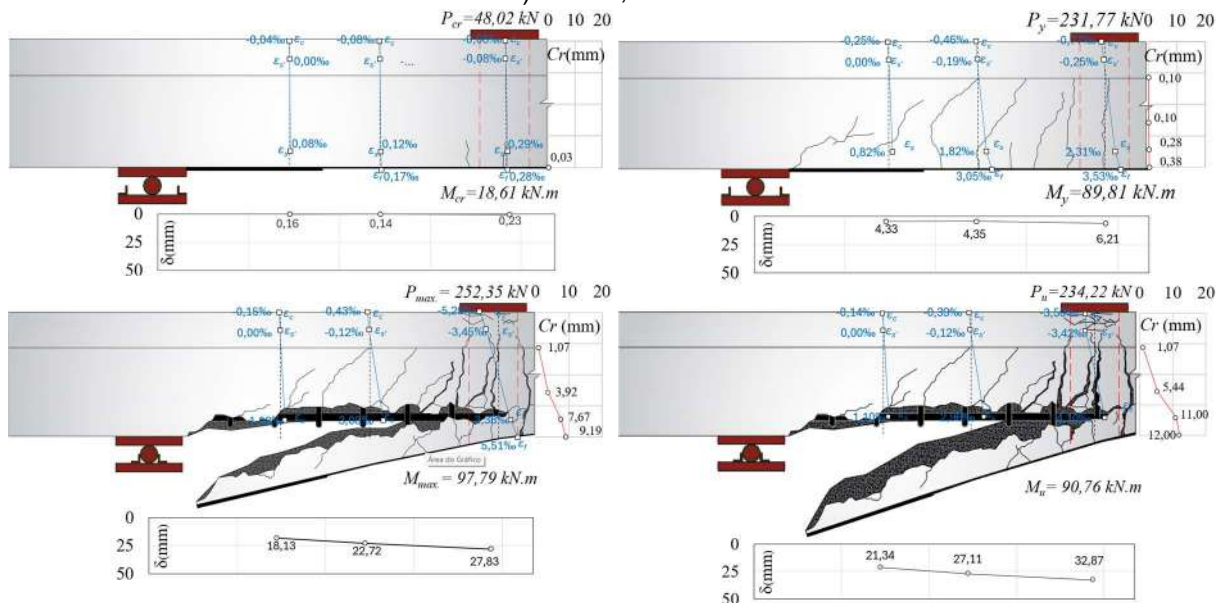
O comportamento observado nas vigas descreve a hipótese de Bernoulli-Euler, em que as seções planas permanecem planas. No entanto, no caso das vigas reforçadas com o sistema HB, esta teoria prevê o comportamento do elemento somente até o descolamento do reforço. Isto é, o reforço fica tracionado pelas ancoragens nas extremidades, de modo que as deformações ao longo do comprimento do reforço tendem a uniformizar-se, como pode ser observado na Figura 4.6c e 4.7c, no carregamento máximo.



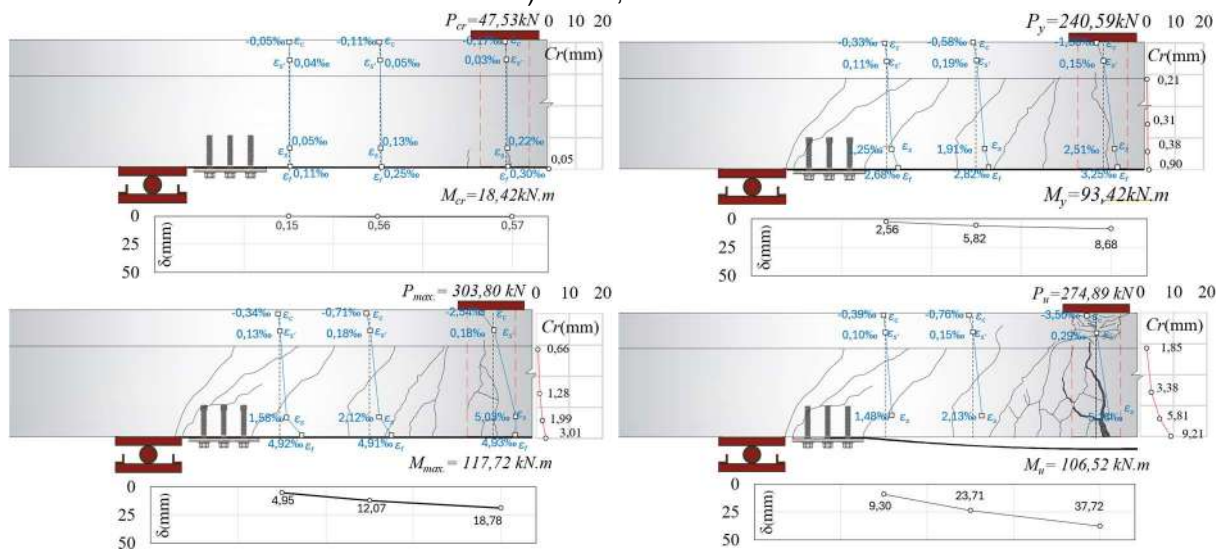
C) HB-0,44
 Figura 4.6 – Figura analítica vigas menos armadas.



a) Ref-1,12



b) FT-1,12



c) HB-1,12

Figura 4.7 - Figura analítica vigas mais armadas.

4.4 Escorregamento do Laminado

A Figura 4.8 mostra a relação entre o momento fletor no meio do vão e o escorregamento do laminado nas vigas reforçadas com ancoragem HB. Os eixos y representam o momento fletor e o eixo x representam o escorregamento do laminado em relação a ancoragem (S_L), o potenciômetro 5 está mais próximo do apoio de primeiro gênero e o 6 próximo ao de segundo gênero.

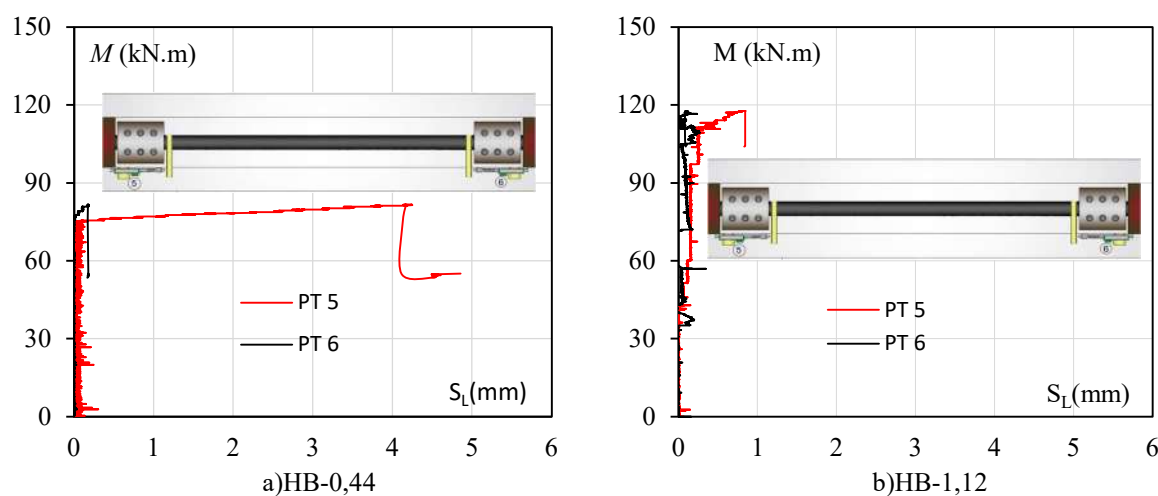


Figura 4.8 – Carregamento x Escorregamento do laminado.

O escorregamento próximo ao pico inicia simultaneamente em ambos os potenciômetros e intensifica-se em um dos lados. Na viga com menor taxa de aço (Figura 4.7a) ocorreu o escorregamento de 4,23mm antes da carga máxima. Na viga mais armada (Figura 4.7b) o escorregamento foi de 0,83mm antes do pico e demonstrou pequenos escorregamentos ao longo da curva, desde a abertura de fissuras. Isso justifica o comportamento desta viga em termos de maior flexibilidade para um mesmo nível de carregamento em relação a referência. Nas vigas com sistema FT não houve o escorregamento, mas o alívio do laminado pela delaminação do cobrimento também justifica o comportamento mais flexível da viga mais armada.

A Figura 4.9 mostra a relação entre a deformação no meio do vão e o escorregamento da fibra nas vigas HB. O eixo y representa a deformação (ϵ) e o eixo x representa o S_L . As linhas contínuas azul e preta representam as leituras de deformação no laminado (ϵ_f3) e no aço (ϵ_s3), respectivamente. As linhas vermelhas na horizontal representam a deformação na fibra durante o descolamento e a fissura de pryout. As linhas verticais vermelhas representam o momento fletor máximo.

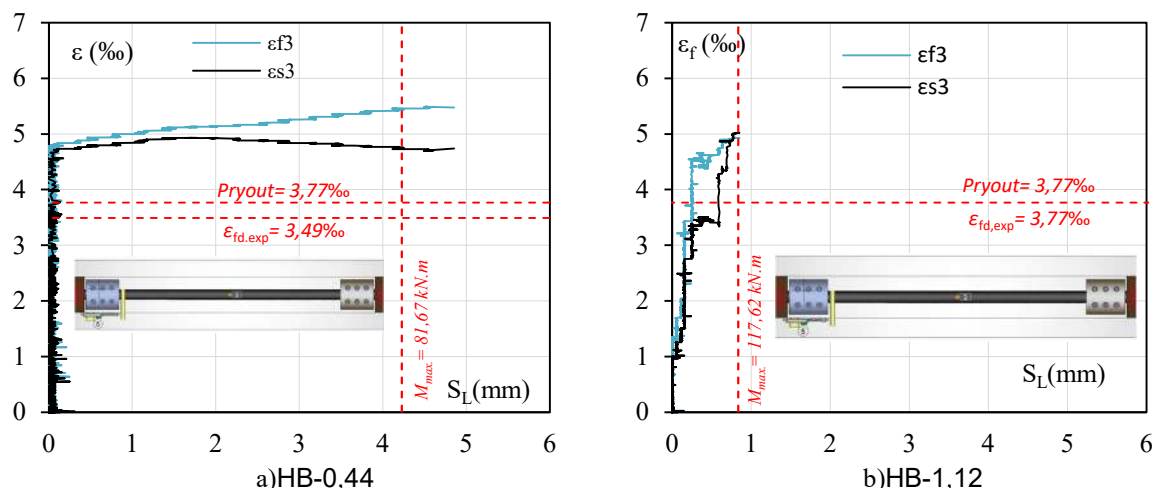


Figura 4.9 – Deformação no laminado x Escorregamento.

O descolamento da fibra faz com que as solicitações aumentem na ancoragem. Percebe-se este comportamento nas deformações de descolamento e de *pyuout*, mostradas nas Figuras 4.8a e 4.8b. Observa-se que a deformação do *pryout* ocorre imediatamente ou simultaneamente ao descolamento do laminado. Tanto na viga HB-0,44 quanto na viga HB-1,12 o Pryout ocorreu com deformação de 3,77‰. E o descolamento nas vigas HB-0,44 e HB-1,12 ocorreu com uma deformação no laminado de 3,49‰ e 3,77‰.

Observa-se também que durante o escorregamento a deformação na fibra continua aumentando linearmente e a deformação no aço não é afetada pelo fenômeno. Isso evidencia que mesmo durante o escorregamento, o controle da flexibilidade da viga depende do reforço até a efetiva funcionalidade da ancoragem.

Na viga HB-1,12 houveram escorregamentos no laminado na escala de 0,15mm durante a abertura de fissura e escoamento do aço. Na viga HB-0,44 não foram observadas interferências desses fenômenos no escorregamento. Na viga HB-0,44 e HB-1,12 o escorregamento ocorreu com a deformação máxima de 5,43‰ e 4,93‰, respectivamente.

Esta análise não foi feita para as vigas com o sistema FT porque não houve escorregamento. Nas Vigas FT-0,44 e FT-1,12 houve a delaminação do CC quando o laminado alcançou a deformação máxima de 3,26‰ e 3,75‰, respectivamente. As deformações na delaminação das vigas FT e descolamento das vigas HB são próximas. Até o momento da ruptura, as vigas com o sistema HB alcançam maiores deformações no reforço em relação às vigas com o sistema FT. A Tabela 4.2 apresenta os resultados de deformação.

Tabela 4.2 – Resultados de deformação.

Vigas	Delaminação	Descolamento ACI	Descolamento Experimental	Pryout	Escorregamento	
FT-0,44	3,26‰	3,88‰	-	-	-	-
FT-1,12	3,75‰	3,88‰	-	-	-	-
HB-0,44	-	2,75‰	3,49‰	3,77‰	5,43‰	4,94‰*
HB-1,12	-	2,75‰	3,77‰	3,77‰	4,93‰	4,92‰*

Obs: * Deformação na região próxima à ancoragem.

Sabe-se que a resistência à delaminação do cobrimento ocorre em função da resistência do concreto ao cisalhamento (V_c). Isto infere que as limitações observadas em ambos os mecanismos de ancoragem testados foram em função da resistência do concreto, tanto na delaminação do CC, no descolamento (considerando que houve o destacamento da superfície de concreto), no pryout e no escorregamento (considerando que houve o destacamento da superfície de concreto na região da ancoragem HB). O mecanismo de ancoragem HB serviu também para confinar o CC.

4.5 Modos de ruptura

Todas as vigas foram ensaiadas até a estricção da armadura de flexão e as imagens apresentadas neste capítulo foram registradas após o ensaio. Todas as vigas romperam à flexão. A Figura 4.10 mostra o modo de ruptura das vigas de referência, tanto na Ref-0,44 quanto na Ref-1,12 são observadas fissuras de flexão mais acentuadas no meio do vão e o esmagamento do concreto. Em ambas ocorreu primeiro o escoamento do aço e depois o esmagamento do concreto.

Nas vigas reforçadas com o sistema FT o modo de ruptura foi a delaminação do cobrimento de concreto. Isto é observado tanto na viga FT-0,44 (Figura 4.11) quanto na viga FT-1,12 (Figura 4.12). Nestas vigas primeiro ocorreu o escoamento do aço, seguido da delaminação e posterior esmagamento do concreto.

As Figuras 4.13 e 4.14 mostram o modo de ruptura das vigas HB-0,44 e HB-1,12, respectivamente. Nas duas ocorreu primeiro o escoamento do aço, depois o descolamento da fibra seguido da abertura de fissura de Pryout, escorregamento da fibra, e por último o esmagamento do concreto. Durante o ensaio observou-se que o descolamento ocorre do meio do vão em direção as ancoragens.

Nas vigas com sistema HB o escorregamento ocorreu na interface laminado/concreto. O aspecto do engrenamento dos mecanismos mostrados nas Figuras 4.13e e 4.14e, neste tipo de escorregamento. Nota-se que a resina da

superfície laminado/chapa apresenta uma impressão característica de estar compacta e a superfície do concreto está destacada na ligação laminado/concreto.

Outro aspecto a ser considerado é da interação resina/chapa. Note que a superfície das chapas de aço está lisa, sugerindo que a resina não aderiu bem à superfície metálica. Neste caso, confirma-se que a efetividade da ancoragem HB está em função da pressão exercida pelo torque na ancoragem. Nesse sentido, compreende-se que o fenômeno do descolamento teve influência do pryout, uma vez que, com o surgimento e aumento da fissura a massa de concreto se movimenta na região da ancoragem diminuindo a área confinada pelos conectores.

A Tabela 4.3 apresenta a sucessão de eventos que compunha os modos de ruptura das vigas.

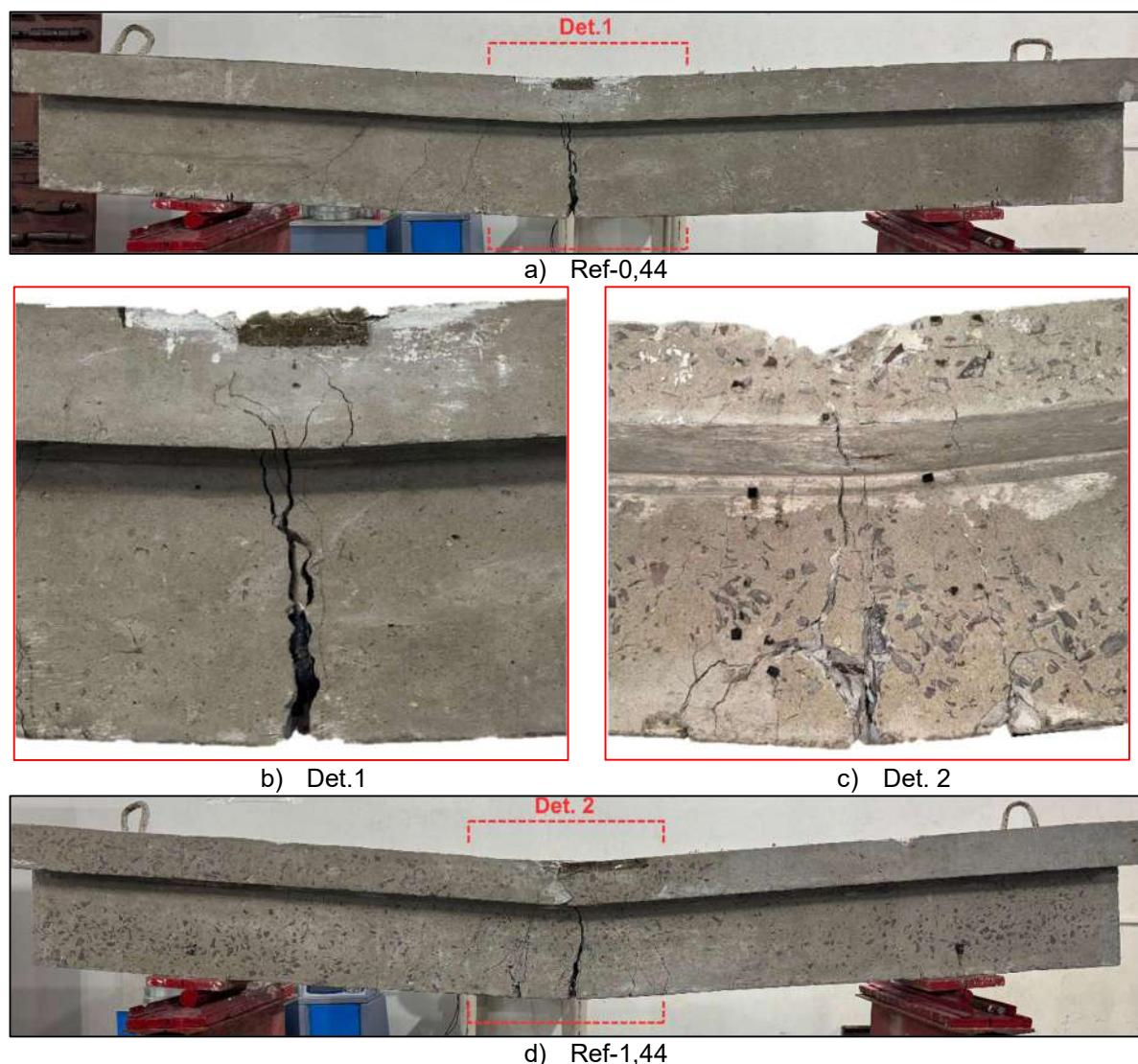
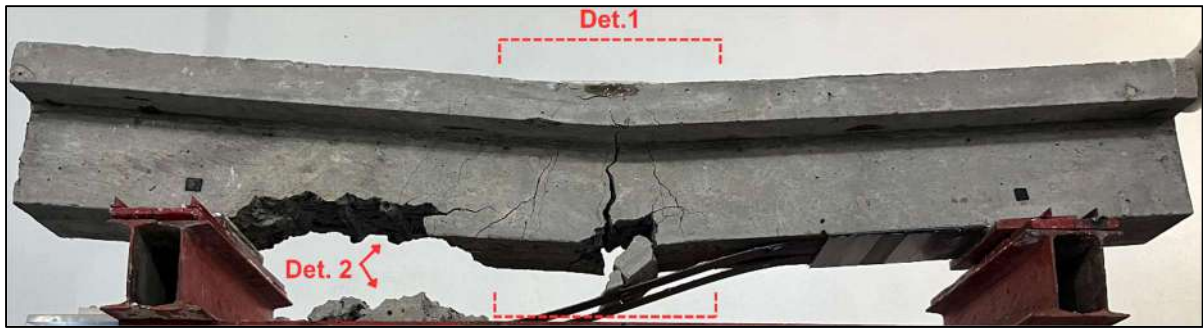


Figura 4.10 – Modos de ruptura das vigas de referência.



a) Viga FT-0,44



b) Det. 1



c) Det. 2 – Delaminação CC e destacamento do concreto



Figura 4.11 – Modo de ruptura da viga FT-0,44.



a) Viga FT-1,44



b) Det. 1

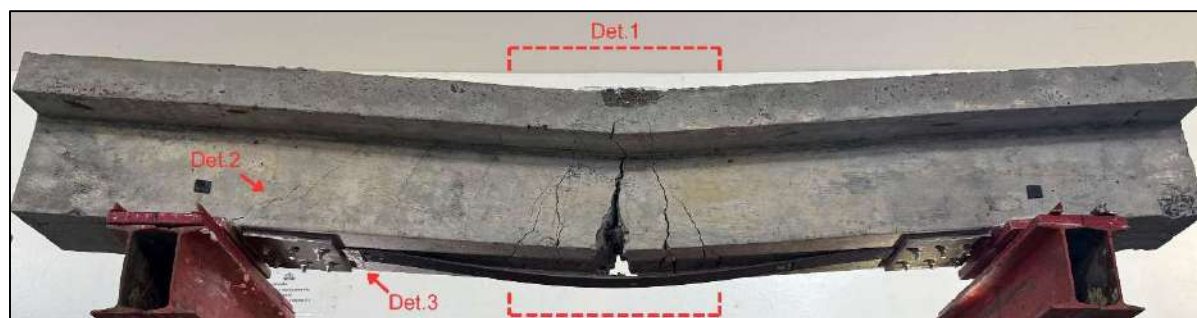


c) Det. 2- Delaminação do CC



d) Det. 3 – Fibra colada

Figura 4.12 – Modo de ruptura da viga FT-1,12.



a) Viga HB-0,44



b) Det. 1



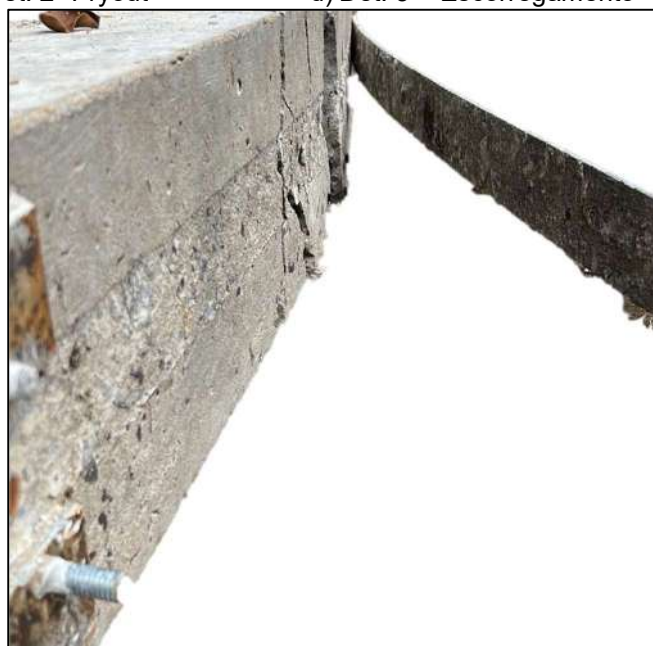
c) Det. 2- Pryout



d) Det. 3 – Escorregamento



e) Superfície chapa/laminao/concreto



f) Destacamento do concreto

Figura 4.13 – Modo de ruptura da viga HB-0,44.**Tabela 4.3 – Modo de ruptura.**

Vigas	Modo de Ruptura	Sucessão de eventos					
		1º	2º	3º	4º	5º	6º
Ref-0,44	Flexão	Escoamento do aço	Esmagamento do C.	Estricção do Aço	-	-	-
Ref-1,12			Delaminação do CC	Esmagamento do C.	Estricção do Aço	-	-
FT-0,44			Descolamento	Pryout	Escorregamento	Esmagamento do C	Estricção do Aço
FT-1,12							
HB-0,44							
HB-1,12							



a) Viga HB-1,16



b) Det. 1



c) Det. 2-Pryout



d) Det. 3- Escorregamento



e) Superfície chapa/laminao/concreto



f) Destacamento do concreto

Figura 4.14 – Modo de ruptura da viga HB-1,12.

4.6 Análise das limitações dos mecanismos HB e FT

A Figura 4.15 mostra a relação entre o incremento de resistência (M_{max}/M_{Ref}) em relação a taxa de reforço (ρ_f), para os mecanismos HB (Figura 4.15a) e para os mecanismos FT (Figura 4.15b). Os marcadores vermelhos representam as vigas

testadas nesta pesquisa e os demais marcadores referentes às vigas da literatura com mesmo mecanismo de ancoragem ou parecidos.

Observa-se que a tendência crescente de incremento de resistência da ancoragem HB não se mantêm para uma maior taxa de reforço, sendo que ela estaciona em função da resistência do pryout. E no caso da ancoragem FT e seus semelhantes observa-se que uma maior taxa de reforço torna a ancoragens menos eficientes ao incremento de resistência. De maneira geral, as vigas com maior taxa de aço possuem menores incrementos de resistência em relação às vigas menos armadas.

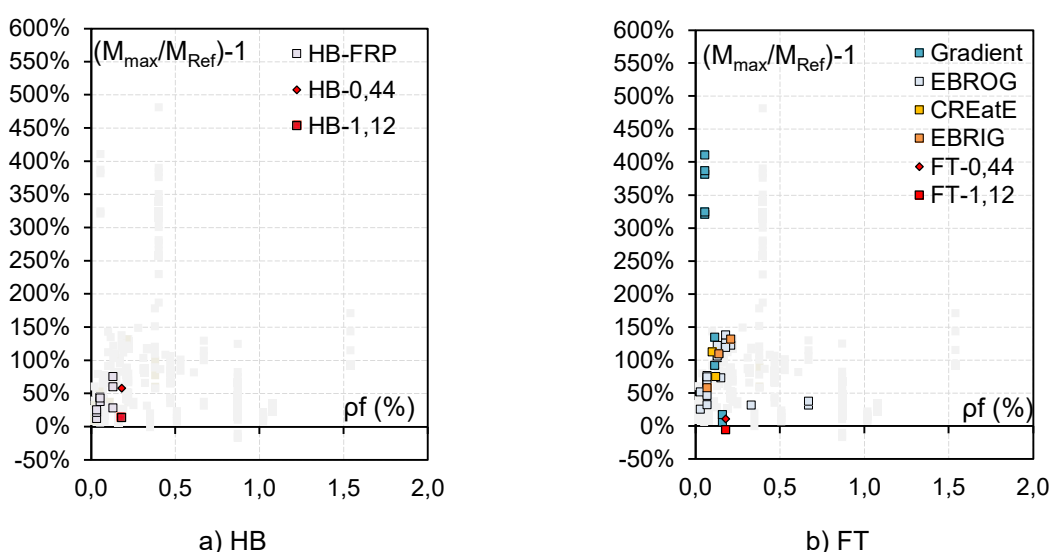


Figura 4.15 – Relação entre o incremento de resistência e taxa de fibra.

A Figura 4.16 mostra a relação entre o incremento de ductilidade ($\delta/\delta_{Ref.}$) em relação a taxa de reforço (ρ_f), para os mecanismos HB (Figura 4.16a) e para os mecanismos FT (Figura 4.16b). Os marcadores vermelhos representam as vigas testadas nesta pesquisa e os demais marcadores referentes às vigas da literatura com mesmo mecanismo de ancoragem ou semelhantes.

No caso das vigas HB, observa-se que a viga com menor taxa de aço (HB-0,44) perdeu menos ductilidade em relação à mais armada (HB-1,12). Nota-se que há uma tendência de incremento de ductilidade para vigas com menor taxa de fibra. Os casos de redução da ductilidade observados na Figura 4.16a estão relacionados à ruptura do FRP enquanto as vigas que geraram aumento estão relacionadas a falhas nos mecanismos de ancoragem como arrancamento e perda de engrenamento.

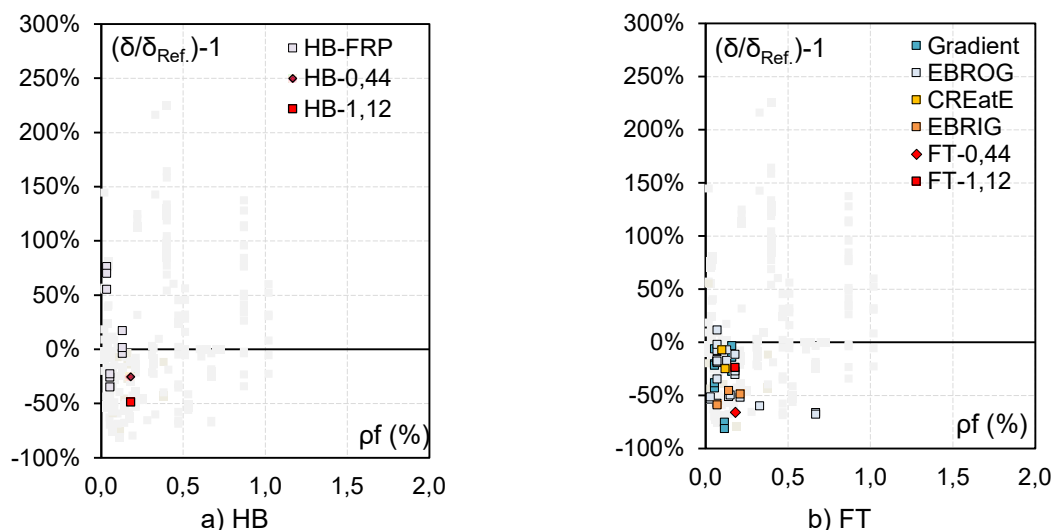


Figura 4.16 – Relação entre o incremento de ductilidade e taxa de fibra.

No grupo de ancoragens relacionadas ao FT nota-se que a tendência de redução da ductilidade com o aumento da taxa de fibra se manteve. Nas vigas testadas nesta pesquisa observou-se que há uma relação entre a taxa aço na perda da ductilidade. Diferentemente das vigas com mecanismo HB, as vigas com o mecanismo FT a maior redução da ductilidade ocorreu na viga menos armada (FT-0,44).

4.7 Análise das recomendações normativas

A Figura 4.17 mostra a análise da estimativa de incremento de resistência das normas ACI 440-2R (2017). O eixo y representa o momento máximo obtido no ensaio experimental ($M_{máx.,exp.}$) e o eixo x representa o momento máximo estimado pela norma ACI ($M_{máx.,ACI.}$). O marcador quadrado representa as vigas com taxa de aço de 0,44% e os marcador circular representam as vigas com taxa de aço de 1,12%. Os marcadores com cor cinza representam as vigas com o mecanismo FT e as pretas representam aquelas com mecanismo HB. A linha diagonal vermelha representa a relação entre o experimental e o teórico.

Vale destacar que esta norma não estima a contribuição da ancoragem na resistência, mas indica a utilização no caso em que são previstas falhas prematuras de descolamento e delaminação do cobrimento. Assim, foram feitas duas análises, a primeira considerando a deformação do laminado limitada ao descolamento da norma (ϵ_{fd}), como mostra a Figura 4.17a. E a segunda foi feita considerando a deformação de ruptura obtida nos ensaios das fibras (ϵ_{fu}) como mostra a Figura 4.17b.

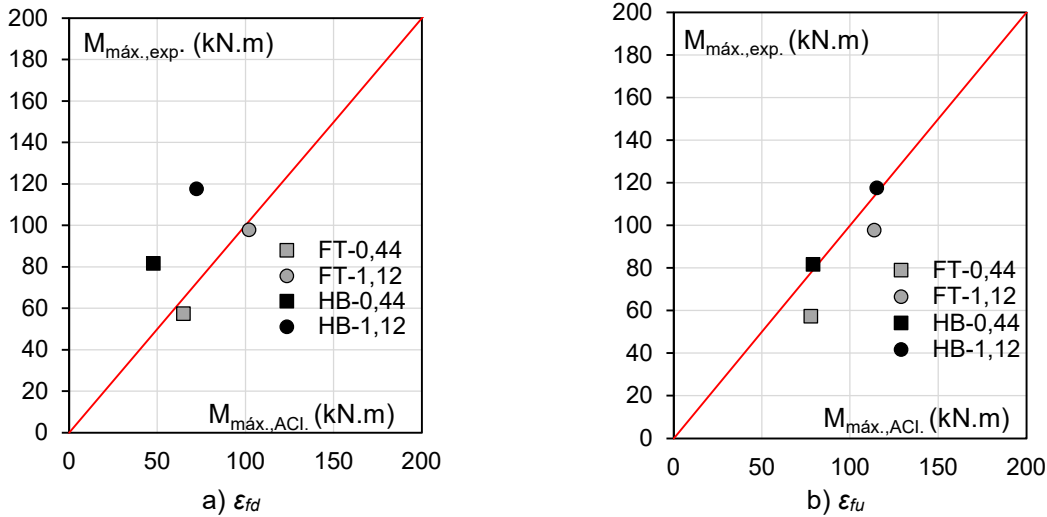


Figura 4.17 – Previsão teórica x Experimental.

Na análise com a deformação de descolamento da norma, nas vigas com o sistema HB, a previsão foi mais conservadora para aquela com menor taxa de aço, sendo que a viga HB-0,44 o experimental foi 71% maior que o teórico, e na viga HB-1,12 a diferença foi de 63%. Nas vigas com o mecanismo FT a resistência obtida no ensaio experimental foi menor que a obtida na previsão normativa, devido ao modo de ruptura por delaminação do cobrimento. Ao analisar-se as previsões, considerando a deformação de ruptura do laminado, observa-se que o dimensionamento fica muito preciso. Assim, para uma situação de projeto, é recomendado utilizar a limitação da norma, até que se estabeleça uma relação a favor da segurança para esses mecanismos de ancoragem HB.

A Tabela 4.4 compara os resultados teóricos e experimentais com base nas normas ACI 440.2R (2017) e ACI 318M (2025). A verificação do cisalhamento do conector foi satisfatória, pois a força no laminado ficou abaixo do previsto. No caso do pryout, a norma identificou o fenômeno, mas superestimou a carga. Já no breakout, apesar da previsão de menor resistência, a falha não ocorreu devido à presença da armadura interna, não considerada pela norma.

Tabela 4.4 – Previsões normativas.

Vigas	ACI 440 2R (2017)						ACI 318 M (2025)							
	Delaminação do cobrimento (kN)			Momento resistente (kN.m)			Cisalhamento do conector (kN)			Pryout (kN)		Breakout (kN)		
	V_c	f_f	V_c/f_f	M_n	$M_{Exp.}$	$M_n/M_{Exp.}$	V_{sa}	f_f	V_{sa}/f_f	V_{cpq}	f_f	V_{cpq}/f_f	V_{cbg}	f_f
HB-0,44	-	-	-	47,63	81,67	0,58	117,34	100,78	1,16	93,66	76,9	1,22	77,86	-
HB-1,12	-	-	-	72,09	117,62	0,61		100,37	1,17		76,9	1,22		-
FT-0,44	39,2	66,5	0,59	64,75	57,34	1,13	-	-	-	-	-	-	-	-
FT-1,12	37,8	76,5	0,49	101,81	97,79	1,04	-	-	-	-	-	-	-	-

Obs: - (Não se aplica ou não ocorreu)

5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Nesta pesquisa foi realizada uma série de ensaios experimentais, com o objetivo de avaliar os efeitos da taxa de armadura existente (0,44% e 1,12%) e do mecanismo de ancoragem no desempenho à flexão de vigas de concreto armado reforçadas com laminado de fibra de carbono.

Para tanto, seis vigas foram moldadas, sendo três para cada taxa de aço. Destas, uma serviu de referência sem reforço, as outras duas foram reforçadas com diferentes sistemas de ancoragem, como a ancoragem metálica baseada na fricção e atrito (*Hybrid Bonded* - HB) e com ancoragem baseada no aumento da área colada utilizando tiras do laminado (FT).

O reforço foi aplicado na face inferior das vigas ao longo do vão de flexão. As peças foram submetidas ao ensaio de flexão simples de três pontos. Os resultados de deflexão, momento fletor máximo, abertura de fissuras, deformações e modo de ruptura foram comparados e discutidos.

5.1 Conclusões

5.1.1 Eficiência do reforço no incremento de resistência.

Com base nos resultados de incremento de resistência, observa-se que a taxa de armadura existente influencia diretamente a rigidez e o desempenho estrutural das vigas reforçadas. As vigas com menor taxa de aço (0,44%) apresentaram maior incremento de resistência, com aumentos de 11% (FT-0,44) e 58% (HB-0,44) na carga máxima em relação às respectivas referências.

Nas vigas com maior taxa de aço (1,12%), o reforço mostrou eficácia limitada. Sendo que a viga HB-1,12 teve um aumento de apenas 10%, e a viga FT-1,12 não apresentou ganho de resistência. As vigas HB-0,44 e HB-1,12 tiveram momento fletor máximos de 81,64 kN·m e 117,72 kN·m, respectivamente, evidenciando o maior potencial do sistema HB em comparação ao FT, que alcançou 57,34 kN·m (FT-0,44) e 97,79 kN·m (FT-1,12).

5.1.2 Eficiência do reforço no incremento de ductilidade.

Em relação a ductilidade, todas as vigas reforçadas apresentaram redução de

deslocamento na carga máxima ($\delta_{\max}/\delta_{\text{Ref}} < 1$), variando conforme o tipo de ancoragem e a taxa de armadura. Nas vigas com o sistema HB, a perda foi menor na viga menos armada (HB-0,44), com 25%, enquanto a HB-1,12 apresentou redução de 49%. Já no sistema FT, ocorreu o inverso: a maior perda foi observada na viga FT-0,44 (66%), e a FT-1,12 teve redução de apenas 24%.

Apesar da redução da ductilidade na carga máxima, os elementos reforçados mostraram maior flexibilidade nos marcos de abertura de fissura ($\delta_{\text{cr}}/\delta_{\text{Ref}}$) e escoamento do aço ($\delta_y/\delta_{\text{Ref}}$), com destaque para aumentos expressivos nos deslocamentos, como 3,43 vezes na FT-0,44 e até 57 vezes na HB-1,12 no marco de fissuração. Durante o escoamento do aço, nas vigas HB, o aumento foi de 49% (HB-0,44) e 100% (HB-1,12), enquanto nas vigas FT os incrementos foram de 1% e 44%, respectivamente. Esses resultados evidenciam que, embora a ductilidade máxima seja reduzida com o reforço, a flexibilidade em estágios intermediários de carregamento pode ser significativamente maior.

5.1.3 Controle da abertura de fissuras

As vigas com menor taxa de aço apresentaram aberturas de fissura maiores para um mesmo nível de carregamento, comportamento observado tanto nas vigas de referência quanto nas reforçadas. O reforço não apenas aumentou a carga de início de fissuração, como também contribuiu para um controle mais distribuído e eficaz da abertura das fissuras ao longo do ensaio, retardando o início da fissuração em até 51%. A abertura inicial registrada pelo potenciômetro PH1 ocorreu com momentos de 10,41 kN·m (Ref-0,44), 15,57 kN·m (FT-0,44) e 15,76 kN·m (HB-0,44), o que representa um aumento de 49% e 51% para FT e HB, respectivamente, em relação à viga de referência. Para a taxa de armadura de 1,12%, os valores foram de 12,84 kN·m (Ref-1,12), 18,61 kN·m (FT-1,12) e 18,42 kN·m (HB-1,12), correspondendo a incrementos de 45% e 43%. Embora o número total de fissuras tenha sido maior nas vigas reforçadas, destaca-se que muitas delas são decorrentes das ancoragens, como fissuras de delaminação no sistema FT e fissuras de Pryout no sistema HB.

5.1.4 Modos de Ruptura

Todas as vigas ensaiadas apresentaram ruptura por flexão, sendo levadas até a estricção da armadura existente. As vigas de referência (Ref-0,44 e Ref-1,12)

romperam por escoamento do aço seguido do esmagamento do concreto, com fissuras concentradas no meio do vão.

Nas vigas reforçadas com o sistema FT (FT-0,44 e FT-1,12), o modo de ruptura caracterizou-se por delaminação do cobrimento de concreto, ocorrendo após o escoamento do aço e antes do esmagamento do concreto. Já nas vigas com o sistema HB (HB-0,44 e HB-1,12), observou-se uma sequência mais complexa: escoamento do aço, descolamento da fibra, abertura de fissura de pryout, escorregamento do laminado e, por fim, esmagamento do concreto.

Na ancoragem HB o escorregamento do laminado ocorreu na interface laminado/concreto. A análise das superfícies pós-ensaio indica falha na adesão entre resina e chapa metálica, sugerindo que a eficiência da ancoragem HB depende da pressão exercida pelo torque. Além disso, a eficiência desta ancoragem foi limitada pela propagação das fissuras de pryout comprometeu a região de ancoragem, ao reduzir a área confinada pelos conectores, influenciando o escorregamento.

5.1.5 Limitações dos mecanismos de ancoragem

A análise comparativa entre os mecanismos de ancoragem HB e FT e seus semelhantes da literatura, mostra indicadores que a eficiência da ancoragem está condicionada à taxa de fibra. Os mecanismos apresentam maior potencial de resistência com menores taxa de reforço. porém limitado por falhas localizadas como perda de engrenamento e/ou arrancamento dos parafusos no sistema HB, e perde de aderência e/ou resistência do concreto no sistema FT.

Há uma leve tendência de maior perda de ductilidade com o aumento da taxa de fibra, no entanto este fator está mais relacionado ao modo de ruptura dos elementos. As vigas com menores taxas de armadura existente tenderam a preservar melhor sua capacidade de deflexão quando reforçadas com o sistema HB. Enquanto nas vigas com sistema FT ocorreu o oposto: a maior perda de ductilidade foi registrada nas vigas menos armadas. Esses resultados reforçam a necessidade de compatibilização entre tipo de reforço, taxa de armadura e mecanismo de ancoragem para o desempenho ideal das estruturas reforçadas.

5.1.6 Análise das recomendações normativas

A comparação entre os momentos fletores máximos experimentais e os

previstos pela norma ACI 440.2R (2017) evidencia limitações do modelo normativo, sobretudo em situações envolvendo delaminação ou descolamento. Nas vigas com ancoragem HB, as previsões foram conservadoras: a viga HB-0,44 apresentou um momento fletor 71% superior ao estimado, e a HB-1,12, 63% superior. Em contrapartida, nas vigas com mecanismo FT, os valores experimentais ficaram abaixo das previsões, devido ao modo de ruptura por delaminação.

Quando se considera a deformação de ruptura real do laminado (ϵ_{fu}), os resultados experimentais se alinham com maior precisão às previsões, mas sem margem de segurança. Portanto, recomenda-se, em projetos, manter os limites normativos baseados em ϵ_{fd} até que se desenvolvam critérios mais seguros para considerar a influência dos mecanismos de ancoragem na resistência de elementos reforçados com FRP.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, recomenda-se investigar o comportamento de diferentes mecanismos de ancoragem sob ações de longa duração, como exposição à umidade, temperatura, cloretos e carregamento constante, o que se aplica tanto às ancoragens metálicas por atrito (HB-FRP, H-TYPE, Gear-Gripd, MF, Self-Locking) quanto às ancoragens por colagem externa (CREatE, EBROG, EBRIG, Gradient) e aos sistemas de FRP por fricção (FRP-Spike, FRP U-Jackets, FRP Stitching, GFRP Anchor).

Também é essencial avaliar o desempenho desses mecanismos sob cargas cíclicas, o que inclui HB-FRP, Self-Locking, Gear-Gripd, FRP U-Jackets, FRP Stitching, GFRP Anchor e os sistemas colados. Além disso, nenhuma das soluções citadas foi testada quanto à resistência ao fogo. Nas ancoragens mecânicas metálicas, sugere-se ainda investigar a influência do torque, tipo de conector, diâmetro do fixador e taxa de reforço na eficácia da ancoragem, enquanto nas soluções coladas, carecem estudos sobre o tipo de resina e comprimento de aderência.

No Anexo A está descrito um programa experimental sobre a os efeitos do comprimento de aderência em vigas de concreto armado com diferentes taxas de armadura existente reforçadas à flexão com fibra de carbono colada e ancorada com o mecanismo HB-FRP, sendo que este arranjo é uma lacuna para este mecanismo.

REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318: Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-25) and Commentary**. Farmington Hills, EUA, v. 623. 2025. ISBN 9781641950862.

ACI Committee 440. **ACI 440-2R: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures**. American Concrete Institute: Farmington Hills, MI, USA, 2017. ISBN 9781945487590.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto**. Rio de Janeiro, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16889: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 6892: Materiais metálicos – Ensaio de Tração à temperatura ambiente**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto - Procedimentos para Moldagem e Cura de Corpos-de-Prova**. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto - Ensaio de Compressão de Corpos-de-Prova Cilíndricos - Método de Ensaio**. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222: Argamassa e Concreto – Determinação da Resistência à Tração Por Compressão Diametral de Corpos-de-Prova Cilíndricos - Método de Ensaio**. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522: Concreto – Determinação dos Módulos Elásticos de Elasticidade e de deformação e à compressão**. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800:2008, Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**, Rio de Janeiro, 2008.

ALOTAIBI, Nawaf K.. Evaluating the impact of different anchor configurations and patch arrangements on the performance of fiber-reinforced polymer (FRP) anchors. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 415, p. 135110, fev. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135110>.

ABBAS, Aamer Najim; HAMOOD, Mohammed J.; ABDULSAHIB, Wael Shawky. External prestressing technique for reinforced concrete member strengthening: a review study. **Aip Conference Proceedings**, [S.L.], v. 3009, n. 1, p. 030047, 2024. AIP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1063/5.0193259>.

AL-ATTA, B.; KALFAT, R.; AL-MAHAIDI, R.. Hybrid and patch anchors for prevention of IC debonding in RC planks flexurally strengthened using FRP. **Structures**, [S.L.], v. 43, p. 1042-1056, set. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.istruc.2022.07.026>.

ABED, Riyam J; A MASHREI, Mohammed; A SULTAN, Ali. Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened by carbon fiber reinforced polymer using different strengthening techniques. **Advances In Structural Engineering**, [S.L.], v. 25, n. 2, p. 355-373, 14 out. 2021. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/13694332211049992>.

AMRAN, Y.H. Mugahed; ALYOUSEF, Rayed; RASHID, Raizal S.M.; ALABDULJABBAR, Hisham; HUNG, Chung-Chan. Properties and applications of FRP in strengthening RC structures: a review. **Structures**, [S.L.], v. 16, p. 208-238, nov. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.istruc.2018.09.008>.

ASHWORTH, Sam; RONGONG, Jem; WILSON, Peter; MEREDITH, James. Mechanical and damping properties of resin transfer moulded jute-carbon hybrid composites. **Composites Part B: Engineering**, [S.L.], v. 105, p. 60-66, nov. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.08.019>.

ALAM, Md. Ashraful; RIYAMI, Khalid Al. Shear strengthening of reinforced concrete beam using natural fibre reinforced polymer laminates. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 162, p. 683-696, fev. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.011>.

ARAM, Mohammad Reza; CZADERSKI, Christoph; MOTAVALLI, Masoud. Effects of Gradually Anchored Prestressed CFRP Strips Bonded on Prestressed Concrete Beams. **Journal Of Composites For Construction**, [S.L.], v. 12, n. 1, p. 25-34, fev. 2008. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0268\(2008\)12:1\(25\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)1090-0268(2008)12:1(25)).

AISYAH, H.A.; PARIDAH, M.T.; KHALINA, A.; SAPUAN, S.M.; WAHAB, M.s.; BERKALP, O.B.; LEE, C.H.; LEE, S.H.. Effects of Fabric Counts and Weave Designs on the Properties of Laminated Woven Kenaf/Carbon Fibre Reinforced Epoxy Hybrid Composites. **Polymers**, [S.L.], v. 10, n. 12, p. 1320, 28 nov. 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/polym10121320>.

AHMED, A., KODUR, V. K. R. "Effect of bond degradation on fire resistance of FRP-strengthened reinforced concrete beams.". **Composites Part B: Engineering**, 42(2), pp. 226–237. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2010.11.004>

ABDEL-KAREEM, Ahmed H.; ELPRINCE, Mohamed; MAKHLOUF, Mohamed. H.. Structural performance of RC beams with openings shear strengthened by hybrid techniques (EBR/EBRIG). **European Journal Of Environmental And Civil Engineering**, [S.L.], p. 1-21, 15 out. 2023. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/19648189.2023.2268735>.

ADHIKARY, Bimal Babu; MUTSUYOSHI, Hiroshi. Behavior of Concrete Beams Strengthened in Shear with Carbon-Fiber Sheets. **Journal Of Composites For Construction**, [S.L.], v. 8, n. 3, p. 258-264, jun. 2004. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0268\(2004\)8:3\(258\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)1090-0268(2004)8:3(258)).

ATTARI, N.; AMZIANE, S.; CHEMROUK, M.. Flexural strengthening of concrete beams using CFRP, GFRP and hybrid FRP sheets. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 37, p. 746-757, dez. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.052>.

AZEVEDO, A.S.; FIRMO, J.P.; CORREIA, J.R.; CHASTRE, C.; BISCAIA, H.; FRANCO, N.. Fire behaviour of CFRP-strengthened RC slabs using different techniques – EBR, NSM and CREAtE. **Composites Part B: Engineering**, [S.L.], v. 230, p. 109471, fev. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109471>.

ASSAD, M.; HAWILEH, R. A.; ABDALLA, J. A. Flexural strengthening of reinforced concrete beams with CFRP laminates and spike anchors. **Composites Part C: Open Access**, [S.L.], v. 13, p. 100443, mar. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcomc.2024.100443>.

ALWASH, Dia; KALFAT, Robin; AL-MAHAIDI, Riadh; DU, Hongjian. Shear strengthening of RC beams using NSM CFRP bonded using cement-based adhesive. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 301, p. 124365, set. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124365>.

AL-SAAD, Nihad Tareq Khshain; MOHAMMED, Alyaa; AL-MAHAIDI, Riadh; SANJAYAN, Jay. A state-of-the-art review: near-surface mounted FRP composites for reinforced concrete structures. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 209, p. 748-769, jun. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.121>.

BUYUKOZTURK, O., AU, C. "Failure behavior of FRP bonded concrete affected by interface fracture, Part 2. Moisture Degradation in FRP Bonded Concrete Systems: An Interface Fracture Approach". IST Group 2004.

BISCAIA, Hugo C.; CHASTRE, Carlos; CRUZ, David; FRANCO, Noel. Flexural Strengthening of Old Timber Floors with Laminated Carbon Fiber-Reinforced Polymers. **Journal Of Composites For Construction**, [S.L.], v. 21, n. 1, p. 040160731, fev. 2017. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000731](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000731).

BENGAR, H. A.; SHAHMANSOURI, A. A. A new anchorage system for CFRP strips in externally strengthened RC continuous beams. **Journal Of Building Engineering**, [S.L.], v. 30, p. 101230, jul. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101230>.

BANK, L. C.; ARORA, D. Analysis of RC beams strengthened with mechanically fastened FRP (MF-FRP) strips. **Composite Structures**, [S.L.], v. 79, n. 2, p. 180-191, jul. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2005.12.001>.

BILOTTA, A.; CERONI, F.; LUDOVICO, M. di; NIGRO, E.; PECCE, M.; MANFREDI, G.. Bond Efficiency of EBR and NSM FRP Systems for Strengthening Concrete Members. **Journal Of Composites For Construction**, [S.L.], v. 15, n. 5, p. 757-772, out. 2011. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000204](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000204).

BILOTTA, Antonio; CERONI, Francesca; NIGRO, Emidio; PECCE, Marisa. Efficiency of CFRP NSM strips and EBR plates for flexural strengthening of RC beams and loading pattern influence. **Composite Structures**, [S.L.], v. 124, p. 163-175, jun. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.12.046>.

BARROS, J.A.O.; DIAS, S.J.e.; LIMA, J.L.T.. Efficacy of CFRP-based techniques for the flexural and shear strengthening of concrete beams. **Cement And Concrete Composites**, [S.L.], v. 29, n. 3, p. 203-217, mar. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.09.001>.

BUYLE-BODIN*, Francois; DAVID, Emmanuelle. Use of Carbon Fibre Textile to Control Premature Failure of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Bonded CFRP Plates. **Journal Of Industrial Textiles**, [S.L.], v. 33, n. 3, p. 145-157, jan. 2004. <http://dx.doi.org/10.1177/1528083704039251>.

CANAVAL, J. H.; SILVA, T. J. da; SANTOS, A. C.. Experimental study of RC beams strengthened for bending by reinforced grout layer and connectors. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, [S.L.], v. 11, n. 4, p. 810-833, ago. 2018. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952018000400009>.

CHEN, Cheng; YANG, Yancai; ZHOU, Yingwu; XUE, Chunrun; CHEN, Xu; WU, Haocong; SUI, Lili; LI, Xue. Comparative analysis of natural fiber reinforced polymer and carbon fiber reinforced polymer in strengthening of reinforced concrete beams. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 263, p. 121572, ago. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121572>.

CHANDRAMOHAN, D.; MURALI, B.; VASANTHA-SRINIVASAN, P.; KUMAR, S. Dinesh. Mechanical, Moisture Absorption, and Abrasion Resistance Properties of Bamboo–Jute–Glass Fiber Composites. **Journal Of Bio- And Tribo-Corrosion**, [S.L.], v. 5, n. 3, 20 jun. 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s40735-019-0259-z>.

CHIN, Siew Choo; TEE, Kong Fah; TONG, Foo Sheng; DOH, Shu Ing; GIMBUN, Jolius. External strengthening of reinforced concrete beam with opening by bamboo fiber reinforced composites. **Materials And Structures**, [S.L.], v. 53, n. 6, p. 111, 11 nov. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-020-01572-y>.

CHEN, J. F.; TENG, J. G. Anchorage Strength Models for FRP and Steel Plates Bonded to Concrete. **Journal Of Structural Engineering**, [S.L.], v. 127, n. 7, p. 784-791, jul. 2001. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(2001\)127:7\(784\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(2001)127:7(784)).

CARLONI, C., SUBRAMANIAM, K.V., SAVOIA, M., MAZZOTTI, C. “Experimental determination of FRP–concrete cohesive interface properties under fatigue loading.” **Composite Structures**, 94(4), pp. 1288–1296. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.10.026>.

CHASTRE, C., BISCAIA, H., FRANCO, N., MONTEIRO, A. (2016). Experimental Analysis of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Innovative Techniques: 41th IAHS Word Congress of Housing. Sustainability and Innovation for the Future.

CASTILLO, Enrique del Rey; GRIFFITH, Michael; INGHAM, Jason. Straight FRP anchors exhibiting fiber rupture failure mode. **Composite Structures**, [S.L.], v. 207, p. 612-624, jan. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.09.073>.

CHEN, Xiao-ying; LI, Tang-ning; CHEN, Ming-zheng; HUANG, Yin. Experimental research on mechanical property of anchor cfrp sheet with the wave-shaped-teeth anchor and design of anchor system. **Engineering mechanics**, [S.L.], v. 26, n. 6, p. 184-190, Jun. 2009. [http://dx.doi.org/1000-4750\(2009\)06-0184-09](http://dx.doi.org/1000-4750(2009)06-0184-09).

CERVANTES, Ignacio; AUNGYONG, Lisa; CHAN, Kyle; KO, Yu-Fu; MENDEZ, Sergio. Flexural Retrofitting of Reinforced Concrete Structures Using Green Natural Fiber Reinforced Polymer Plates. **Icsi 2014**, [S.L.], p. 1051-1062, 5 nov. 2014. American Society of Civil Engineers. <http://dx.doi.org/10.1061/9780784478745.099>.

CERONI, Francesca; PECCE, Marisa. Evaluation of Bond Strength in Concrete Elements Externally Reinforced with CFRP Sheets and Anchoring Devices. **Journal Of Composites For Construction**, [S.L.], v. 14, n. 5, p. 521-530, out. 2010. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000118](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000118).

CHEN, Wensu; PHAM, Thong M.; SICHEMBE, Henry; CHEN, Li; HAO, Hong. Experimental study of flexural behaviour of RC beams strengthened by longitudinal and U-shaped basalt FRP sheet. **Composites Part B: Engineering**, [S.L.], v. 134, p. 114-126, fev. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.09.053>.

CHEN, Cheng; CHENG, Lijuan; SUI, Lili; XING, Feng; LI, Dawang; ZHOU, Yingwu. Design method of end anchored FRP strengthened concrete structures. **Engineering Structures**, [S.L.], v. 176, p. 143-158, dez. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.08.081>.

CHEN, Cheng; CHEN, Jieren; ZHOU, Yingwu; SUI, Lili; HU, Biao. Design of ductile H-anchorage for strengthening reinforced concrete beams with prestressed FRP. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 307, p. 124883, nov. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124883>.

CHEN, Cheng; SUI, Lili; XING, Feng; LI, Dawang; ZHOU, Yingwu; LI, Pengda. Predicting bond behavior of HB FRP strengthened concrete structures subjected to different confining effects. **Composite Structures**, [S.L.], v. 187, p. 212-225, mar. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.12.036>.

CHEN, Cheng; WANG, Xiaowei; SUI, Lili; XING, Feng; CHEN, Xilong; ZHOU, Yingwu. Influence of FRP thickness and confining effect on flexural performance of HB-strengthened RC beams. **Composites Part B: Engineering**, [S.L.], v. 161, p. 55-67, mar. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.10.059>.

COELHO, Mário; FERNANDES, Pedro; SENA-CRUZ, José; BARROS, Joaquim. Bond Behavior between concrete and Multi-Directional CFRP Laminates Using the MF-EBR Strengthening Technique. **Advanced Materials Research**, [S.L.], v. 452-453, p. 1110-1115, jan. 2012a. Trans Tech Publications, Ltd. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.452-453.1110>.

DALFRÉ, Gláucia Maria. **Polímeros Reforçados Com Fibras Na Construção Civil: dimensionamento de sistemas de reforço e armaduras não metálicas à flexão e ao cisalhamento segundo normas ACI**. São Carlos: Edufscar, 2022. 265 p.

DAI, J. G., SAITO, Y., UEDA, T., SATO, Y. "Static and Fatigue Bond Characteristics of Interfaces between CFRP Sheets and Frost Damage Experienced Concrete.". In: *FRPRCS-7*. Kansas City, MO. Nov. 6–9. 2005. pp.1515–1530. 2005.

DJAFAR-HENNI, Imane; KASSOUL, Amar. Stress–strain model of confined concrete with Aramid FRP wraps. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 186, p. 1016-1030, out. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.013>.

DONG, Kun; ZHONG, Caiqun; LI, Peng; DU, Derun. Analytical Model for Bond Behavior Prediction of CFRP-Concrete Joints with End Anchorage. **Polymers**, [S.L.], v. 13, n. 21, p. 3684, 26 out. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/polym13213684>.

DONG, Zhiwan. Experimental Research on Bond Performance of CFRP and Concrete after High and Low-Temperature Cycling. **Hans Journal Of Civil Engineering**, [S.L.], v. 12, n. 01, p. 9-17, 2023. Hans Publishers. <http://dx.doi.org/10.12677/hjce.2023.121002>.

DONG, Kun; GAO, Yu; YANG, Shutong; YANG, Zhisong; JIANG, Jitong. Experimental investigation and analytical prediction on bond behaviour of CFRP-to-concrete interface with FRP anchors. **Case Studies In Construction Materials**, [S.L.], v. 19, p. 02510, dez. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02510>.

EFTEKHAR, M. R.; YA'GHUBI, M. Using Boring to Postpone Debonding of CFRP-Composite Concrete Beams. **Journal Of Composites For Construction**, [S.L.], v. 20, n. 1, fev. 2016. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000595](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000595).

ESLAMI, Abolfazl; SHAYEGH, Hamid R.; MOGHAVEM, Alireza; RONAGH, Hamid R.. Experimental and analytical investigations of a novel end anchorage for CFRP flexural retrofits. **Composites Part B: Engineering**, [S.L.], v. 176, p. 107309, nov. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107309>.

EL-MAADDAWY, Tamer; NESSABI, Amna; EL-DIEB, Amr. Flexural Response of Corroded Reinforced Concrete Beams Strengthened with Powder-Actuated Fastened Composites. **Journal Of Composites For Construction**, [S.L.], v. 17, n. 6, dez. 2013. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000395](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000395).

EL-MAADDAWY, Tamer A. Mechanically Fastened Composites for Retrofitting Corrosion-Damaged Reinforced-Concrete Beams: experimental investigation. **Journal Of Composites For Construction**, [S.L.], v. 18, n. 2, abr. 2014. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000447](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000447).

EBEAD, Usama. Hybrid Externally Bonded/Mechanically Fastened Fiber-Reinforced Polymer for RC Beam Strengthening. **Aci Structural Journal**, [S.L.], v. 108, n. 6, 2011. American Concrete Institute. <http://dx.doi.org/10.14359/51683365>.

EBEAD, Usama; SAEED, Huda. Flexural and Interfacial Behavior of Externally Bonded/Mechanically Fastened Fiber-Reinforced Polymer Strengthened Reinforced Concrete Beams. **Aci Structural Journal**, [S.L.], v. 111, n. 4, jul. 2014. American Concrete Institute. <http://dx.doi.org/10.14359/51686628>.

EKENEL, Mahmut; RIZZO, Andrea; MYERS, John J.; NANNI, Antonio. Flexural Fatigue Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with FRP Fabric and Precured Laminate Systems. **Journal Of Composites For Construction**, [S.L.], v. 10, n. 5, p. 433-442, out. 2006. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0268\(2006\)10:5\(433\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)1090-0268(2006)10:5(433)).

ELSAYED, Walid E.; EBEAD, Usama A.; NEALE, Kenneth W.. Studies on Mechanically Fastened Fiber-Reinforced Polymer Strengthening Systems. **Aci Structural Journal**, [S.L.], v. 106, n. 1, 2009. American Concrete Institute. <http://dx.doi.org/10.14359/56283>.

EN 1992-1-1: 2023; **Eurocode 2: Design of Concrete Structures-Annex J: Strengthening of Existing Concrete Structures with CFRP**: Brussels, Belgium, 2023. ISBN 9780539162332.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. **Fib Bulletin 90: Externally Applied FRP Reinforcement For Concrete Structures; Task Group 5.1 Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement for concrete structures**. Lausanne, Switzerland, v. 242, 2019. ISBN 9782883941328.

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**, [S.L.], v. 21, n. 2, abr. 2017. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000721](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000721).

FU, B.; TANG, X.T.; LI, L.J.; LIU, F.; LIN, G.. Inclined FRP U-jackets for enhancing structural performance of FRP-plated RC beams suffering from IC debonding. **Composite Structures**, [S.L.], v. 200, p. 36-46, set. 2018. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.05.074>.

FRANCO, Noel; CHASTRE, Carlos; BISCAIA, Hugo. Strengthening RC Beams Using Stainless Steel Continuous Reinforcement Embedded at Ends. **Journal Of Structural Engineering**, [S.L.], v. 146, n. 5, p. 040200651, maio 2020. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0002606](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0002606).

GUAN, Yan Hua; ZHUANG, Pei Zhi; SONG, Xiu Guang; MA, Zheng. Experimental Study of Flexural Capacity on RC Beams Strengthened with the FRP-Bolt Strengthening Technology. **Advanced Materials Research**, [S.L.], v. 243-249, p. 5602-5609, maio 2011. Trans Tech Publications, Ltd. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.243-249.5602>.

GAO, Xiao-Hua; GAO, Lei; ZHANG, Feng. A New Bond-Slip Model of Hybrid Bonded FRP-to-Concrete Joints. **Ksce Journal Of Civil Engineering**, [S.L.], v. 27, n. 1, p. 270-284, 11 out. 2022. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12205-022-2286-4>.

GHALEH, Reza Zamani; MOSTOFINEJAD, Davood. Behaviour of EBRIG CFRP sheet-concrete joint: comparative assessment with ebr and ebrog methods. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 346, p. 128374, set. 2022. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128374>.

HE, Xuejun; ZHOU, Chaoyang; LV, Miao; WANG, Yi; LIU, Yang. Interfacial stresses of beams hybrid strengthened by steel plate with outside taper and FRP pocket. **Journal Of Building Engineering**, [S.L.], v. 75, p. 107034, set. 2023. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107034>.

HAFIZAH, N. A. K.; BHUTTA, M. A. R.; JAMALUDIN, M. Y.; WARID, M. H.; ISMAIL, M.; RAHMAN, M. S.; YUNUS, I.; AZMAN, M.. Kenaf Fiber Reinforced Polymer Composites for Strengthening RC Beams. **Journal Of Advanced Concrete Technology**, [S.L.], v. 12, n. 6, p. 167-177, 4 jun. 2014. Japan Concrete Institute. <http://dx.doi.org/10.3151/jact.12.167>.

HAWILEH, Rami A.; RASHEED, Hayder A.; ABDALLA, Jamal A.; AL-TAMIMI, Adil K.. Behavior of reinforced concrete beams strengthened with externally bonded hybrid fiber reinforced polymer systems. **Materials & Design**, [S.L.], v. 53, p. 972-982, jan. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2013.07.087>.

HADDAD, R. H., AL-ROUSAN, R., ALMASRY, A. "Bond-slip behavior between carbon fiber reinforced polymer sheets and heat-damaged concrete. **Composites: Part B: Engineering**, 45(1), p. 1049–1060. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.09.010>.

HASNAT, A.; ISLAM, M. M.; AMIN, A. F. M. S.. Enhancing the Debonding Strain Limit for CFRP-Strengthened RC Beams Using U-Clamps: identification of design parameters. **Journal Of Composites For Construction**, [S.L.], v. 20, n. 1, fev. 2016. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000599](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000599).

HUO, Jingsi; LI, Zhi; ZHAO, Lingyu; LIU, Jintong; XIAO, Yan. Dynamic Behavior of CFRP-Strengthened Reinforced Concrete Beams without Stirrups under Impact Loading. **Aci Structural Journal**, [S.L.], v. 115, n. 3, maio 2018. American Concrete Institute. <http://dx.doi.org/10.14359/51701283>.

JIANG, Cheng; WAN, Baolin; WU, Yu-Fei; OMBOKO, John. Epoxy interlocking: a novel approach to enhance frp-to-concrete bond behavior. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 193, p. 643-653, dez. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.183>.

JAFARI, Zahra; MOSTOFINEJAD, Davood. Flexural strengthening of RC beams by advanced concrete canvas. **Structural Concrete**, [S.L.], v. 25, n. 2, p. 1165-1184, 4 mar. 2024. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/suco.202300543>.

JIRAWATTANASOMKUL, T.; LIKITLERSUANG, S.; WUTTIWANNASAK, N.; UEDA, T.; ZHANG, D.; VORAVUTVITYARUK, T. Effects of Heat Treatment on Mechanical Properties of Jute Fiber-Reinforced Polymer Composites for Concrete Confinement. **Journal Of Materials In Civil Engineering**, [S.L.], v. 32, n. 12, dez. 2020. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0003456](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003456).

KANG, Thomas H.-K.; HOWELL, Joe; KIM, Sanghee; LEE, Dong Joo. A State-of-the-Art Review on Debonding Failures of FRP Laminates Externally Adhered to Concrete. **International Journal Of Concrete Structures And Materials**, [S.L.], v. 6, n. 2, p. 123-134, jun. 2012. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s40069-012-0012-1>.

LIU, Yue; XIE, Jia-Zhan; TAFSIROJJAMAN, T.; YUE, Qing-Rui; TAN, Cheng; CHE, Gong-Jian. CFRP lamella stay-cable and its force measurement based on microwave radar. **Case Studies In Construction Materials**, [S.L.], v. 16, p. 00824, jun. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00824>.

LU, X.Z.; YE, L.P.; TENG, J.G.; JIANG, J.J.. Meso-scale finite element model for FRP sheets/plates bonded to concrete. **Engineering Structures**, [S.L.], v. 27, n. 4, p. 564-575, mar. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2004.11.015>.

LLAURADÓ, Paula Villanueva; IBELL, Tim; GÓMEZ, Jaime Fernández; RAMOS, Francisco J. González. Pull-out and shear-strength models for FRP spike anchors. **Composites Part B: Engineering**, [S.L.], v. 116, p. 239-252, maio 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.02.029>.

LEE, Jae ha; LOPEZ, Maria M.. Characterization of FRP Uwrap Anchors for Externally Bonded FRP-Reinforced Concrete Elements: an experimental study. **Journal Of Composites For Construction**, [S.L.], v. 20, n. 4, ago. 2016. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000642](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000642).

LEE, Jae Ha; LOPEZ, Maria M.; BAKIS, Charles E. Slip effects in reinforced concrete beams with mechanically fastened FRP strip. **Cement And Concrete Composites**, [S.L.], v. 31, n. 7, p. 496-504, ago. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.04.008>.

LAMANNA, Anthony J.; BANK, Lawrence C.; SCOTT, David W.. Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Beams by Mechanically Attaching Fiber-Reinforced Polymer Strips. **Journal Of Composites For Construction**, [S.L.], v. 8, n. 3, p. 203-210, jun. 2004. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0268\(2004\)8:3\(203\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)1090-0268(2004)8:3(203)).

LORENZIS, L. de; TENG, J.G.. Near-surface mounted FRP reinforcement: an emerging technique for strengthening structures. **Composites Part B: Engineering**, [S.L.], v. 38, n. 2, p. 119-143, mar. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2006.08.003>.

MADHAVI, K.; HARSHITH, V.V.; GANGADHAR, M.; KUMAR, V. C.; RAGHAVENDRA, T.. External strengthening of concrete with natural and synthetic fiber composites. **Materials Today**: Proceedings, [S.L.], v. 38, p. 2803-2809, 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.737>.

MCCOY, Brad C.; BOURARA, Zakariya; SERACINO, Rudolf; LUCIER, Gregory W.. Anchor Bolt Patterns for Mechanically Fastened FRP Plates. **Journal Of Composites For Construction**, [S.L.], v. 23, n. 4, p. 11-111, ago. 2019. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000951](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000951).

MOGHADDAS, Amirreza; MOSTOFINEJAD, Davood. Empirical FRP-Concrete Bond Strength Model for Externally Bonded Reinforcement on Grooves. **Journal Of Composites For Construction**, [S.L.], v. 23, n. 2, abr. 2019. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)cc.1943-5614.0000924](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)cc.1943-5614.0000924).

MOSTOFINEJAD, Davood; KHOZAEI, Kamyar. Effect of GM patterns on ductility and debonding control of FRP sheets in RC strengthened beams. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 93, p. 110-120, set. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.062>.

MOSTOFINEJAD, Davood; SHAMELI, Seyed Masoud; HOSSEINI, Ardan. EBROG and EBRIG methods for strengthening RC beams by FRP sheets. **European Journal Of Environmental And Civil Engineering**, [S.L.], v. 18, n. 6, p. 652-668, 21 Mar. 2014. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/19648189.2014.900523>.

MOSTOFINEJAD, Davood; MOGHADDAS, Amirreza. Bond efficiency of EBR and EBROG methods in different flexural failure mechanisms of FRP strengthened RC beams. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 54, p. 605-614, mar. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.002>.

MOSTOFINEJAD, Davood; SHAMELI, Seyed Masoud. Externally bonded reinforcement in grooves (EBRIG) technique to postpone debonding of FRP sheets in strengthened concrete beams. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 38, p. 751-758, jan. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.030>.

MOSTOFINEJAD, Davood; ESFAHANI, Mohammad Reza; SHOMALI, Amir. Experimental and numerical study of the RC beams shear-strengthened with NSM technique. **Journal Of Composite Materials**, [S.L.], v. 53, n. 17, p. 2377-2389, 18 fev. 2019. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0021998319830777>.

MICHELS, Julien; CZADERSKI, Christoph; EL-HACHA, Raafat; BRÖNNIMANN, Rolf; MOTAVALLI, Masoud. Temporary bond strength of partly cured epoxy adhesive for anchoring prestressed CFRP strips on concrete. **Composite Structures**, [S.L.], v. 94, n. 9, p. 2667-2676, set. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.03.037>.

MICHELS, Julien; SENA-CRUZ, Jose; CZADERSKI, Christoph; MOTAVALLI, Masoud. Structural Strengthening with Prestressed CFRP Strips with Gradient Anchorage. **Journal Of Composites For Construction**, [S.L.], v. 17, n. 5, p. 651-661, out. 2013. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000372](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000372).

MOTAVALLI, Masoud; CZADERSKI, Christoph; PFYL-LANG, Kerstin. Prestressed CFRP for Strengthening of Reinforced Concrete Structures: recent developments at empa, switzerland. **Journal Of Composites For Construction**, [S.L.], v. 15, n. 2, p. 194-205, abr. 2011. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000125](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000125).

MOSTOFINEJAD, Davood; HOSSEINI, Seyed Mohammad; TEHRANI, Bahareh Nader; EFTEKHAR, Mohammad Reza; DYARI, Mohsen. Innovative warp and woof strap (WWS) method to anchor the FRP sheets in strengthened concrete beams. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 218, p. 351-364, set. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.117>.

MOSTAFA, Ahmed Ab; RAZAQPUR, A Ghani. A new CFRP anchor for preventing separation of externally bonded laminates from concrete. **Journal Of Reinforced Plastics And Composites**, [S.L.], v. 32, n. 24, p. 1895-1906, 26 jul. 2013b. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0731684413498633>.

MOSTAFA, Ahmed; RAZAQPUR, A. Ghani. CFRP Anchor for Preventing Premature Debonding of Externally Bonded FRP Laminates from Concrete. **Journal Of Composites For Construction**, [S.L.], v. 17, n. 5, p. 641-650, out. 2013a. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000377](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000377).

MUCIACCIA, Giovanni; KHORASANI, Mehdi; MOSTOFINEJAD, Davood. Effect of different parameters on the performance of FRP anchors in combination with EBR-FRP strengthening systems: a review. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 354, p. 129181, nov. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129181>.

MONTI, G., RENZELLI, M., LUCIANI, P. "FRP Adhesion in Uncracked and Cracked Concrete Zones." In: Proceedings of the Sixth International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-6), Jul. 8–10. Singapore: World Scientific Publishing, 1, pp. 183–192. 2003.

MOSTOFINEJAD, Davood; MAHMOUDABADI, Ehsan. Grooving as Alternative Method of Surface Preparation to Postpone Debonding of FRP Laminates in Concrete Beams. **Journal Of Composites For Construction**, [S.L.], v. 14, n. 6, p. 804-811, dez. 2010. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000117](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000117).

MOSTOFINEJAD, Davood; KASHANI, Amirhomayoon Tabatabaei. Experimental study on effect of EBR and EBROG methods on debonding of FRP sheets used for shear strengthening of RC beams. **Composites Part B: Engineering**, [S.L.], v. 45, n. 1, p. 1704-1713, fev. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.09.081>.

MARTINELLI, Enzo; NAPOLI, Annalisa; NUNZIATA, Bruno; REALFONZO, Roberto. RC Beams Strengthened with Mechanically Fastened Composites: experimental results and numerical modeling. **Polymers**, [S.L.], v. 6, n. 3, p. 613-633, 5 mar. 2014. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/polym6030613>.

NAPOLI, Annalisa; BANK, Lawrence C.; BROWN, Vicki L.; MARTINELLI, Enzo; MATTA, Fabio; REALFONZO, Roberto. Analysis and design of RC structures strengthened with mechanically fastened FRP laminates: a review. **Composites Part B: Engineering**, [S.L.], v. 55, p. 386-399, dez. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.06.038>.

NEUBAUER, U.; ROSTASY, Fs. Bond Failure of Concrete Fiber Reinforced Polymer Plates at Inclined Cracks-Experiments and Fracture Mechanics Model. **Sp-188: 4th Intl Symposium - Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures**, [S.L.], v. 180, p. 369-382, Jan. 1999. American Concrete Institute. <http://dx.doi.org/10.14359/5638>.

NIZIC, A., NIEDERMEIER, R., ZILCH, K. "Behavior of externally bonded reinforcement under low cycle fatigue loading." In: **Proceedings of the 9th International Symposium of the Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures (FRPRCS-9)**, Jul.13–15. Sydney, Australia. p. 287. 2009.

OZBAKKALOGLU, Togay; FANG, Chengfeng; GHOLAMPOUR, Aliakbar. Influence of FRP anchor configuration on the behavior of FRP plates externally bonded on concrete members. **Engineering Structures**, [S.L.], v. 133, p. 133-150, fev. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.12.005>.

PUDLEINER, Douglas; GHANNOUM, Wassim M.; JIRSA, James O.. Influence of Anchor Size on Anchored CFRP Systems. **Journal Of Composites For Construction**, [S.L.], v. 23, n. 5, p. 345-23244, out. 2019. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000954](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000954).

PAN, Jinlong; WU, Yu-Fei. Analytical modeling of bond behavior between FRP plate and concrete. **Composites Part B: Engineering**, [S.L.], v. 61, p. 17-25, maio 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.01.026>.

RAMESH, M.; PALANIKUMAR, K.; REDDY, K. Hemachandra. Mechanical property evaluation of sisal-jute-glass fiber reinforced polyester composites. **Composites Part B: Engineering**, [S.L.], v. 48, p. 1-9, maio 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.12.004>.

SIRILUK, Sanyawit. BEHAVIOURS OF RC DEEP BEAMS STRENGTHENED IN SHEAR USING HEMP FIBER REINFORCED POLYMER COMPOSITES. **International Journal Of Geomate**, [S.L.], v. 15, n. 47, 1 jul. 2018. <http://dx.doi.org/10.21660/2018.47.str167>.

SMITH, S.T; TENG, J.G. FRP-strengthened RC beams. I: review of debonding strength models. **Engineering Structures**, [S.L.], v. 24, n. 4, p. 385-395, abr. 2002. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0141-0296\(01\)00105-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0141-0296(01)00105-5).

SERACINO, R.; SAIFULNAZ, M. R. Raizal; OEHLERS, D. J.. Generic Debonding Resistance of EB and NSM Plate-to-Concrete Joints. **Journal Of Composites For Construction**, [S.L.], v. 11, n. 1, p. 62-70, fev. 2007. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0268\(2007\)11:1\(62\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)1090-0268(2007)11:1(62)).

SAYED-AHMED, E.y.; BAKAY, R.; SHRIVE, N.G.. Bond Strength of FRP Laminates to Concrete: state-of-the-art review. **Electronic Journal Of Structural Engineering**, [S.L.], v. 9, p. 45-61, 1 jun. 2009. EJSE International. <http://dx.doi.org/10.56748/ejse.9117>.

SHADRAVAN, B. "Investigation of surface bond behavior of FRP sheets on concrete and Masonry Substrates." Ph.D. Thesis, University of Ottawa, Ottawa, Canada. p. 197. 2010. <https://doi.org/10.20381/ruor-20046>.

SUBRAMANIAM, K. V., ALI-AHMAD, M., GHOSN, M. "Freeze-thaw degradation of FRP-concrete interface: Impact on cohesive fracture response". *Engineering Fracture Mechanics*, 75(13), pp. 3924-3940. 2008. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2007.12.016>.

SABZI, Javad; ESFAHANI, M. Reza; OZBAKKALOGLU, Togay; FARAHI, Behrouz. Effect of concrete strength and longitudinal reinforcement arrangement on the performance of reinforced concrete beams strengthened using EBR and EBROG methods. **Engineering Structures**, [S.L.], v. 205, p. 110072, fev. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110072>.

SANGINABADI, Khaled; YAZDANI, Azad; MOSTOFINEJAD, Davood; CZADERSKI, Christoph. RC members externally strengthened with FRP composites by grooving methods including EBROG and EBRIG: a state-of-the-art review. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 324, p. 126662, mar. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126662>.

SMITH, S. T.; TENG, J. G. Shear-bending interaction in debonding failures of FRP-plated RC beams. **Advances In Structural Engineering**, [S.L.], v. 6, n. 3, p. 183-199, jun. 2003. Disponível em: https://scholar.google.com.br/scholar?hl=pt-BR&as_sdt=0%2C5&q=Shear-bending+interaction+in+debonding+failures+of+FRP-plated+RC+beams&btnG= . Acesso em: 20 abr. 2024.

SIDDIKA, Ayesha; MAMUN, Md. ABDULLAH, AI; ALYOUSEF, R.; AMRAN, Y.H. Mugahed. Strengthening of reinforced concrete beams by using fiber-reinforced polymer composites: a review. **Journal Of Building Engineering**, [S.L.], v. 25, p. 100798, set. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100798>.

SAMANTA, S.; MURALIDHAR, M.; SINGH, T.J.; SARKAR, S. Characterization of Mechanical Properties of Hybrid Bamboo/GFRP and Jute/GFRP Composites. In **Proceedings of the Materials Today: Proceedings**; Vol. 2, p. 1398–1405, 2015. Elsevier Ltd.

SUJON, Md. Abu Shaid; HABIB, Mohammad Ahsan; ABEDIN, Mohammad Zoynal. Experimental investigation of the mechanical and water absorption properties on fiber stacking sequence and orientation of jute/carbon epoxy hybrid composites. **Journal Of Materials Research And Technology**, [S.L.], v. 9, n. 5, p. 10970-10981, set. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.07.079>.

SEN, Tara; REDDY, H.N. Jagannatha. Flexural strengthening of RC beams using natural sisal and artificial carbon and glass fabric reinforced composite system. **Sustainable Cities And Society**, [S.L.], v. 10, p. 195-206, fev. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2013.09.003>.

SABAU, Cristian; POPESCU, Cosmin; SAS, Gabriel; SCHMIDT, Jacob Wittrup; BLANKSVÄRD, Thomas; TÄLJSTEN, Björn. Strengthening of RC beams using bottom and side NSM reinforcement. **Composites Part B: Engineering**, [S.L.], v. 149, p. 82-91, set. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.05.011>.

STOECKLIN, I.; MEIER, U. strengthening of concrete structures with prestressed and gradually anchored CFRP strips. **Fibre-Reinforced Polymer Reinforcement For Concrete Structures**, [S.L.], p. 1321-1330, jun. 2003. World Scientific Publishing Company. http://dx.doi.org/10.1142/9789812704863_0127.

SMITH, Scott T.; ZHANG, Huawen; WANG, Zhenyu. Influence of FRP anchors on the strength and ductility of FRP-strengthened RC slabs. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 49, p. 998-1012, dez. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.006>.

SOLAHUDDIN, B.A.; YAHAYA, F.M.. A narrative review on strengthening of reinforced concrete beams using carbon fiber reinforced polymer composite material through experimental investigation and numerical modeling. **Structures**, [S.L.], v. 52, p. 666-710, jun. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.istruc.2023.03.168>.

SENA-CRUZ, José M.; BARROS, Joaquim A.O.; COELHO, Mário R.F.; SILVA, Luís F.F.T.. Efficiency of different techniques in flexural strengthening of RC beams under monotonic and fatigue loading. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 29, p. 175-182, abr. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.044>.

SEO, Soo-Yeon; LEE, Moon Sung; FEO, Luciano. Flexural analysis of RC beam strengthened by partially de-bonded NSM FRP strip. **Composites Part B: Engineering**, v. 101, p. 21-30, set.2016.Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.06.056>.

SENA-CRUZ, J. M.; BARROS, J.; COELHO, M.; Fernandes, P. Laminados multi-direccionais de CFRP para aplicações em engenharia civil. **Revista Mecânica Experimental**, [S.L.], v. 20, p. 89-100. 2012b.

TENG, J.G.; YUAN, H.; CHEN, J.F. FRP-to-concrete interfaces between two adjacent cracks: theoretical model for debonding failure. **International Journal Of Solids And Structures**, [S.L.], v. 43, n. 18-19, p. 5750-5778, set. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2005.07.023>.

TOMMASO, D., NEUBAUER, A., PANTUSO, A., ROSTASY, F. S. "Behavior of Adhesively Bonded Concrete-CFRP Joints at Low and High Temperatures". **Mechanics of Composite Materials**, 37(4), pp. 327–338. 2001. <https://doi.org/10.1023/A:1012392703519>.

UEDA, Tamen; DAI, Jianguo. Interface bond between FRP sheets and concrete substrates: properties, numerical modeling and roles in member behaviour. **Progress In Structural Engineering And Materials**, [S.L.], v. 7, n. 1, p. 27-43, 23 dez. 2004. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/pse.187>.

WU, Yefei; ZHOU, Zhiqiang; YANG, Qingda; CHEN, Weiqiu. On shear bond strength of FRP-concrete structures. **Engineering Structures**, [S.L.], v. 32, n. 3, p. 897-905, mar. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.12.017>.

WU, Yu-Fei; XU, Xin-Sheng; SUN, Jia-Bin; JIANG, Cheng. Analytical solution for the bond strength of externally bonded reinforcement. **Composite Structures**, [S.L.], v. 94, n. 11, p. 3232-3239, nov. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.04.026>.

WEI, Mu-Wang; XIE, Jian-He; LI, Jiang-Lin; XIANG, Chen-Yu; HUANG, Pei-Yan; LIU, Feng. Effect of the chloride environmental exposure on the flexural performance of strengthened RC beams with self-anchored prestressed CFRP plates. **Engineering Structures**, [S.L.], v. 231, p. 111718, mar. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111718>.

WU, Zhi-Min; HU, Cheng-He; WU, Yu-Fei; ZHENG, Jian-Jun. Improved hybrid bonding technique for attaching FRP to reinforced concrete beams. **Magazine Of Concrete Research**, [S.L.], v. 63, n. 11, p. 861-869, nov. 2011. Thomas Telford Ltd.. <http://dx.doi.org/10.1680/macr.2011.63.11.861>.

WU, Yu-Fei; HUANG, Yue. Hybrid Bonding of FRP to Reinforced Concrete Structures. **Journal Of Composites For Construction**, [S.L.], v. 12, n. 3, p. 266-273, jun. 2008. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0268\(2008\)12:3\(266\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)1090-0268(2008)12:3(266)).

WU, Yu-Fei; YAN, Jun-Hui; ZHOU, Ying-Wu; XIAO, Yan. Ultimate Strength of Reinforced Concrete Beams Retrofitted with Hybrid Bonded Fiber-Reinforced Polymer. **Aci Structural Journal**, [S.L.], v. 107, n. 4, p. 451-460, 2010. American Concrete Institute. <http://dx.doi.org/10.14359/51663818>.

FRANCO, Noel; CHASTRE, Carlos; BISCAIA, Hugo. Strengthening RC Beams Using Stainless Steel Continuous Reinforcement Embedded at Ends. **Journal Of Structural Engineering**, [S.L.], v. 146, n. 5, p. 040200651, maio 2020. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0002606](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0002606).

WANG, Hai-Tao; WU, Qiong; ZHU, Chang-Yu; MAO, Ya-Hui; GUO, Cong-Cong. An innovative prestressing system of prestressed carbon fiber sheets for strengthening RC beams under flexure. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 411, p. 134409, jan. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134409>.

WU, Yu-Fei; HE, Liang; BANK, L. C.. Bond-Test Protocol for Plate-to-Concrete Interface Involving All Mechanisms. **Journal Of Composites For Construction**, [S.L.], v. 20, n. 1, fev. 2016. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000581](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000581).

WU, Yu-Fei; LIU, Kang. Characterization of Mechanically Enhanced FRP Bonding System. **Journal Of Composites For Construction**, [S.L.], v. 17, n. 1, p. 34-49, fev. 2013. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000302](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000302).

YAO, Y.; CUI, J.; WANG, S.; XU, L.; LI, G.; PAN, H.; BAI, X. Comparison of Tensile Properties of Carbon Fiber, Basalt Fiber and Hybrid Fiber Reinforced Composites Under Various Strain Rates. **Applied Composite Materials**, [S.L.], v. 29, n. 3, p. 1147-1165, 24 jan. 2022. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10443-022-10012-9>.

YOOPRASERTCHAI, Ekkachai; WIWATROJANAGUL, Pongsak; PIMANMAS, Amorn. A use of natural sisal and jute fiber composites for seismic retrofitting of nonductile rectangular reinforced concrete columns. **Journal Of Building Engineering**, [S.L.], v. 52, p. 104521, jul. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104521>.

YALIM, Baris; KALAYCI, Ahmet Serhat; MIRMIRAN, Amir. Performance of FRP-Strengthened RC Beams with Different Concrete Surface Profiles. **Journal Of Composites For Construction**, [S.L.], v. 12, n. 6, p. 626-634, dez. 2008. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0268\(2008\)12:6\(626\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)1090-0268(2008)12:6(626)).

YANG, Jincheng; JOHANSSON, Morgan; AL-EMRANI, Mohammad; HAGHANI, Reza. Innovative flexural strengthening of RC beams using self-anchored prestressed CFRP plates: experimental and numerical investigations. **Engineering Structures**, [S.L.], v. 243, p. 112687, set. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112687>.

YANG, Jincheng; HAGHANI, Reza; AL-EMRANI, Mohammad. Innovative prestressing method for externally bonded CFRP laminates without mechanical anchorage. **Engineering Structures**, [S.L.], v. 197, p. 109416, out. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109416>.

YANG, Jincheng; JOHANSSON, Morgan; AL-EMRANI, Mohammad; HAGHANI, Reza. Innovative flexural strengthening of RC beams using self-anchored prestressed CFRP plates: experimental and numerical investigations. **Engineering Structures**, [S.L.], v. 243, p. 112687, set. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112687>.

YUN, Yanchun; WU, Yu-Fei; TANG, Wai Ching. Performance of FRP bonding systems under fatigue loading. **Engineering Structures**, [S.L.], v. 30, n. 11, p. 3129-3140, nov. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.04.026>.

VIJAYAN, Dhanasingh Sivalinga; SIVASURIYAN, Arvindan; DEVARAJAN, Parthiban; STEFAŃSKA, Anna; WODZYŃSKI, Łukasz; KODA, Eugeniusz. Carbon Fibre-Reinforced Polymer (CFRP) Composites in Civil Engineering Application—A Comprehensive Review. **Buildings**, [S.L.], v. 13, n. 6, p. 1509, 12 jun. 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/buildings13061509>.

XIA, Y.; XIAN, G.; KAFODYA, I.; LI, H. Compression Behavior of Concrete Cylinders Externally by Flax Fiber Reinforced Polymer Sheets. **Advances in Structural Engineering**. V.17. 2014.

ZOGHI, M.; FOSTER, D. C.. Preservation of Hopkins Street Bridge via externally bonded prestressed CFRP laminates. **Bridge Structures**, [S.L.], v. 3, n. 2, p. 133-146, jun. 2007. Crossref. <http://dx.doi.org/10.1080/15732480701352467>.

ZHU, Wanxu; WEI, Wei; LIU, Fengrong; ZENG, Rong. Method of Designing a Friction-Based Wedge Anchorage System for High-Strength CFRP Plates. **Materials**, [S.L.], v. 14, n. 21, p. 6443, 27 out. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma14216443>.

ZHUO, Jing; WANG, Fumin; LI, Tangling. Application of FRP Strap in an Innovative Prestressed Method. **Journal Of Materials In Civil Engineering**, [S.L.], v. 21, n. 4, p. 176-180, Abr. 2009. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(2009\)21:4\(176\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2009)21:4(176)).

ZHUO, Jing; LI, Tangling. Mechanism of an innovative wave-shape-teeth-grip anchor of FRP sheets. **China Civil Engineering Journal**, [S.L.], v. 10, p. 49-53, jan. 2005. <http://dx.doi.org/1000-131X.2005.10.009>.

ZHANG, Baojing; SHANG, Shouping. Experimental study on flexural members strengthened with variable bonded pre-stressed CFRP plates. **Aip Conference Proceedings**, [S.L.], p. 0202241-0202249, 2017a. Author(s). <http://dx.doi.org/10.1063/1.4993041>.

ZHANG, Baojing; SHANG, Shouping. Experimental study on long-term creep preference of flexural members strengthened with prestressed CFRP plate. **Aip Conference Proceedings**, [S.L.], p. 0202251-02022510, 2017b. Author(s). <http://dx.doi.org/10.1063/1.4993042>.

ZAKI, Mohammed A.; RASHEED, Hayder A.. Behavior of reinforced concrete beams strengthened using CFRP sheets with innovative anchorage devices. **Engineering Structures**, [S.L.], v. 215, p. 110689, jul. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110689>.

ZHANG, Huawen; SMITH, Scott T.. Influence of plate length and anchor position on FRP-to-concrete joints anchored with FRP anchors. **Composite Structures**, [S.L.], v. 159, p. 615-624, jan. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.09.086>.

ZAKI, Mohammed A.; RASHEED, Hayder A.; MITSIOS, Konstantinos. Improvements in lightweight concrete T beams CFRP strengthened and anchored with U-wraps. **Structural Concrete**, [S.L.], p. 1-16, 6 abr. 2024. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/suco.202300968>.

ZHOU, Yingwu; CHEN, Xilong; FAN, Zhiheng; SUI, Lili; LI, Dawang; XING, Feng. Bond behaviors of FRP-to-concrete interface under the control of a novel end-anchorage system. **Composite Structures**, [S.L.], v. 168, p. 130-142, maio 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.02.056>.

ZHOU, Yingwu; WANG, Xiaowei; SUI, Lili; XING, Feng; WU, Yufei; CHEN, Cheng. Flexural performance of FRP-plated RC beams using H-type end anchorage. **Composite Structures**, [S.L.], v. 206, p. 11-21, dez. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.08.015>.

ZHOU, Chaoyang; YU, Yanan; XIONG, Zao; HE, Xuejun. Flexure tests on narrow concrete beams strengthened with CFRP sheets end-locked by winding around twin-rods. **Acta Materiae Compositae Sinica**, [S.L.], v. 35, p. 2216-2221, 2018. <http://dx.doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20171115.002>.

ZHOU, Chaoyang; WANG, Lina; WANG, Yi; FANG, Zheng. Experimental study on the flexural strengthening of one-way RC slabs with end-buckled and/or externally bonded CFRP sheets. **Engineering Structures**, [S.L.], v. 282, p. 115832, maio 2023b. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115832>.

ZHOU, Chaoyang; GUO, Yuxuan; WANG, Yi; HE, Xuejun; XIONG, Zao. Flexural Behaviour of Narrow RC Beams Strengthened with Hybrid Anchored CFRP Sheets. **Journal Of Advanced Concrete Technology**, [S.L.], v. 18, n. 3, p. 54-66, 14 mar. 2020a. Japan Concrete Institute. <http://dx.doi.org/10.3151/jact.18.54>.

ZHOU, Chao-Yang; YU, Ya-Nan; XIE, En-Li. Strengthening RC beams using externally bonded CFRP sheets with end self-locking. **Composite Structures**, [S.L.], v. 241, p. 112070, jun. 2020b. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112070>.

ZHOU, Chaoyang; FAN, Wenhua; TANG, Ming; WANG, Yi. Analysis of interfacial stresses on narrow beams strengthened by FRP straps with a side anchorage system. **Structural Concrete**, [S.L.], v. 25, n. 1, p. 603-619, 19 ago. 2023. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/suco.202201184>.

ZHOU, Yingwu; WANG, Xiaowei; SUI, Lili; XING, Feng; HUANG, Zhenyu; CHEN, Cheng; LI, Pengda; MEI, Liu. Effect of mechanical fastening pressure on the bond behaviors of hybrid-bonded FRP to concrete interface. **Composite Structures**, [S.L.], v. 204, p. 731-744, nov. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.08.008>.

ANEXO A - SUGESTÃO PARA TRABALHO FUTURO (unidade: mm; Escala 1:25).

