



**VIGAS REFORÇADAS À FLEXÃO COM FRP APLICADOS  
COM A TÉCNICA NSM OU EBR**

**JOSÉ LUCAS PESSOA DE OLIVEIRA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**VIGAS REFORÇADAS À FLEXÃO COM FRP APLICADOS COM A  
TÉCNICA NSM OU EBR**

**JOSÉ LUCAS PESSOA DE OLIVEIRA**

ORIENTADOR: GUILHERME SALES SOARES DE AZEVEDO MELO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

BRASÍLIA/DF: JUNHO - 2024

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

**VIGAS REFORÇADAS À FLEXÃO COM FRP APLICADOS COM A  
TÉCNICA NSM OU EBR**

**JOSÉ LUCAS PESSOA DE OLIVEIRA**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE  
BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A  
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO  
CIVIL.

APROVADA POR:

---

**Prof. Guilherme Sales Soares de Azevedo Melo, *Ph.D.* (UnB)**  
(Orientador)

---

**Prof. Marcos Honorato de Oliveira, *DSc* (UnB)**  
(Examinador 1)

---

**Prof. Daniel Carlos Taissum Cardoso, *DSc* (PUC-Rio)**  
(Examinador 2)

BRASÍLIA/DF, JUNHO DE 2024

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador, professor Guilherme Sales, pela proposta dessa pesquisa, pela compreensão, paciência e por sempre estar disponível para ajudar no que fosse necessário durante a elaboração desse trabalho.

À Universidade de Brasília – UnB, pela oportunidade de pesquisa e aprendizado ao longo da elaboração desse trabalho, e à CAPES pelo apoio financeiro tão importante para a conclusão dessa pesquisa.

Aos demais professores da UnB que se empenharam em repassar seu conhecimento de forma tão exemplar.

Aos examinadores, os professores Marcos Honorato e Daniel Carlos, pela contribuição na correção e avaliação dessa dissertação.

À minha querida e amada Cida, que esteve ao meu lado durante todas os momentos, e me ajudou de inúmeras maneiras na elaboração dessa dissertação.

Aos meus amigos e colegas do PECC-UnB, pelo espírito de solidariedade e companheirismo ofertado durante os momentos de difíceis, e por alguns momentos de lazer e descontração que foram fundamentais para levar essa jornada com mais leveza.

Aos meus pais, avós e irmãos, que sempre estiveram me apoiado em todas as decisões.

## RESUMO

### VIGAS REFORÇADAS À FLEXÃO COM FRP APLICADOS COM A TÉCNICA NSM OU EBR

Autor: José Lucas Pessoa de Oliveira

Orientador: Guilherme Sales Soares de Azevedo Melo

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, junho de 2024

O emprego de materiais e técnicas mais eficientes é um tema frequente na construção civil. No contexto da reabilitação estrutural, destaca-se o reforço com aplicação de Polímeros Reforçados com Fibras (PRF ou FRP) podendo ser instalado diretamente sobre a superfície do concreto (EBR) ou por meio de entalhes no cobrimento de concreto (NSM).

Foi construído um banco de dados contendo resultados experimentais de 259 vigas reforçadas à flexão com FRP's, que serviu de base para análises comparativas entre as previsões obtidas por modelos teóricos estabelecidos pelo guia americano ACI 440.2R (2017) e a recomendação europeia do *Bulletin fib* 90 (2019).

Com o banco de dados, foi possível notar incrementos de resistência médio na ordem de 55% para reforços usando FRP-NSM e 43% para FRP-EBR, próximos aos resultados teóricos obtidos por meio da aplicação dos modelos. O ACI 440 gerou resultados um pouco aquém do esperado para previsão do modo de ruptura, *fib* 90 teve um desempenho melhor, com uma taxa máxima de acerto de 66%.

De maneira geral, os elementos reforçados com NSM mostraram tendencia a gerar resultados mais conservadores em comparação com a técnica EBR. Observando a relação entre carga última experimental e teórica, nota-se um bom nível de precisão para ambas as técnicas, com valores próximos à unidade em todos os casos. O ACI 440 teve resultados mais conservadores, porém menos precisos que o *fib* 90.

**Palavras-chave:** *Reforço de vigas; Polímero Reforçado com Fibra (PRF); ACI 440; FIB 90; NSM; EBR.*

## **ABSTRACT**

### **FRP FLEXURAL STRENGTHENING OF CONCRETE BEAMS WITH NSM AND EBR TECHNIQUES**

Autor: José Lucas Pessoa de Oliveira

Orientador: Guilherme Sales Soares de Azevedo Melo

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, junho de 2024

The use of more efficient materials and techniques is a frequent topic in civil construction. In the context of structural rehabilitation, the strengthening with Fiber Reinforced Polymers (FRP) stands out, which can be applied directly to the concrete surface (EBR) or through grooves in the concrete cover (NSM).

A database containing experimental results of 259 beams strengthened in flexure with FRPs was built, which served as a basis for comparative analyses between the predictions obtained by theoretical models established by the American guide ACI 440.2R (2017) and the European recommendation Bulletin fib 90 (2019).

With the database, it was possible to observe average strength increases of about 55% for reinforcements using FRP-NSM and 43% for FRP-EBR, close to the theoretical results obtained through the application of the models. The ACI 440 generated results that were slightly below expectations for the prediction of the failure mode, while fib 90 performed better, with a maximum accuracy rate of 66%.

In general, elements strengthened with NSM showed a tendency to generate more conservative results compared to the EBR technique. Observing the relationship between experimental and theoretical ultimate load, a good level of accuracy is noted for both techniques, with values close to unity in all cases. The ACI 440 presented more conservative results but less precise compared to fib 90.

**Keywords:** Strengthening of Beams; Fiber Reinforced Polymer (FRP); ACI 440; FIB 90; NSM; EBR.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 OBJETIVOS.....	3
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>4</b>
2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS .....	7
2.1.1 Contexto histórico .....	7
2.1.2 Aplicações do FRP em reforço de estruturas.....	9
2.1.3 Características físicas e mecânica dos FRP's.....	12
2.1.4 Vantagens e desvantagens .....	14
2.2 PESQUISAS SOBRE REFORÇO À FLEXÃO COM FRP'S .....	16
2.3 NOÇÕES SOBRE REFORÇO ESTRUTURAL EM ELEMENTOS FLETIDOS ...	20
2.3.1 Mecanismos de ruptura em reforços com FRP'S .....	20
2.3.2 Técnica de colagem EBR .....	26
2.3.3 Técnica de colagem NSM.....	28
2.4. NORMAS E RECOMENDAÇÕES TÉCNICAS SOBRE O TEMA.....	31
2.5.1 ACI 440.2R – 2017.....	34
2.5.2 <i>Bulletin fib 90 – 2019</i> .....	42
<b>3. METODOLOGIA.....</b>	<b>52</b>
3.1 APRESENTAÇÃO GERAL.....	52
3.2 CRITÉRIOS DE ANÁLISE .....	55
3.3 BANCO DE DADOS .....	58
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>63</b>
4.1. BANCO DE DADOS .....	63
4.2. AVALIAÇÃO DOS MODELOS DE CÁLCULO .....	69
4.2.1. ACI 440.2R (2017).....	69
4.3. <i>Bulletin fib 90 (2019)</i> .....	80
4.4. COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS DE CÁLCULO.....	91
<b>6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....</b>	<b>94</b>
6.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	94

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	96
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>98</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>1</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Fator de Redução ( $C_E$ ), de acordo com o ACI 440 (2017).....	35
Tabela 3.1: Descrição para os modos de ruptura assumidos nesse trabalho. ....	57
Tabela 3.2: Critério de classificação DPC proposto por Collins (2001) e adaptado por Moraes Neto (2013).....	57
Tabela 3.3: Banco de dados – resumo geral das pesquisas .....	60
Tabela 3.4: Resumo geral dos parâmetros mais relevantes. ....	61
Tabela 4.1: Resumo dos resultados para o ACI 440.2R (2017) .....	79
Tabela 4.2: Resumo dos resultados para o <i>Bulletin fib</i> 90 (2019).....	90
Tabela 4.3: Resumo dos resultados – ACI 440 vs <i>fib</i> 90.....	92

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Primeira pesquisa experimental no campo de reforço estrutural em vigas de concreto armado com materiais compósitos de CFRP (Adaptado de Meier, 1987). .....	8
Figura 2.2: Arranjo típico de reforço de vigas com FRP colado externamente (EBR).....	10
Figura 2.3: Reforço estrutural com FRP colado no interior de entalhes na camada de concreto de recobrimento das armaduras (NSM), adaptado do <i>Bulletin fib</i> 14 (2001).....	11
Figura 2.4: Tipologias mais comuns de reforço estrutural usando materiais compósitos, adaptado de Juvandes (1999).....	11
Figura 2.5: Comparação de algumas propriedades entre o aço, alumínio e compósitos de carbono (FRP), TALY (1998, apud JUVANDES, 1999).....	12
Figura 2.6: Diagrama tensão-deformação de materiais FRP e metais estruturais, BEBER (2003). .....	13
Figura 2.7: Perda de ductilidade em elementos reforçados, adaptado do <i>Bulletin fib</i> 90 (2019). .....	14
Figura 2.8: Comparação entre as técnicas de colagem NSM e EBR e um elemento de referência, adaptado de Coelho <i>et al</i> (2011).....	15
Figura 2.9: Tipos de ruptura em elementos reforçados com FRP, TRIANTAFILLOU (1998). .....	21
Figura 2.10: Tipos de ruptura em elementos reforçados com FRP-EBR, Adaptado do ACI 440 (2017). .....	22
Figura 2.11: Interfaces possíveis de sofrer descolamento, adaptado do <i>Bulletin fib</i> 90 (2019). .....	23
Figura 2.12: Desprendimento na região final do reforço em FRP devido a efeitos combinados de cisalhamento e tensões normais, adaptado do <i>Bulletin fib</i> 90 (2019).....	24
Figura 2.13: Desprendimento no concreto de cobertura das armaduras. Induzido pela fissura crítica na diagonal, próxima ao apoio, adaptado do <i>Bulletin fib</i> 90 (2019).....	24
Figura 2.14: Falhas de interface FRP-NSM, adaptado do <i>Bulletin fib</i> 90 (2019). .....	25
Figura 2.15: Mecanismos de desprendimento por CCS em FRP-NSM, adaptado do <i>Bulletin fib</i> 90 (2019). .....	26
Figura 2.16: Reforço de estruturas com a técnica de colagem FRP-EBR, adaptado do <i>Bulletin fib</i> 14 (2011). .....	27
Figura 2.17: Reforço de estruturas com a técnica de colagem FRP-NSM, Adaptado do <i>Bulletin fib</i> 90 (2019).....	29
Figura 2.18: Corte esquemático do sistema NSM, Caires (2022). .....	30
Figura 2.19: Entalhes no cobrimento de viga e laminados de CFRP inseridos, Araújo (2017). .....	30

Figura 2.20: Seção transversal de elemento em concreto reforçado à flexão com FRP, Adaptado de MATTHYS (2000).....	34
Figura 2.21: Equilíbrio de uma seção em concreto armado reforçada a flexão com FRP, Adaptado do ACI 440.2R (2017). .....	39
Figura 2.22: Domínios de deformação em uma seção reforçada à flexão com FRP's, <i>Bulletin FIB 90</i> (2019). .....	43
Figura 2.23: Gráfico Tensão-Deformação para elementos de FRP, Adaptado do <i>Bulletin FIB 90</i> (2019). .....	44
Figura 2.24: Seção transversal com reforço FRP-NSM, <i>Bulletin FIB 90</i> (2019).....	47
Figura 2.25: Elementos da seção transversal, e o equilíbrio estático de forças, <i>Bulletin fib 90</i> (2019) .....	47
Figura 2.26: Ruptura por CCS - Vão fictício de cisalhamento, analogia para elementos reforçados com FRP's, <i>Bulletin fib 90</i> (2019).....	50
Figura 3.1: Esquema de organização dessa dissertação. ....	54
Figura 3.2: Critérios de análise para o ACI 440 e <i>fib 90</i> . .....	55
Figura 4.1: Frequência vs Incremento de Resistência Experimental.....	63
Figura 4.2: Frequência vs Resistência à compressão do concreto.....	64
Figura 4.3: Frequência vs Módulo de elasticidade do FRP .....	65
Figura 4.4: Frequência para a relação entre área de reforço e área de armadura .....	65
Figura 4.5: Frequência vs Deformação última do FRP .....	66
Figura 4.6: Relação entre deformação experimental e deformação limite (informado pelo fabricante).....	67
Figura 4.7: Modo de Ruptura Experimental .....	68
Figura 4.8: Dispersão dos resultados para a relação entre a carga última experimental e teórica .....	70
Figura 4.9: Frequência para as relações carga última experimental e teórica (ACI).....	71
Figura 4.10: Deformação última experimental vs deformação última teórica (ACI).....	72
Figura 4.11: Relação carga experimental e carga teórica vs resistência à compressão do concreto .....	73
Figura 4.12: Relação carga experimental e carga teórica vs relação taxa de armadura equivalente e taxa de armadura .....	73
Figura 4.13: Relação carga experimental e carga teórica vs módulo de elasticidade do FRP .	74
Figura 4.14: Relação carga experimental e carga teórica vs Taxa de armadura .....	74
Figura 4.15: Relação carga experimental e carga teórica vs número de camadas de FRP.....	75
Figura 4.16: Relação carga experimental e carga teórica vs espessura ou diâmetro do FRP-NSM .....	76

Figura 4.17: Relação carga experimental e carga teórica vs espessura do FRP-EBR.....	76
Figura 4.18: Frequência para o Incremento de Resistência Teórico .....	78
Figura 4.19: Dispersão dos resultados para a relação entre a carga última experimental e teórica .....	81
Figura 4.20: Frequência para as relações carga última experimental e teórica ( <i>fib</i> ) .....	82
Figura 4.21: Deformação última experimental vs deformação última teórica ( <i>fib</i> ) .....	83
Figura 4.22: Relação carga experimental e carga teórica vs resistência à compressão do concreto .....	84
Figura 4.23: Relação carga experimental e carga teórica vs relação taxa de armadura equivalente e taxa de armadura .....	85
Figura 4.24: Relação carga experimental e carga teórica vs módulo de elasticidade do FRP .	85
Figura 4.25: Relação carga experimental e carga teórica vs taxa de armadura.....	86
Figura 4.26: Relação carga experimental e carga teórica vs número de camadas.....	86
Figura 4.27: Relação carga experimental e carga teórica vs espessura ou diâmetro do FRP-NSM .....	87
Figura 4.28: Relação carga experimental e carga teórica vs espessura ou diâmetro do FRP-EBR .....	87
Figura 4.29: Frequência para o Incremento de Resistência Teórico .....	89

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

- FRP – *Fiber Reinforcement Polymer*
- PRF – Polímeros Reforçados com Fibras
- PRFC – Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono
- PRFV – Polímeros Reforçados com Fibras de Vidro
- PRFA – Polímeros Reforçados com Fibras de Aramida
- CFRP - *Carbon Fiber Reinforced Polymer*
- GFRP - *Glass Fiber Reinforced Polymer*
- AFRP - *Aramid Fiber Reinforced Polymer*
- NSM – *Near Surface Mounted*
- EBR – *Externally Bonded Reinforcement*
- UnB – Universidade de Brasília
- NBR – Norma Brasileira
- FIB – Federação Internacional do Concreto (Comitê Europeu)
- ACI – American Concrete Institute
- IC – Incremento de Carga
- RC – Ruptura clássica (concreto, aço ou ambos)
- RF – Ruptura clássica por falha no FRP (sem descolamento)
- RP – Ruptura prematura do FRP (descolamento)
- RP-IC – Ruptura prematura por *Intermediate Crack Debonding*
- RP-ED - Ruptura prematura por *End Debonding*
- RP-CCS - Ruptura prematura por *Concrete Cover Separation*
- CoV – Coeficiente de Variação estatístico
  
- $P_{ult,exp}$  – Carga última experimental
- $P_{ult,teo}$  – Carga última teórico
- $M_{rd}$  – Momento fletor resistente da seção transversal
- $c$  – Altura da linha neutra – ACI 440
- $x$  – Altura da linha neutra – *FIB Bulletin* 90 e NBR 6118/23

- $h$  – Altura da seção transversal
- $h_f$  – Altura da mesa (caso de seção Tê)
- $b$  – Largura da seção
- $b_f$  – Largura da mesa (caso de seção Tê)
- $a_v$  – Vão de cisalhamento
- $L$  – Comprimento total da viga (vão)
- $l_b$  – Comprimento de ancoragem do FRP
- $t_f$  – Espessura do FRP
- $b_f$  – Largura do FRP
- $n$  – Quantidade de camadas de FRP
- $d$  – Altura útil da armadura inferior
- $d'$  – Altura útil da armadura superior
- $d_f$  – Altura útil da camada de FRP
- $A_c$  – Área da seção transversal
- $A_s$  – Área de aço da armadura inferior
- $A_{s'}$  – Área de aço da armadura superior
- $f_y$  – Tensão de escoamento do aço
- $f_f$  – Tensão última no FRP
- $f_c$  – Tensão resistente à compressão para o concreto (valor médio)
- $f_{ck}$  – Tensão resistente à compressão para o concreto (valor característico)
- $f_{cd}$  – Tensão resistente à compressão para o concreto (valor de cálculo)
- $f_{fe}$  – Tensão de efetiva no reforço em FRP
- $E_s$  – Módulo de elasticidade do aço
- $E_f$  – Módulo de elasticidade do FRP
- $E_c$  – Módulo de elasticidade do concreto
- $\varepsilon_{fu}$  – Deformação última do FRP (ruptura)
- $\varepsilon_{fd}$  – Deformação limite no FRP (de projeto)
- $\varepsilon_{ult,exp}$  – Deformação última experimental no FRP
- $\varepsilon_{bi}$  – Deformação existente na fibra mais tracionada
- $\varepsilon_c$  – Deformação no concreto

- $\varepsilon_{cu}$  – Deformação última do concreto
- $\varepsilon_{fe}$  – Deformação efetiva no reforço em FRP (desconta deformação existente)
- $\varepsilon_{fd,IC}$  – Deformação limite no FRP para evitar ruptura por *Intermediate Crack Debonding*
- $\varepsilon_{fd,ED}$  – Deformação limite no FRP para evitar ruptura por *End Debonding*
- $\varepsilon_{sy}$  – Deformação de escoamento do aço (CA-50)
- $\varepsilon_s$  – Deformação na armadura inferior
- $\varepsilon_{s'}$  – Deformação na armadura superior
- $\beta_1$  - Fator para ajustar altura do bloco de compressão - ACI 440
- $k_1$  - Fator para ajustar a intensidade do bloco de compressão – *FIB Bulletin 90*
- $\alpha_1$  – Fator para intensidade do bloco de compressão - ACI 440
- $k_2$  - Fator para ajustar o baricentro do bloco de compressão – *FIB Bulletin 90*
- $\psi_f$  – Fator de redução da resistência para o FRP - ACI 440
- $\phi$  – Fator de redução para o momento resistente - ACI 440
- $\rho_s$  – Taxa de armadura existente (passiva)
- $\rho_f$  – Taxa de reforço em FRP

## 1. INTRODUÇÃO

O reforço estrutural é uma técnica utilizada na construção civil cujo objetivo é aumentar a resistência de uma estrutura, para que esta atenda aos requisitos de segurança. Seu uso está relacionado a diversos fatores, tais como: resistências do material abaixo da especificação, utilização não prevista da edificação, e erros de projeto/execução. Construções mais antigas, com manutenção negligenciada, alteração de uso ou readequação de ambientes, também podem necessitar de intervenção estrutural.

Um método comum para realizar reforço estrutural ocorre pelo aumento da seção transversal da peça, que engloba o envelopamento do elemento com material (concreto armado) suficiente para atingir a resistência necessária. O uso de perfis metálicos ou chapas metálicas chumbadas no elemento também pode ser empregado. Esses métodos, embora eficientes, podem causar interferência estética e funcional considerável, tornando-se impraticáveis em certos casos.

Existem diversos métodos para incrementar a capacidade de carga em estruturas já construídas, que podem envolver reparação ou reforço propriamente dito. Um método de reforço que tem se mostrado bastante interessante é o emprego de materiais compósitos, geralmente conhecidos como Polímeros Reforçados com Fibras (PRF ou FRP – *Fiber Reinforced Polymer*).

No mercado, os FRP's são encontrados na forma de mantas, laminados ou barras. Esses materiais podem ser instalados por meio de diversas técnicas, sendo as principais a EBR (*Externally Bonded Reinforcement*), que consiste na aplicação de mantas ou laminados diretamente sobre a superfície externa do elemento, e a técnica NSM (*Near Surface Mounted*), na qual o FRP é instalado no interior de entalhes executados no concreto de recobrimento. Nos últimos anos, foram desenvolvidas outras técnicas de colagem, inclusive usando sistemas mistos, porém, as técnicas NSM e EBR estão entre as mais utilizadas no meio técnico e serão objeto de estudo neste trabalho.

O emprego de materiais poliméricos apresenta uma série de vantagens, como a boa relação entre resistência mecânica e peso específico, o que permite mobilizar tensões significativas com uma quantidade reduzida de FRP. A execução é relativamente simples, porém exige mão de obra qualificada. O processo é limpo e rápido em comparação a outras

técnicas, possibilitando que a estrutura reforçada entre em condição de trabalho mais rapidamente, além de não gerar quase nenhuma alteração geométrica ou estética no elemento.

Conforme comentado por Dalfré, Alves e Oliveira (2019), as fibras de vidro, aramida e carbono são as mais comuns nos FRP's, conhecidas respectivamente como GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymers*), AFRP (*Aramid Fiber Reinforced Polymers*) e CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymers*). Entre os compósitos citados, o fabricado com fibras de carbono (CFRP em inglês ou PRFC em português) é o mais aplicado em intervenções de reforço estrutural.

Silva (2014) observa que, em pesquisas envolvendo materiais compósitos e a técnica EBR, o reforço apresenta desempenho semelhante ou superior ao realizado com materiais metálicos. No entanto, exige cuidados especiais durante a colagem, principalmente devido aos problemas causados pelo desprendimento do FRP, além de questões relacionadas à ductilidade e durabilidade.

Em geral, as estruturas, principalmente vigas e lajes, devem apresentar um nível adequado de ductilidade, com o objetivo de alertar os usuários e evitar acidentes devido a falhas inesperadas da estrutura. Os códigos normativos, práticas recomendadas, guias e pesquisadores em todo o mundo têm dado atenção especial aos modos de ruptura prematuros que surgem em elementos reforçados com FRP's, sendo uma questão importante para alcançar a máxima eficiência do reforço e prevenir falhas abruptas, sem aviso prévio.

O guia americano que trata do reforço com materiais compósitos é o ACI 440.2R (2017), cujo desenvolvimento foi baseado em resultados experimentais, estudos analíticos e monitoramento de estruturas realizados desde a década de 1980. Diferentes modos de ruptura foram observados nas pesquisas, incluindo rupturas clássicas causadas por falhas no concreto ou na armadura, e rupturas prematuras causadas pelo descolamento do material de reforço. O documento estabelece uma deformação limite a ser utilizada no FRP para inibir falhas por descolamento, além de apresentar recomendações distintas para as técnicas EBR e NSM.

A Federação Internacional do Concreto, em seu *Bulletin fib 90* (2019), descreve procedimentos de análise e dimensionamento para reforço estrutural com FRP, com base no *Euro Code* (EN 1990 e 1992) e *fib Model Code* (2010), com algumas adaptações para o uso de materiais compósitos. Diferente do guia americano, o *Bulletin fib 90* (2019) apresenta alguns modelos teóricos baseados em pesquisas mais recentes para avaliar os vários modos de ruptura que podem ocorrer tanto no sistema NSM quanto no sistema EBR.

A norma brasileira para projeto de estruturas de concreto armado e protendido, a ABNT NBR 6118 (2023), não aborda em seu escopo o uso de FRP's. Os projetistas do país podem recorrer as recomendações publicadas pelo Comitê Técnico CT303 - Práticas Recomendadas IBRACON/ABECE (2023), que aborda sobre o Reforço de elementos estruturais de concreto com sistemas de polímeros reforçados com fibras (FRP) aplicados externamente, a qual utiliza critérios de projeto baseados no *Bulletin fib* 90 (2019) e ACI 440.2R (2017). Com o desenvolvimento crescente desses materiais, espera-se que critérios específicos para o dimensionamento de reforço com FRP sejam inseridos futuramente em normas técnicas nacionais.

Este trabalho visa esclarecer algumas dúvidas que surgem no processo de elaboração de projetos de reforço. Busca-se avaliar qual modelo de cálculo é mais preciso na avaliação da carga última, deformação limite no FRP e modo de ruptura. Dessa forma, o foco desta pesquisa estará na avaliação dos modelos teóricos estabelecidos por guias técnicos, quanto à previsibilidade da carga de ruptura e o modo de falha em elementos reforçados à flexão com FRP, aplicados por meio da técnica NSM ou EBR.

## 1.1 OBJETIVOS

Esse trabalho tem por objetivo primário a análise dos modelos de cálculo para reforço à flexão em elementos do tipo viga, ao utilizar FRP's aplicados com a técnica NSM ou EBR. De maneira específica:

- Construir um banco de dados com resultados de pesquisas experimentais que envolve a aplicação de FRP's como técnica de reforço estrutural à flexão em vigas;
- Analisar os resultados obtidos com a aplicação dos modelos de cálculo presentes no ACI 440.2R (2017) e *Bulletin fib* 90 (2019);
- Comparar as técnicas de colagem EBR e NSM quanto ao ganho de resistência adquirido com aplicação do reforço.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

Na construção civil, há diversos casos nos quais é necessário aumentar a capacidade de carga de uma estrutura. Em certas situações, uma edificação pode ter sua utilização alterada e receber solicitações superiores às inicialmente previstas no projeto. Também podem ocorrer falhas no projeto ou na execução, resultando em uma estrutura construída com resistência aquém do necessário. Para resolver esses problemas, a solução frequentemente envolve recuperação ou reforço estrutural.

A utilização de FRP's no reforço de estruturas tem se destacado como uma solução eficaz, especialmente para a reabilitação e fortalecimento de infraestruturas existentes. Essa técnica envolve a aplicação de armaduras não metálicas, empregando sistemas compósitos de FRP em diversos formatos, como laminados, mantas e tecidos, que são colados diretamente sobre as superfícies estruturais a serem reforçadas.

O reforço usando materiais compósitos pode ser instalado por meio de diferentes técnicas, variando conforme a necessidade específica de cada caso. Entre as mais comuns, encontra-se a técnica conhecida como *External Bonded Reinforcement* (EBR) ou, em português, Colagem na Superfície do Concreto (CSC), na qual lâminas ou mantas de FRP são aderidas à superfície externa do elemento estrutural, utilizando resinas adesivas. A técnica EBR tem sido amplamente adotada em projetos de reabilitação e reforço devido à sua simplicidade de implementação e boa performance estrutural (Pawlak, 2022).

Na prática do reforço estrutural, é importante que os componentes, especialmente vigas e lajes, mantenham um grau adequado de ductilidade para permitir a identificação prévia de falhas, minimizando assim o risco de acidentes inesperados (Sagatov, 2023). Pesquisadores têm enfatizado a importância de compreender os diferentes modos de ruptura em elementos reforçados com FRP, visando aprimorar a eficácia dessas intervenções e evitar falhas abruptas nas estruturas.

Dessa forma, a aplicação de FRP pelo método EBR oferece várias vantagens. Em primeiro lugar, a elevada resistência à tração e a baixa densidade resultam em um aumento substancial da capacidade de carga das estruturas reforçadas, sem adicionar peso significativo. Isso é particularmente importante em situações em que o aumento da carga deve ser minimizado, como em pontes ou edifícios históricos. Adicionalmente, a resistência à corrosão

do FRP garante uma solução de reforço durável, ideal para ambientes agressivos ou para estruturas expostas a agentes corrosivos (Hosen *et al.*, 2021; Moshiri *et al.*, 2023).

Outro aspecto relevante da técnica EBR é a flexibilidade de aplicação. As lâminas de FRP podem ser cortadas e adaptadas no local para se ajustarem às geometrias complexas das estruturas, permitindo um reforço efetivo em áreas de difícil acesso ou com configurações irregulares. Além disso, a aplicação de CFRP não requer grandes intervenções na estrutura existente, o que reduz o tempo de inatividade da edificação e permite que o reforço seja realizado sem grandes perturbações para os usuários da estrutura (Hossen; Mostofinejad, 2013).

A técnica de EBR é amplamente adotada e, embora seja eficaz, pode enfrentar dificuldades relacionadas ao descolamento do reforço antes de atingir a capacidade máxima de utilização do material. Esse descolamento pode ocorrer na interface entre o reforço e a resina adesiva, entre a resina e o concreto de cobrimento, ou até mesmo com a remoção do concreto de cobrimento. Outro aspecto é que essa abordagem pode ser vulnerável a danos causados por vandalismo e exposição a elementos agressivos, requerendo também medidas de proteção contra incêndios (Ghaleh; Mostofinejad, 2022).

Por outro lado, a aplicação do reforço pela técnica de colagem NSM aumenta a proteção das fibras contra impactos físicos, atos de vandalismo e exposição a agentes agressivos, uma vez que as fibras ficam embutidas no concreto. Isso contribui para a longevidade do reforço e para a manutenção da integridade estrutural ao longo do tempo. A técnica NSM também minimiza alterações nas dimensões originais e na estética da estrutura, consideração importante em muitos projetos de reabilitação (Effiong; Ede, 2022).

Entretanto, embora a técnica NSM ofereça esses benefícios, sua execução demanda precisão na preparação das ranhuras e na aplicação da resina adesiva, requerendo mão de obra especializada e atenção aos detalhes para garantir a eficácia do reforço. Além disso, é necessário realizar uma avaliação prévia da estrutura para determinar sua viabilidade, considerando a espessura do cobrimento de concreto e a localização das armaduras existentes (Cruz *et al.*, 2020).

O guia americano ACI 440.2R (2017) baseia-se em extensivas pesquisas, análises teóricas, experimentações e monitoramentos estruturais realizados desde os anos 1980, adotando um procedimento de projeto conservador. Esta abordagem identificou uma variedade de modos de ruptura em elementos reforçados com FRP, desde falhas convencionais até falhas

prematuras por descolamento do reforço. Avalia-se que ainda são necessários mais ensaios sobre esse tema. No entanto, de maneira prática, o guia estabelece uma deformação limite a ser utilizada no FRP para inibir qualquer falha por descolamento, apresentando recomendações para as técnicas EBR e NSM (Al-Mahaidi; Kalfat, 2018).

No contexto normativo, o Bulletin *fib* 90 (2019), ancorado nos princípios do *Euro Code* (EN 1990 e 1992) e do *fib* Model Code (2010), introduz modelos teóricos adaptados para elementos reforçados com FRP, contrastando com o guia americano por sua base em evidências experimentais mais recentes. Esses modelos buscam entender os diversos modos de ruptura possíveis, tanto em aplicações NSM quanto EBR (Hobbs *et al.*, 2022).

Embora o concreto armado tenha excelente resistência e durabilidade, as estruturas de concreto podem estar sujeitas a vários fatores que exigem reparo ou reforço estrutural. Esses fatores incluem o envelhecimento natural, materiais de baixa qualidade, erros de projeto ou execução, incêndios, falta de manutenção e mudanças no uso ou padrões atualizados, podendo levar à necessidade de medidas de fortalecimento para garantir o desempenho contínuo e a durabilidade das estruturas (Yang, 2023).

Materiais estruturais reforçados com fibras de carbono são reconhecidos pela literatura não apenas pela facilidade e rapidez de aplicação, mas também por possuírem características interessantes como resistência mecânica elevada, grande rigidez, baixo peso específico e alta resistência à corrosão, fatores que justificam seu uso. Além disso, os CFRP são empregados em forma de lâminas de espessura reduzida, provocando alterações mínimas nas dimensões dos componentes estruturais a serem reforçados (Alshammari, 2021; Lamba *et al.*, 2022; Khan *et al.*, 2023).

O reparo é o processo de restauração da capacidade original ou adequação de uma estrutura ou componente que sofreu deterioração, dano ou falha. O objetivo do reparo é trazer a estrutura de volta ao seu estado inicial ou corrigir defeitos específicos, sem necessariamente aumentar sua capacidade de carga. Por outro lado, o reforço é o processo de modificação de uma estrutura existente para melhorar ou corrigir sua capacidade de resistir a cargas (Faraj; Karim, 2020).

## 2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

Materiais compósitos são materiais formados pela combinação de dois ou mais componentes distintos em uma nova substância que apresenta propriedades físicas e químicas diferentes daquelas dos materiais originais. Esses componentes, geralmente classificados como matriz e reforço, trabalham juntos para criar um material com características superiores às dos materiais individuais (Chawla, 2012).

Os materiais compósitos conhecidos como FRP representam uma classe de materiais de engenharia que são constituídos por uma matriz polimérica, que pode ser de resina epóxi, poliéster, viniléster, ou outro polímero, reforçada com fibras, como fibra de carbono, vidro ou aramida. A matriz polimérica atua como um ligante que mantém as fibras no lugar, protegendo-as e distribuindo as cargas mecânicas entre elas (Rajak *et al.*, 2021).

A principal vantagem dos FRP's reside na sua alta relação resistência-peso, que os torna ideais para aplicações onde a leveza e a durabilidade são críticas, como na indústria aeroespacial, automotiva, construção civil, e na fabricação de equipamentos esportivos. Além disso, os FRP's apresentam excelente resistência à corrosão, o que os torna preferíveis em ambientes agressivos ou onde a manutenção é difícil ou dispendiosa (Amran *et al.*, 2018).

Os FRP's podem ser moldados em formas complexas, oferecendo flexibilidade no design e na aplicação. Isso, combinado com a possibilidade de ajustar a orientação e o tipo de fibra, permite a engenheiros otimizar a resistência e a rigidez de acordo com as necessidades específicas de cada projeto. A capacidade de personalização e a versatilidade dos FRPs abriram novos horizontes no desenvolvimento de soluções de engenharia, permitindo a exploração de novas formas e a realização de projetos que seriam impossíveis com materiais tradicionais (Hensher, 2016).

### 2.1.1 Contexto histórico

Sabe-se que materiais compósitos, sejam de origem natural ou criados pelo homem, são utilizados há milhares de anos. A madeira é um exemplo de compósito natural, sendo a combinação de fibra celulósica e lignina (Keya *et al.*, 2019). Os materiais compósitos plásticos utilizados antes do século 20 eram produzidos com produtos resinosos naturais como piche, caseia e albumina. As primeiras resinas laminares sintéticas foram produzidas por Berzelius em

1897, sendo precursoras das resinas fenólicas. O início da era dos compósitos plásticos se dá com a produção de poliéster insaturado reforçado com fibra de vidro. (EMMONS *et al*, 1998).

De acordo com Haka (2023), os materiais compósitos desempenham funções estruturais importantes desde 1940, no campo da engenharia militar, aeroespacial, náutica, ferroviária e automobilística. O reforço de estruturas pela técnica de colagem, em particular com armaduras não metálicas, foi testado desde 1984, em centros de pesquisa na Suíça e Alemanha, e posteriormente suas potencialidades foram confirmadas em universidades dos EUA, Canadá e Japão. Os laminados pré-fabricados de FRP surgiram na Europa e as mantas e tecidos tiveram origem no Japão e EUA.

Meier (1987) realizou de forma pioneira o ensaio em uma viga de concreto armado com 2,4 metros de comprimento, reforçada com lâmina de CFRP de 0,3 mm de espessura e 200 mm de largura, conforme pode ser visto na Figura 2.1. Observou um aumento na capacidade de carga da viga na ordem de 30%. Apesar do número reduzido de modelos ensaiados, o autor apresentou resultados em que se compromete a substituir o aço pelo compósito com redução de custos na ordem de 25% (Yang, 2019).

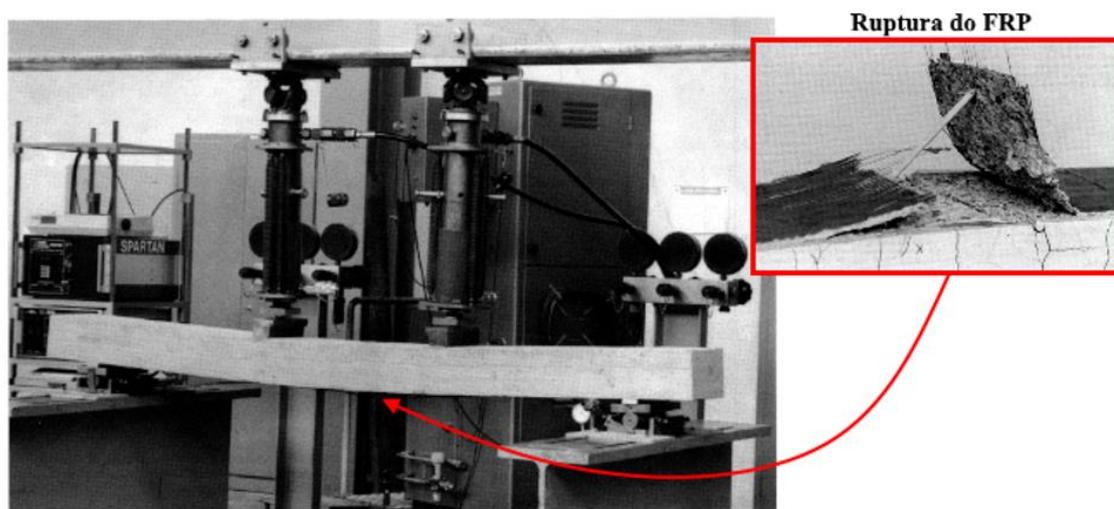


Figura 2.1: Primeira pesquisa experimental no campo de reforço estrutural em vigas de concreto armado com materiais compósitos de CFRP (Adaptado de Meier, 1987).

Arquez (2010) relata que os japoneses foram os precursores da técnica de reforço com materiais compósitos, principalmente os fabricados com fibra de carbono, motivados pela preocupação com as consequências nas estruturas de concreto armado causadas pelos abalos sísmicos que ocorrem com frequência no país. A intenção era desenvolver processos rápidos

para recuperar as estruturas danificadas e prevenir possíveis problemas estruturais. Muitas pesquisas foram realizadas após a ocorrência do terremoto de Kobe, em 1995, onde na época, centenas de estruturas de concreto armado foram reforçadas com fibras de carbono e muitas delas monitoradas para estudo de desempenho com o passar do tempo. Desde então, a técnica se difundiu no mundo e atualmente vários países como Canadá, Estados Unidos e Japão já criaram normas e guias técnicos específicos para elaboração de projetos de reforço utilizando materiais compósitos.

Conforme descrito no ACI 440.2R (2017), os primeiros códigos normativos sobre reforço com sistemas FRP's foram publicados no Japão pela "*Japan Society of Civil Engineers*" em 2001, e na Europa pela "*Internacional Federation for Structural Concrete*" também em 2001. Desde 1930, pesquisadores dos Estados Unidos têm mostrado interesse no tema de reforço utilizando materiais compósitos, no entanto, somente a partir de 1980 se iniciou o desenvolvimento de pesquisas com o uso desses materiais para *retrofitting* de estruturas de concreto, por iniciativa da "*National Science Foundation*" (NSF) e da "*Federal Highway Administration*" (FHWA).

### 2.1.2 Aplicações do FRP em reforço de estruturas

Esses materiais são aplicados de forma diversas, para reforço a flexão ou cisalhamento em vigas, lajes e muros de arrimo, para reforço à compressão no cintamento de pilares e até mesmo reforço a punção em lajes lisas. A maior preocupação nesse serviço está na eficiência da aderência do FRP no substrato de concreto, seja inserido diretamente sobre a superfície (EBR) ou no interior de entalhes na camada de cobrimento das armaduras (EBR).

Dentre os vários tipos de compósitos, os polímeros reforçados com fibras (FRP), têm atraído a atenção de pesquisadores envolvidos com aplicações da engenharia estrutural, destacando-se por sua viabilidade econômica e eficácia técnica em comparação com as técnicas convencionais de reforço. As pesquisas indicam que esses materiais compósitos oferecem uma combinação única de resistência à corrosão, elevado módulo de elasticidade, baixo peso e alta resistência mecânica, tornando-os ideais para a aplicação em diversas estruturas, como aço, madeira, alvenaria e concreto armado (Obaidat *et al.*, 2011).

Na Figura 2.2, é possível ver um arranjo típico de reforço à flexão em uma viga de concreto armado, usando FRP colado na fibra inferior (mais solicitada à tração). O

carregamento atuante durante e após o processo de reforço diz respeito às ações permanentes (G) devido ao peso próprio dos materiais/equipamentos e as ações variáveis (Q). O compósito será instalado diretamente na superfície de concreto sendo colado por meio de uma camada de adesivo (normalmente resinas), após sua cura, a estrutura já estará apta a receber os novos carregamentos para o qual foi reforçada.

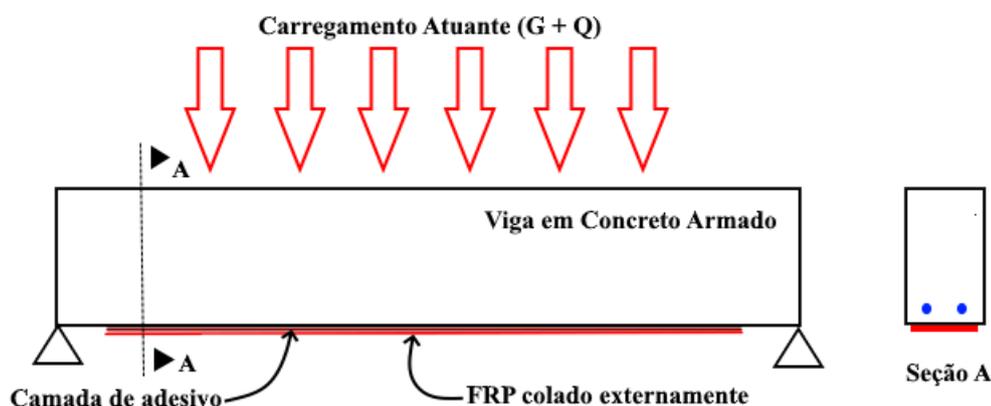


Figura 2.2: Arranjo típico de reforço de vigas com FRP colado externamente (EBR).

O reforço pode ser colado externamente na superfície de concreto, quando utilizados elementos de FRP na forma de mantas, tecidos ou laminados, essa técnica de reforço é conhecida como CSC ou EBR. Quando empregados elementos de FRP na forma de laminados ou barras, esse procedimento é conhecido como CEC ou NSM (Hollaway, 2013), conforme pode ser visto na Figura 2.3. Juvandes (1999) relata que civilizações antigas já usavam o “princípio da aderência” em construções de madeira e pedra, empregando misturas adesivas como sangue de animais e resinas naturais para ligar diferentes materiais. Ao longo do tempo essa técnica evoluiu, ajustando-se na construção civil no campo do reforço estrutural. Inicialmente era aplicado a armaduras metálicas, fixadas com adesivos sintéticos que promovem a ligação entre o concreto e o elemento de reforço.

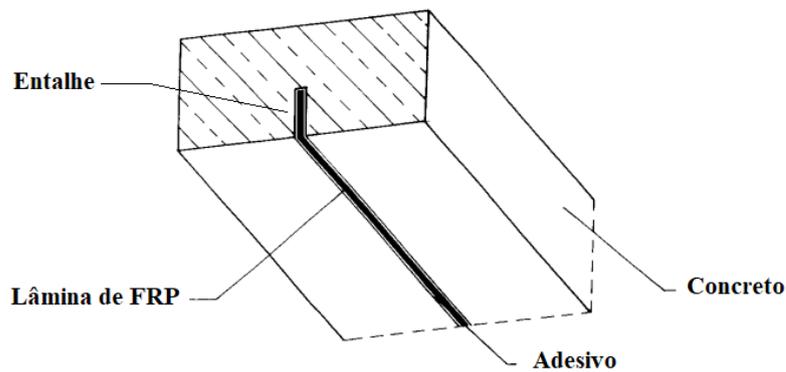


Figura 2.3: Reforço estrutural com FRP colado no interior de entalhes na camada de concreto de recobrimento das armaduras (NSM), adaptado do Bulletin *fib* 14 (2001).

Exemplos de aplicação de reforços usando FRP's por meio da técnica de colagem na superfície (EBR) são ilustrados na Figura 2.4. Pode ser aplicado para incrementar a capacidade resistente de elementos à flexão, ao corte e à compressão.

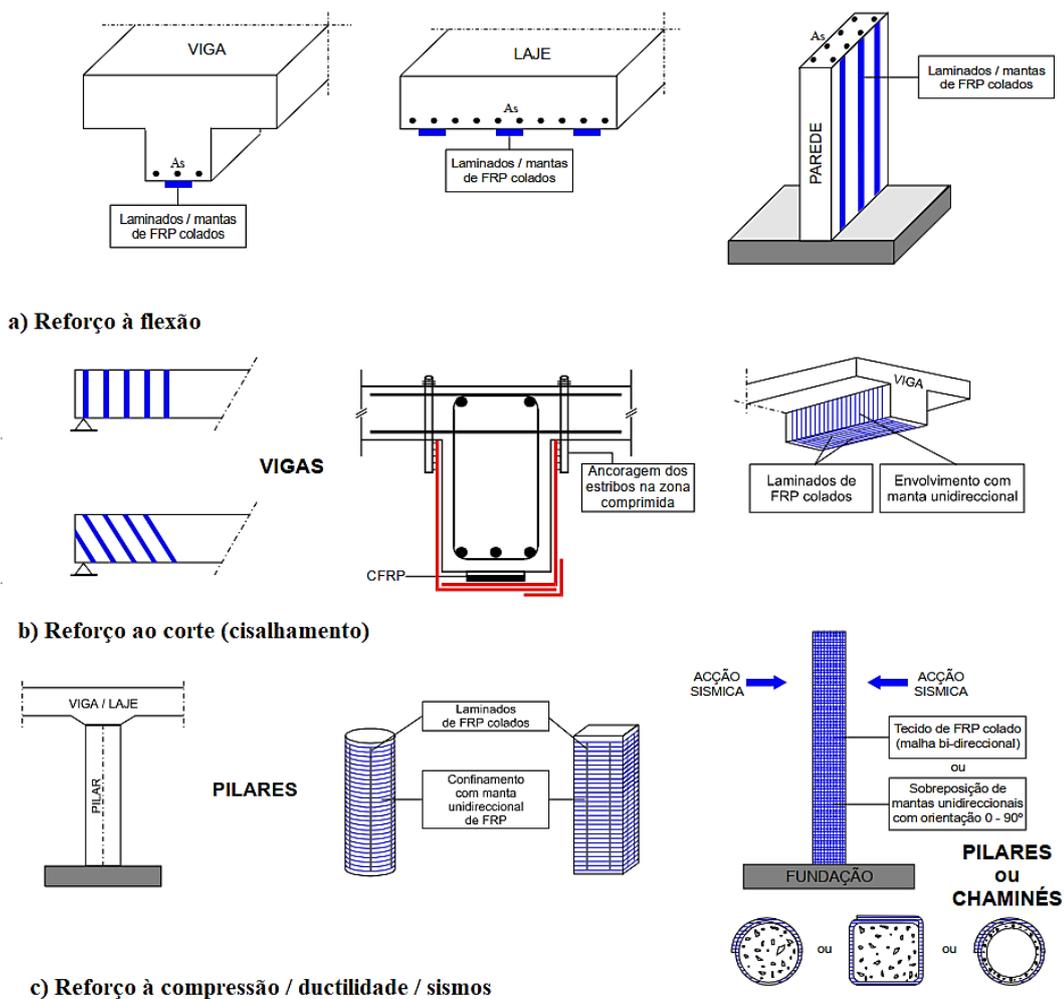


Figura 2.4: Tipologias mais comuns de reforço estrutural usando materiais compósitos, adaptado de Juvandes (1999).

### 2.1.3 Características físicas e mecânica dos FRP's

Materiais em FRP possuem densidade inferior aos materiais normalmente usados em obras convencionais, como estruturas em concreto ou aço. Em comparação com o aço estrutural que possui  $7,9 \text{ g/cm}^3$  de densidade, compósitos fabricadas com fibra de carbono (CFRP) podem ter entre  $1,2$  e  $2,1 \text{ g/cm}^3$ , fabricados com fibra de vidro (GFRP) entre  $1,5$  e  $1,6 \text{ g/cm}^3$  e quando fabricados em fibra de aramida entre  $1,2$  e  $1,5 \text{ g/cm}^3$  (ACI 440.2R, 2017).

Na Figura 2.5 é apresentado a comparação de algumas propriedades entre o aço, alumínio e materiais compósitos. Pode-se observar que os compósitos apresentam excelentes relações de rigidez e resistência mecânica em relação ao seu peso, quando comparado aos demais materiais.

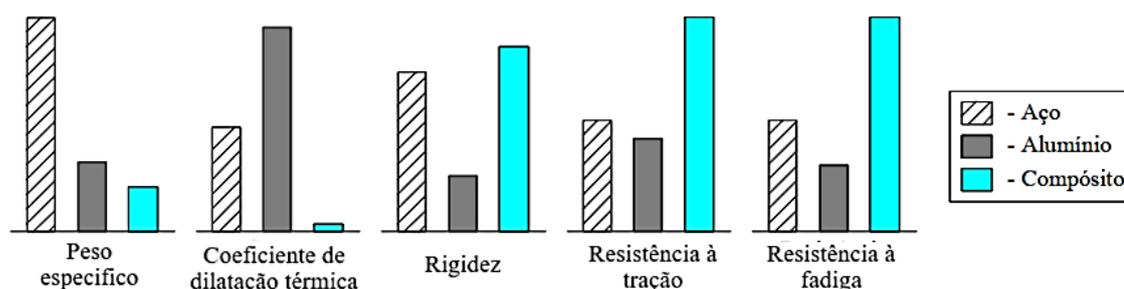


Figura 2.5: Comparação de algumas propriedades entre o aço, alumínio e compósitos de carbono (FRP), TALY (1998, apud JUVANDES, 1999).

Conforme comentando por Melo (2017), as fibras têm a função de conferir rigidez e resistência ao material compósito. Elas podem variar em função do tipo, tamanho, grau de concentração e disposição na matriz. A direção principal da fibra detém o maior valor de resistência e rigidez da peça.

O tipo de fibra, a matriz polimérica e a interface de ligação entre ambos exercem grande influência na resistência e na rigidez dos compósitos de FRP. Cada componente deve apresentar um conjunto de características que permita um desempenho satisfatório do compósito. (HOLLAWAY, 1993 apud BEBER, 2003).

O módulo de elasticidade desses materiais é relativamente próximo ao do aço utilizado nas estruturas de concreto armado, sendo na ordem de  $200 \text{ GPa}$ . Para efeito de comparação é apresentado na Figura 2.6 o comportamento desses materiais quando submetidos a um ensaio de tração.

Uma característica relevante dos FRP é comportamento perfeitamente elástico e linear, não apresentando qualquer patamar de escoamento, ou seja, a forma de ruptura do material sempre será brusca, sem aviso prévio, ao contrário do aço estrutural que apresenta grandes deformações antes de romper, quando submetidos esforços de tração. No mercado são encontrados FRP fabricados com diferentes tipos de fibras, as mais comuns são as de carbono, vidro, aramida e basalto.

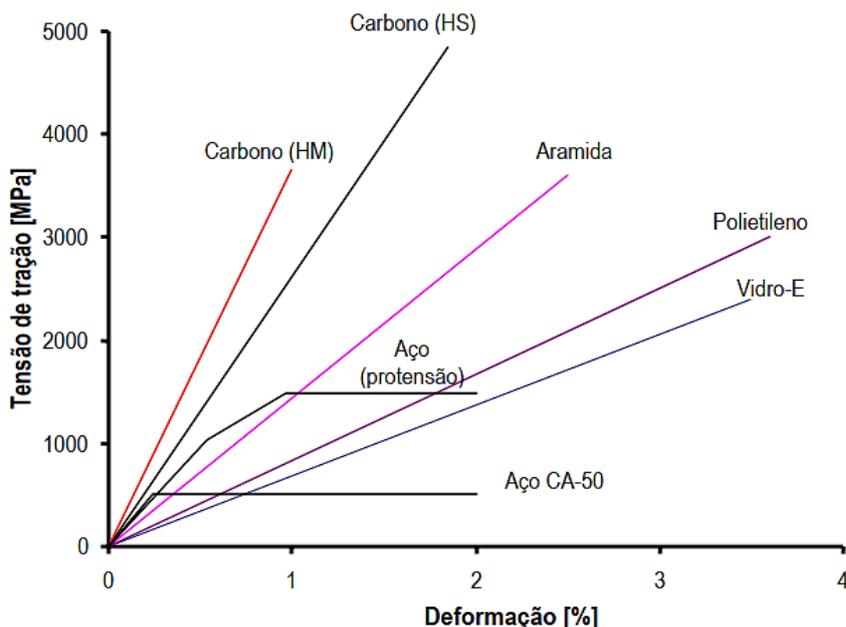


Figura 2.6: Diagrama tensão-deformação de materiais FRP e metais estruturais, BEBER (2003).

No diagrama de tensão-deformação (Figura 2.6) comparativo entre diferentes materiais de reforço de fibra e metais estruturais, é possível observar que o carbono em suas duas formas, HS (*High Strength*) e HM (*High Modulus*), possui as curvas mais íngremes, indicando alta resistência e módulo de elasticidade. A fibra de aramida e o polietileno, por sua vez, mostram uma resistência moderada, porém com maior deformabilidade. No que se refere aos metais, o aço utilizado na protensão tem resistência superior ao aço CA-50, porém ambos apresentam patamar de escoamento, sofrendo deformações significativas antes da ruptura, em comparação com os materiais FRP. O Vidro-E, um tipo de fibra de vidro, se coloca entre os metais e os FRPs em termos de resistência e deformabilidade, porém, com os menores valores dentre os demais.

#### 2.1.4 Vantagens e desvantagens

De acordo com o *Bulletin fib 90* (2019), elementos estruturais reforçados com FRP apresentam melhorias significativas. No entanto, é importante destacar que mudanças significativas podem ocorrer no elemento estrutural, principalmente devido aos novos modos de ruptura que podem ocorrer.

Na Figura 2.7 são ilustradas curvas típicas de carga-deflexão para elementos não reforçados e elementos com diferentes níveis de reforço. Diante disso, podem ser destacados os seguintes pontos:

- Ocorre incremento de carga e rigidez na viga reforçada com FRP;
- Diminuição da deflexão para cargas de serviço;
- Diminuição na abertura de fissuras em relação ao elemento não reforçado;
- O momento de escoamento é ligeiramente aumentado;
- Aumento considerável na capacidade de carga do elemento reforçado;

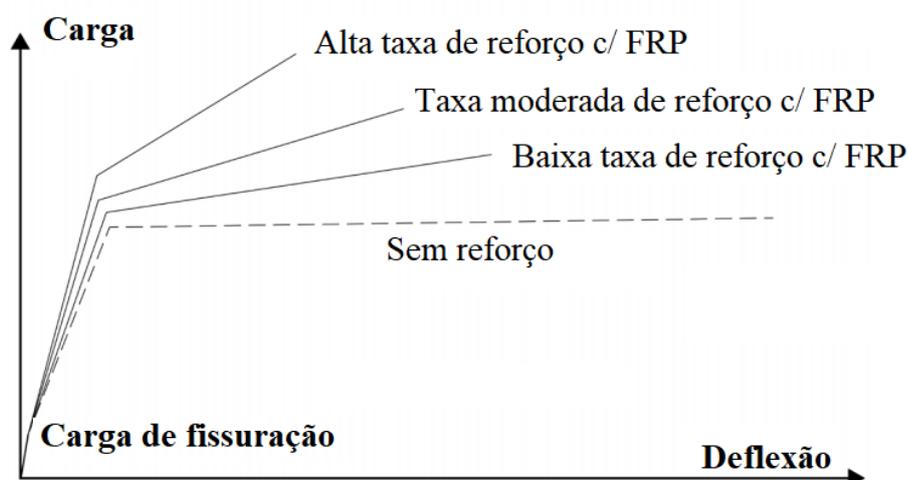


Figura 2.7: Perda de ductilidade em elementos reforçados, adaptado do *Bulletin fib 90* (2019).

Geralmente a eficiência do reforço estrutural ao empregar CFRP's depende da resistência da interface de contato entre ele e o elemento de concreto, normalmente a aderência é realizada com adesivos específicos, como resinas-epóxi. O comportamento dessa ligação é essencialmente afetado pelas propriedades mecânicas do CFRP e do adesivo utilizado, bem como a rugosidade da superfície de concreto (ABDALLAH *et al*, 2021).

Na Figura 2.8 são apresentadas curvas força-deslocamento de resultados experimentais obtidos por Coelho *et al.* (2011) comparando elementos reforçados a flexão empregando as técnicas de colagem NSM e EBR. É possível notar um ganho de resistência e um maior nível de ductilidade quando empregada a técnica NSM.

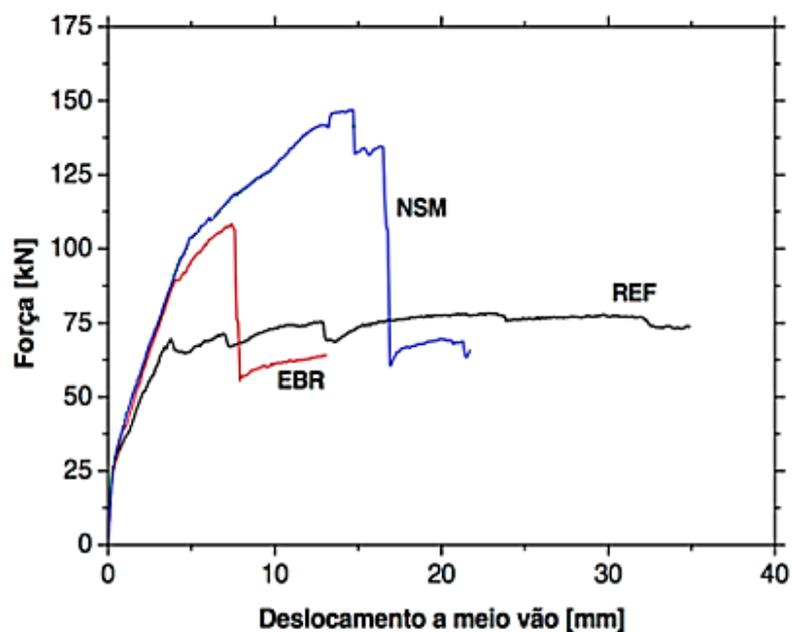


Figura 2.8: Comparação entre as técnicas de colagem NSM e EBR e um elemento de referência, adaptado de Coelho *et al.* (2011).

Outros estudos demonstraram que a técnica de colagem NSM usando FRP's pode melhorar o desempenho a flexão de vigas de concreto armado. O arranjo de reforço NSM-FRP reduz efetivamente a deflexão, a abertura e espaçamento das fissuras, levando ao aumento da capacidade de carga e rigidez das vigas (Barris *et al.*, 2023). Verificou-se que o uso de tiras de CFRP aplicadas com NSM em diferentes configurações aumenta o momento resistente e a capacidade de flexão das vigas, com aumentos na ordem de 10% a 52%, conforme observado por Al-zu'bi *et al.* (2022).

Para o ACI 440.2R (2017), o emprego de FRP's também apresenta vantagens no aspecto ambiental. Embora exista impactos ambientais relacionados à extração da matéria prima, oriunda de combustíveis fósseis ou minerais, e devido a altas energia incorporadas à produção (na ordem de 20 a 200 mJ/kg), o peso total produzido e utilizado é muito inferior ao aço estrutural. Na distribuição e transporte, o menor peso dos FRP's leva a menos impactos

ambientais pois requer equipamentos menores. Na instalação e no uso, os FRP's têm uma maior durabilidade e exigem menos manutenção do que os materiais convencionais.

De maneira geral, pode-se resumir as vantagens desse sistema na alta resistência mecânica, aumento da rigidez nos elementos, baixo peso específico, grande durabilidade e não causa praticamente nenhum impacto estético ou funcional no elemento. Como desvantagem tem-se o custo ainda elevado desses materiais compósitos, necessidade de mão de obra qualificada, ser preciso dispor proteção contra vandalismos e o modo de ruptura frágil, que não gera grandes avisos antes da falha.

## 2.2 PESQUISAS SOBRE REFORÇO À FLEXÃO COM FRP'S

O texto a seguir apresenta uma breve descrição de alguns trabalhos importantes, a respeito do comportamento de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibras de carbono (CFRP) e vidro (GFRP). O texto foi desenvolvido através de uma revisão de literatura nos bancos de dados Google Scholar, SciELO (*Scientific Electronic Library Online*), Scopus e *Web of Science* e discute os avanços no uso de técnicas de reforço NSM e EBR, destacando os resultados de pesquisas experimentais.

Abdallah *et al.* (2021) observa que embora os CFRP's tenham sido utilizados pela primeira vez há mais de 50 anos como materiais de reforço estrutural, poucos estudos experimentais foram realizados com elementos hiperestáticos, como as vigas contínuas. Por outro lado, já foram feitas extensas pesquisas sobre reforço em vigas simplesmente apoiadas, pilares e suas regiões de ligação. Para o caso de vigas isostáticas, existem relatos de ganhos de resistência que chegam a mais de 90% com a técnica de colagem EBR e até mais de 130% quando empregada a técnica NSM.

Shawki Ali *et al.* (2023), estudaram numericamente a resposta à flexão de vigas de concreto reforçadas com diferentes tipos de FRP e descobriram que o CFRP superou significativamente o aço e outros tipos de FRP em baixas taxas de reforço. Abduljabbar e AbdulSahib (2023) analisaram o desempenho à flexão para reforços híbridos em vigas de concreto, usando FRP e barras de aço e concluíram que a combinação melhorou o desempenho e a ductilidade das vigas.

Baena *et al.* (2023) investigaram o desempenho à flexão e a previsão de descolamento de extremidades de vigas de concreto armado reforçadas com CFRP utilizando a técnica NSM

sob diferentes temperaturas de serviço. Os resultados mostraram que as vigas testadas a até 60°C, próximas à temperatura de transição vítrea do adesivo epóxi, mantiveram suas capacidades de carga, falhando por ruptura do CFRP. No entanto, vigas testadas a 70°C e 85°C apresentaram reduções na capacidade de carga e mudança no modo de falha para descolamento de extremidades e esmagamento do concreto, indicando que altas temperaturas afetam significativamente o desempenho do reforço.

Araújo (2002) investigou o comportamento de vigas de concreto armado reforçadas à flexão e ao cisalhamento com tecido de fibra de carbono colado com resina epóxi. Os resultados demonstraram aumentos significativos na resistência e rigidez das vigas. A viga reforçada à flexão teve um incremento de carga de 40%, enquanto a reforçada ao cisalhamento aumentou 30%. A viga reforçada em ambas as modalidades mostrou um aumento de 45% na carga de ruptura. Esses resultados validaram métodos de cálculo baseados na teoria de flexão simples e no modelo de treliça.

Barros e Dias (2007) compararam as técnicas de reforço NSM e EBR em vigas de concreto armado quanto à resistência à flexão e ao cisalhamento utilizando CFRP. Os resultados mostraram que a técnica NSM proporcionou maior eficácia no aumento da capacidade de carga e na deformação das vigas até a falha, superando os sistemas EBR. O aumento médio na capacidade de carga das vigas reforçadas por NSM foi de 83%, comparado a 54% para EBR. Os modos de falha das vigas reforçadas com NSM foram mais dúcteis, destacando a eficácia dessa técnica para o reforço estrutural.

Codina *et al.* (2023) avaliaram as prescrições do *Bulletin fib* 90 para previsão da falha prematura causada por fissuras intermediárias em elementos de concreto FRP. As vigas, com diferentes resistências do concreto e taxas de armadura interna, apresentaram falhas por descolamento após o escoamento do aço, indicando que maior resistência do concreto e maior taxa de armadura aumentam a capacidade de flexão. A análise comparativa de uma base de dados de 65 vigas reforçadas com CFRP demonstrou que os modelos preditivos apresentaram boas correlações com os resultados experimentais, com uma relação média entre carga experimental e teórica variando de 0,96 a 1,10.

Dias e Juvandes (2002) estudaram vigas de concreto armado reforçadas com sistemas compósitos de CFRP unidirecionais, comparando os formatos de manta flexível curada "*in situ*" e laminado pré-fabricado. Os resultados mostraram que a capacidade de carga aumentou em média 57%, com as vigas reforçadas com manta apresentando desempenho superior. A

eficiência dos mecanismos exteriores de fixação foi evidenciada, especialmente na viga reforçada com manta que alcançou a ruptura do CFRP. Os modos de falha variaram entre destacamento do CFRP e ruptura do compósito, destacando a importância do método de fixação.

Dal Pont (2023) investigou a resistência à flexão de vigas de concreto armado reforçadas pelo método NSM com CFRP e barras de aço. Os resultados experimentais indicaram que ambos os tipos de reforço proporcionaram aumentos semelhantes na capacidade resistente. As vigas reforçadas com barras de aço apresentaram comportamento mais rígido, com maiores cargas de escoamento comparadas às vigas reforçadas com CFRP. Além disso, o aumento da taxa de reforço resultou em maior capacidade resistente e rigidez. As formulações teóricas do ACI 440.2R (2017) e do *Bulletin fib* 90 (2019) mostraram-se satisfatórias na previsão dos modos de ruptura e cargas últimas das vigas.

Em Oliveira Junior (2005), as vigas reforçadas com manta de CFRP coladas externamente (EBR) demonstraram um incremento significativo na capacidade resistente, apresentando ganho de até 24,5% em relação à viga de referência. O autor comparou a aplicação de barras de aço e CFRP (NSM) e notou descolamentos prematuros por problemas na aderência. Também obteve boa previsão com os modelos teóricos avaliados pelo ACI.

No estudo conduzido por Lima (2004), oito vigas de concreto armado foram reforçadas utilizando barras e laminados de CFRP e GFRP pela técnica NSM, testando diferentes taxas de armadura. As vigas reforçadas com mantas de CFRP-EBR apresentaram incremento na capacidade de carga de até 53,8%. O autor observou também que, em vigas com maior taxa de armadura existente, ocorreu um menor acréscimo de resistência, concluindo que, quanto maior essa taxa, menor será a eficiência do reforço. Conclui que a técnica NSM é eficiente, a qual permite mobilizar boa parte da resistência última do FRP, conferindo aumento de rigidez no elemento.

Santos (2019) conduziu uma análise experimental de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono após terem sido submetidas a carregamento prévio até a ruína. As vigas reforçadas com uma camada de CFRP-EBR resistiram a uma carga média 49,70% superior à carga analítica calculada para a viga de referência sem reforço. Vigas reforçadas com duas camadas de CRFC suportaram cargas 56,7% superiores. A análise demonstrou que a técnica de reforço aplicada é eficaz na recuperação da capacidade estrutural de vigas danificadas, atingindo resultados satisfatórios em termos de incremento de carga.

Vieira (2014) avaliou o comportamento de vigas de concreto armado reforçadas à flexão com CFRP, evidenciando um aumento significativo na capacidade resistente e rigidez das vigas reforçadas. Os incrementos na capacidade resistente variaram entre 9,11% e 126,18%, dependendo do grupo e da quantidade de camadas de fibra aplicadas. O estudo concluiu que o reforço com CFRP-EBR é particularmente eficaz em vigas com menores taxas de armadura, apesar da ocorrência de ruína prematura por descolamento em alguns casos.

Wierzbicki (2021) conduziu uma análise experimental de vigas de concreto reforçadas com a técnica NSM utilizando fibras de carbono. Foram testadas vinte e uma amostras, com dimensões reais e em escala reduzida, comparando a técnica NSM com a EBR e vigas sem reforço. As vigas reforçadas com NSM mostraram um incremento de 46% na capacidade de carga para amostras em escala reduzida e 36% para amostras em escala real. Além disso, a técnica NSM apresentou melhor desempenho em termos de rigidez e resistência ao fogo, evidenciando sua eficácia e viabilidade.

Castro (2005) ensaiou 19 vigas "T" de concreto armado, utilizando CFRP e GRP em entalhes no cobrimento de concreto (NSM) e reforço colado na superfície do concreto (EBR). A técnica NSM proporcionou um aumento de carga última entre 22,6% e 37% para vigas com taxa de armadura de 0,63% e entre 20% e 22% para vigas com taxa de 1,57%. A técnica EBR apresentou aumentos de até 16% e 20%, respectivamente. As vigas reforçadas com barras de aço tiveram acréscimo médio de 6,4% e 4,5%. A técnica NSM mostrou-se mais eficiente em evitar destacamentos, destacando vantagem em relação a técnica EBR.

Kang *et al.* (2005) realizaram ensaios de flexão em quatro pontos em vigas de concreto armado reforçadas com laminados de CFRP montados próximos à superfície (NSM). Os resultados experimentais mostraram um aumento na carga última das vigas reforçadas entre 40% e 95% em comparação com as não reforçadas. A eficiência do reforço variou conforme a disposição dos laminados de CFRP, não sendo diretamente proporcional à área de reforço aplicada.

Manzano (2012) investigou o reforço híbrido de vigas "T" de concreto armado utilizando compósitos de fibras de carbono (CFRP) e vidro (GFRP). Os resultados mostraram que as vigas reforçadas apresentaram um aumento na carga última entre 15,3% e 20,3% em comparação com a viga de referência. A viga com uma camada de GFRP seguida de uma camada de CFRP obteve o melhor desempenho. Os modos de ruptura identificados incluíram o descolamento do PRF e a delaminação do cobrimento.

Beber (2003) investigou o comportamento de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono. Os resultados experimentais indicaram um aumento significativo na capacidade de carga das vigas reforçadas, com incrementos variando entre 30% e 50% em comparação com as vigas não reforçadas. A utilização de mantas flexíveis e laminados pré-fabricados de CFRP mostrou-se eficaz tanto para o reforço à flexão quanto ao cisalhamento. As vigas reforçadas apresentaram modos de ruptura por descolamento da interface adesivo/compósito, destacando a importância do preparo adequado da superfície e da técnica de aplicação do reforço.

## 2.3 NOÇÕES SOBRE REFORÇO ESTRUTURAL EM ELEMENTOS FLETIDOS

### 2.3.1 Mecanismos de ruptura em reforços com FRP'S

Após o reforço de um elemento estrutural à flexão, podem ocorrer mudanças significativas na sua forma de ruptura (falha estrutural). Independente da técnica empregada, é importante garantir certo nível de ductilidade antes da falha, a fim de garantir o mínimo de segurança aos usuários. Uma das principais desvantagens do reforço com FRP está no modo de falha, que pode ocorrer de forma prematura (RP) sem nenhum aviso. Essas rupturas bruscas são causadas por mecanismos de descolamento do reforço por falha originada em algumas das camadas envolvidas concreto-adesivo-FRP. Diversos autores já identificaram modos de rupturas prematuras, com definições e conceitos um pouco distintos. A seguir são apresentadas algumas definições encontradas na literatura técnica.

Triantafillou (1998) observou que podem ser identificados alguns modos de falha em elementos reforçados à flexão com FRP. Se tratando de um dos aspectos centrais para análise e dimensionamento dessa técnica de reforço. As falhas são ilustradas na Figura 2.9 e descritas a seguir.

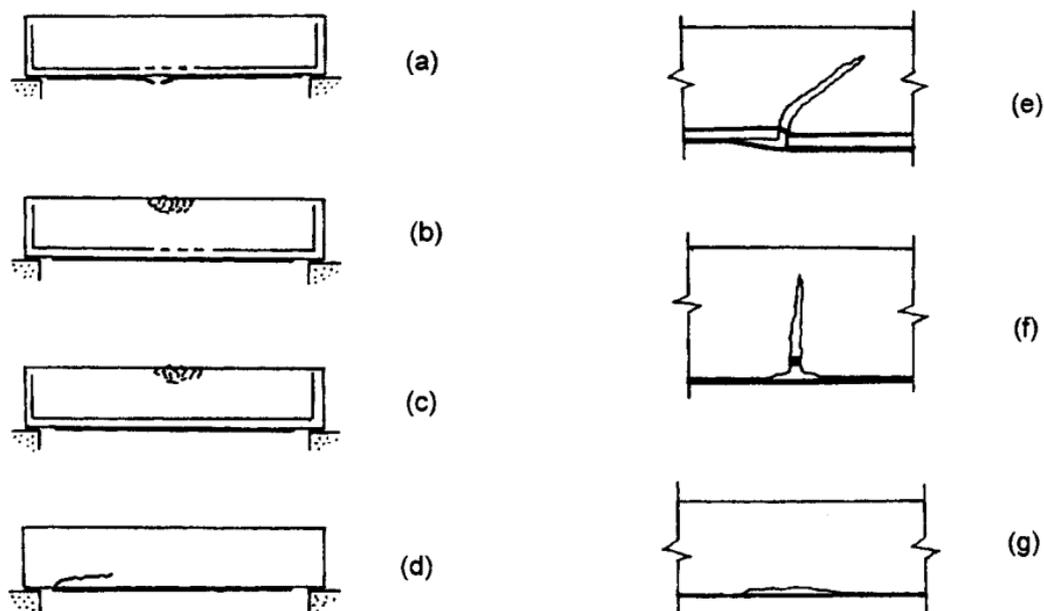


Figura 2.9: Tipos de ruptura em elementos reforçados com FRP, TRIANTAFILLOU (1998).

Além das rupturas clássicas, causadas por esgotamento da capacidade resistente dos materiais concreto, aço ou fibra, também cita formas de ruptura prematura.

- Escoamento do aço seguido da ruptura do FRP (Figura 2.9-a);
- Escoamento do aço seguido pelo esmagamento do concreto (Figura 2.9-b);
- Esmagamento do concreto (Figura 2.9-c);
- Destacamento na zona de ancoragem do FRP causada por cisalhamento na interface concreto-adesivo (Figura 2.9-d);
- Destacamento do FRP causado por fissuras inclinadas de cisalhamento (Figura 2.9-e);
- Descolamento entre a interface do FRP e concreto causado por fissuras de flexão (Figura 2.9-f);
- Descolamento entre a interface do FRP e concreto devido a irregularidades na superfície ou falhas na colagem (Figura 2.9-g).

Para o ACI 440.2R (2017), a resistência a flexão de elementos reforçados com FRP's depende de como será o controle do modo de falha. Descreve os seguintes modos para sistemas colados na superfície de concreto (EBR), que são ilustrados na Figura 2.10.

- I. Esmagamento do concreto comprimido, antes de ocorrer escoamento da armadura;

- II. Escoamento da armadura seguido da ruptura do FRP;
- III. Escoamento da armadura seguido pelo esmagamento do concreto;
- IV. Delaminação na região de concreto de recobrimento devido tensões cisalhantes na região de ancoragem (Figura 2.10-a e c);
- V. Descolamento do FRP do substrato de concreto iniciado por fissuras de flexão ou cisalhamento (Figura 2.10-a e b).

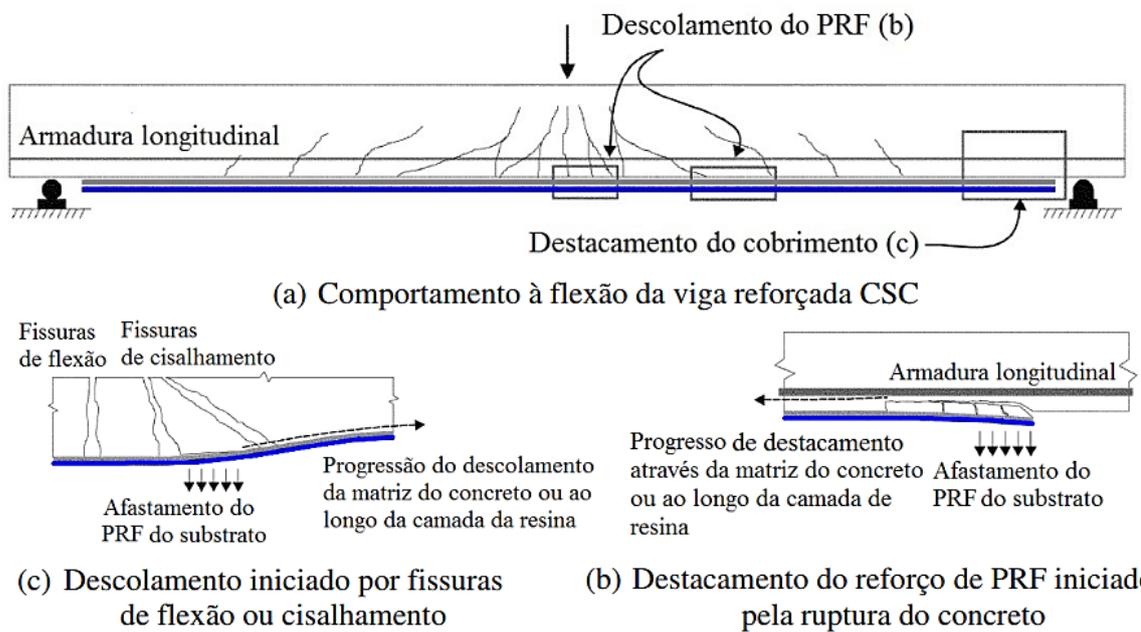


Figura 2.10: Tipos de ruptura em elementos reforçados com FRP-EBR, Adaptado do ACI 440 (2017).

O *Bulletin fib* 90 (2019), de maneira geral, descreve as regiões ou interfaces onde os mecanismos de ruptura por descolamento (*debonding*) podem ocorrer nos elementos reforçados com FRP ao utilizar a técnica de colagem EBR. Os mecanismos são ilustrados na Figura 2.11 e descritos abaixo.

- a) Desprendimento na camada de concreto devido a falha de coesão no concreto;
- b) Desprendimento no adesivo devido a falha de adesão;
- c) Desprendimento na interface entre concreto e adesivo ou adesivo e o reforço (falha de adesão entre os materiais);
- d) Falha devido ao cisalhamento interlaminar no FRP (falha interna do FRP).

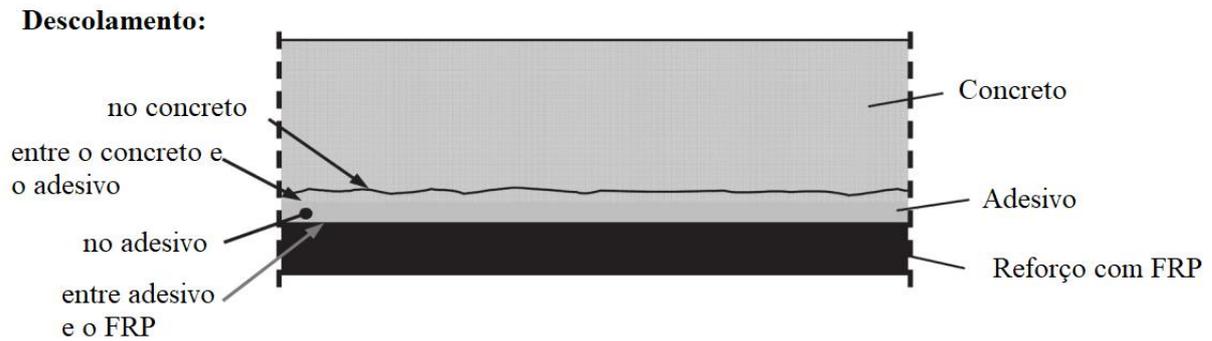


Figura 2.11: Interfaces possíveis de sofrer descolamento, adaptado do Bulletin *fib* 90 (2019).

Quando se trata de elementos estruturais reforçados a flexão, como é o caso de vigas e lajes, os mecanismos que causam o descolamento do FRP podem ser classificados de acordo com o local que ocorre o desprendimento. Dois tipos de falhas podem ser observados, uma está relacionada a tensões de adesão ao longo da interface FRP-concreto, sendo denominada de descolamento interfacial. A outra está relacionada com a deficiência na resistência ao cisalhamento do elemento reforçado, causando a separação (descolamento) do concreto de recobrimento. A ruptura se inicia na região final (de ancoragem) e se propaga para a região central do vão, conforme ilustrado nas Figura 2.12.

Descolamento na região intermediária, longe da região de ancoragem do FRP, causado por fissuras de flexão e cisalhamento ou ambos. A ruptura se inicia na região central e se propaga em direção à região final de ancoragem. A fissura crítica, que causará o descolamento do reforço, geralmente é inclinada em função da combinação de momentos fletores e força cortante, sendo influenciada pelo modo ao qual o elemento é carregamento, que poderá resultar em aberturas de fissuras.

Esse modo de falha usualmente recebe o nome de "*intermediate crack debonding*" caso ocorra em função de fissuras intermediárias de flexão (fissuras verticais), conforme visto na Figura 2.13-a. Ou "*critical shear crack debonding*" caso ocorra em função de fissuras intermediárias de cisalhamento (fissuras inclinadas), conforme ilustrado na Figura 2.13-b.

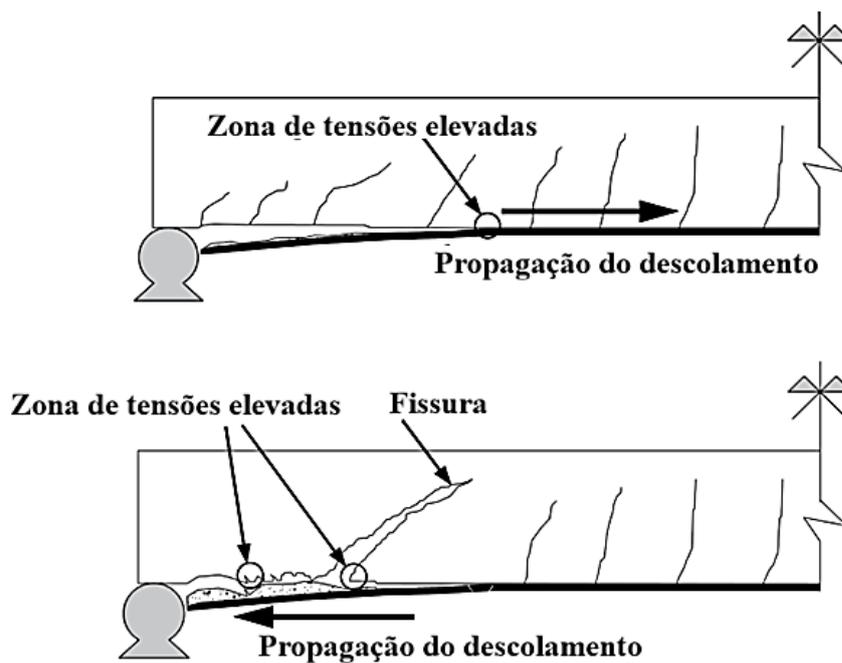


Figura 2.12: Desprendimento na região final do reforço em FRP devido a efeitos combinados de cisalhamento e tensões normais, adaptado do *Bulletin fib 90* (2019).

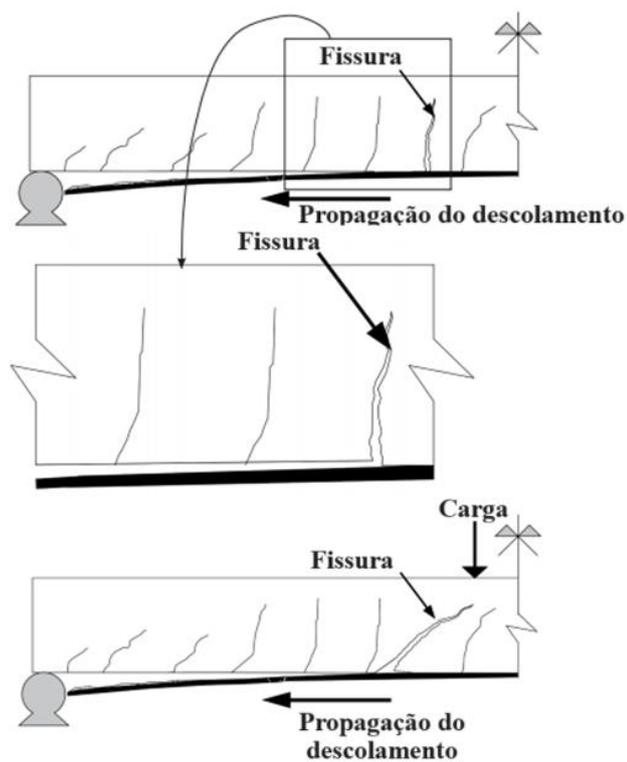


Figura 2.13: Desprendimento no concreto de cobrimento das armaduras. Induzido pela fissura crítica na diagonal, próxima ao apoio, adaptado do *Bulletin fib 90* (2019).

Para o sistema FRP-NSM, o *fib 90* descreve que podem ocorrer basicamente os mesmos modos de ruptura que ocorrem nos sistemas FRP-EBR, porém o descolamento devido fissuras intermediárias de flexão é menos frequente nesse método. Porém, acrescenta alguns modos característicos desse sistema de colagem, conforme mostra a Figura 2.14.

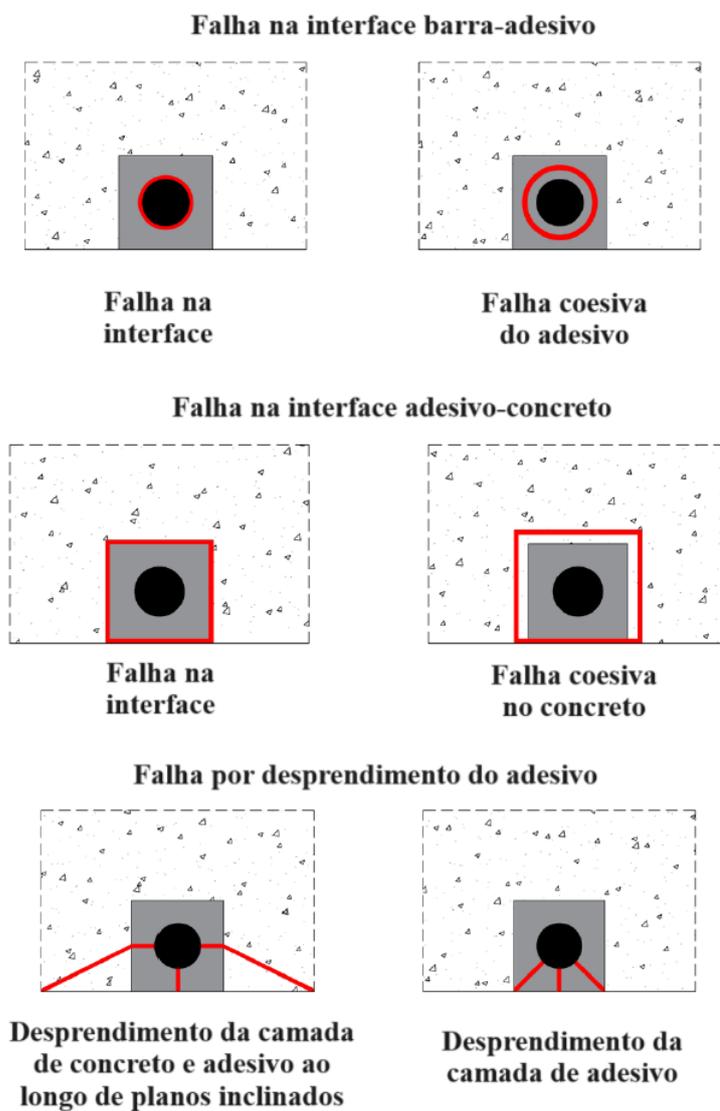
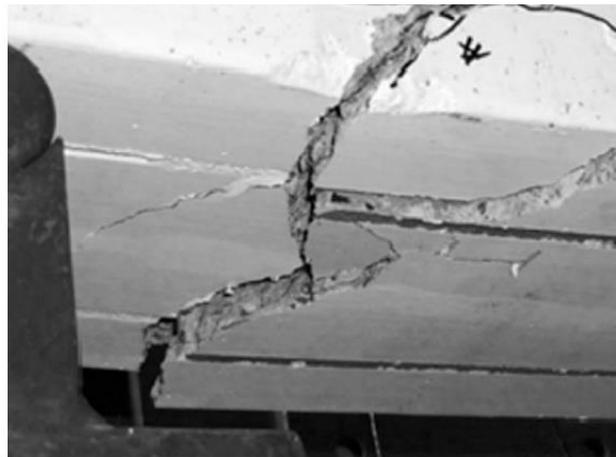


Figura 2.14: Falhas de interface FRP-NSM, adaptado do *Bulletin fib 90* (2019).

Os mecanismos de falha prematura por desprendimento da camada de concreto de cobertura (CCS) para FRP-NSM também podem ocorrer, com algumas pequenas variações, conforme mostrado na Figura 2.15.



**Ruptura por CCS na região de  
extremidade do FRP**



**Ruptura por CCS induzida por fissura de  
flexão-cisalhamento**



**Ruptura por CCS ao longo do reforço induzida  
por fissura de flexão-cisalhamento**

Figura 2.15: Mecanismos de desprendimento por CCS em FRP-NSM, adaptado do *Bulletin fib* 90 (2019).

### 2.3.2 Técnica de colagem EBR

Arquez (2010) descreve que a técnica de reforço mais conhecida utilizando FRP é a que utiliza aderência externa (Figura 2.16) de mantas, tecidos e laminados. No entanto, existe o problema de que o concreto possui baixa resistência a tração e ao cisalhamento, ao qual pode provocar o desprendimento do reforço antes de atingir o aproveitamento máximo do material.

Essa ruptura pode se dar entre o material de reforço e a resina, entre a resina e o concreto ou ainda com o destacamento do concreto de cobrimento. Além disso, nesse tipo de sistema existe a necessidade de proteção do compósito para prevenir contra a ação do fogo, raios ultravioleta e vandalismo.



Figura 2.16: Reforço de estruturas com a técnica de colagem FRP-EBR, adaptado do *Bulletin fib 14* (2011).

A técnica EBR representa um método para o reforço estrutural de elementos construtivos utilizando materiais compósitos aplicados externamente. Esses materiais, geralmente compostos por fibras de alto desempenho incorporadas em matrizes poliméricas como resinas epóxi, são aplicados nas superfícies dos elementos estruturais com o objetivo de melhorar suas propriedades mecânicas e prolongar sua vida útil (Cruz *et al.*, 2010; Pinto, 2018).

O processo envolve a preparação da superfície do substrato, que deve ser adequadamente rugosa para promover uma aderência eficaz entre o reforço e o elemento estrutural. Técnicas como lixamento e texturização são empregadas para alcançar a rugosidade desejada, sendo este um passo importante para o sucesso da aplicação da técnica EBR. A colocação do material compósito, tipicamente em forma de mantas ou tecidos, é realizada sobre a área desejada do substrato, fixando-o com uma camada de resina epóxi, que atua como agente de ligação (Pinto, 2018).

A aplicabilidade do EBR é versátil, permitindo o reforço de elementos sob diferentes condições de carregamento. Por exemplo, na mitigação de falhas por flexão, os materiais são aplicados na face tracionada do elemento (Maazoun *et al.*, 2023).

Entretanto, a técnica EBR não está isenta de desvantagens. A principal preocupação reside na vulnerabilidade do reforço às condições ambientais externas, que podem acelerar processos de degradação. Fatores como a exposição prolongada a incêndios, temperaturas

extremas, radiação ultravioleta e umidade, além de potenciais danos por vandalismo, representam riscos significativos para a durabilidade do reforço aplicado externamente (Pinto, 2018; Azevedo *et al.*, 2022).

Estudos de caso, como o apresentado por Beber (2003), ilustram a aplicação prática da técnica EBR em elementos de concreto armado, demonstrando sua eficácia e os cuidados necessários para garantir a performance esperada. A contínua evolução das pesquisas sobre o uso da técnica EBR busca superar os desafios associados à durabilidade e à aderência do sistema de reforço, visando expandir sua aplicabilidade e eficiência em projetos de reabilitação e reforço estrutural.

Dalfré *et al.* (2021), conduziram uma análise experimental de vigas de concreto armado reforçadas com CFRP usando a técnica EBR, mostrando um aumento de 50% na capacidade de carga e um aumento de 28% na rigidez. Hosen *et al.* (2019) investigaram a viabilidade do reforço à flexão usando a técnica de EBR lateral com tecido CFRP, aumentando significativamente a capacidade de flexão de vigas leves de concreto armado.

### 2.3.3 Técnica de colagem NSM

Em seu trabalho Arquez (2010), estuda a técnica de aplicação de reforço em entalhes realizados no concreto de cobertura (NSM), e comenta que devido à dupla área de contato, o laminado possui maior zona de aderência e, com isso, diminui tensões de tração e cisalhamento no concreto situação na região de ancoragem. Além disso, pelo fato de o laminado possuir orientação unidirecional das fibras, a resistência e rigidez na direção longitudinal da peça são potencializadas.

Após realizar o acabamento, o reforço fica quase imperceptível, sendo indicados para recuperação de patrimônios históricos, conforme pode ser observado na Figura 2.17.

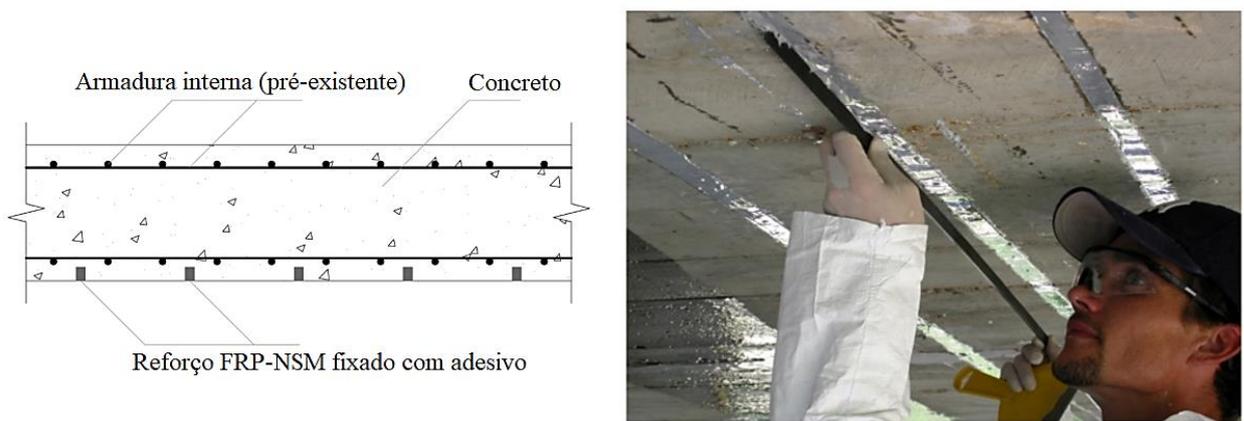


Figura 2.17: Reforço de estruturas com a técnica de colagem FRP-NSM, Adaptado do *Bulletin fib 90* (2019).

Estudos recentes têm apontado a superioridade da técnica NSM, empregando lâminas ou barras de CFRP, sobre a técnica de EBR para o reforço de estruturas de concreto. A vantagem da técnica NSM é atribuída, em grande parte, à maior área de aderência proporcionada pela inserção de lâminas no cobrimento do concreto, entre outros fatores (Wierzbicki, 2021).

A metodologia NSM compartilha etapas iniciais com a EBR, envolvendo a recuperação do substrato de concreto seguida pela realização de entalhes utilizando um disco de corte diamantado. As especificações destes entalhes, como profundidade e espessura, são determinadas com base nas dimensões do material de reforço a ser inserido (Wierzbicki, 2021). É recomendável a limpeza dos entalhes com ar comprimido e a descontaminação do material de reforço com acetona para garantir uma adesão eficaz (Coelho *et al.*, 2011).

Posteriormente, os entalhes são completamente preenchidos com adesivo epóxi, visando unir o CFRP ao substrato de concreto e facilitar a transferência de carga entre os dois. Sugere-se a aplicação de uma fina camada de epóxi também nas superfícies laterais do material de reforço, seguida pela inserção deste no entalhe. Pressiona-se levemente o material para promover a penetração do adesivo epóxi, assegurando o contato entre o CFRP e as paredes do entalhe. Por fim, é crucial remover o excesso de epóxi e nivelar a superfície tratada. (ACI 440.2R, 2017).

Como representado esquematicamente na Figura 2.18, o compósito de fibra de carbono é completamente envolvido pelo adesivo epóxi dentro dos entalhes realizados no substrato de concreto. Em determinadas abordagens, todas as faces do material de reforço são envolvidas

pelo epóxi, enquanto em outras, somente três faces são cobertas pelo adesivo. Ambas as técnicas resultam na inserção do CFRP na borda de cobrimento do concreto (Caires, 2022).

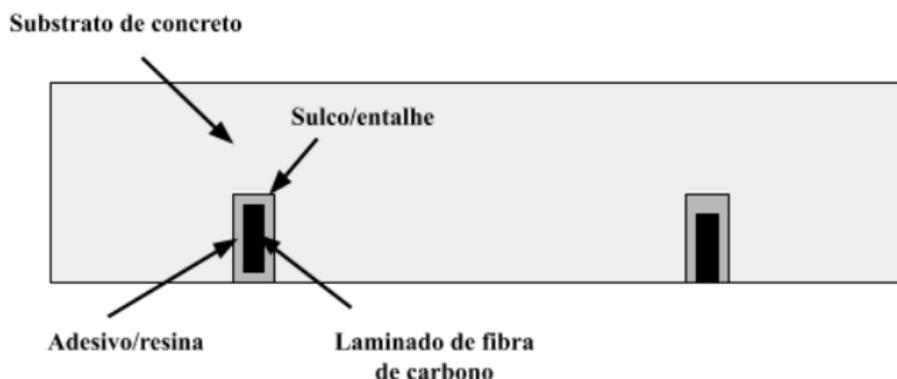


Figura 2.18: Corte esquemático do sistema NSM, Caires (2022).

A figura subsequente (Figura 2.19) demonstra o antes e depois de entalhes no cobrimento de uma viga, bem como a viga com o material de reforço já inserido e a vedação completada. Desta observação visual, pode-se perceber a relativa pequenez das dimensões dos entalhes e das lâminas de CFRP quando comparadas às dimensões globais do elemento estrutural.



Figura 2.19: Entalhes no cobrimento de viga e laminados de CFRP inseridos, Araújo (2017).

O *Bulletin fib* 90 (2019) descreve a técnica de reforço NSM como um método especial para complementar o reforço em estruturas de concreto. O FRP é inserido em fendas ou sulcos que são cortados no elemento com uma profundidade menor do que a altura da camada de

concreto que serve de recobrimento das armaduras. Apresenta as seguintes vantagens em relação ao sistema de colagem convencional (EBR):

- Melhor características de adesão;
- Ativa mecanismos de falha mais controlados, uma vez que aumenta a ductilidade dos elementos reforçados;
- Apresenta comportamento mecânico com maior rigidez para cargas de serviço;
- Ruptura por descolamento devido a fissuras de flexão ou cisalhamento é menos crítico;
- Redução de trabalho no local, pois a preparação da superfície além da ranhura não é necessária;
- Ancoragem mais fácil em membros adjacentes;
- Desigualdades na superfície podem ser compensadas com a profundidade da ranhura;
- Proteção contra danos mecânicos, impactos acidentais e vandalismo;
- O aspecto estético do elemento estrutural não é alterado;

Uma das desvantagens dessa técnica é a necessidade de uma etapa adicional para preparar o recorte das ranhuras, o que pode ser considerado um trabalho complicado. Esse processo frequentemente é realizado em condições de difícil acesso, o que pode aumentar significativamente a dificuldade e o tempo de execução do serviço.

#### 2.4. NORMAS E RECOMENDAÇÕES TÉCNICAS SOBRE O TEMA

No contexto do reforço de estruturas de concreto, a utilização de sistemas com polímeros reforçados com fibras (FRP) tem sido objeto de estudos por diversos pesquisadores. Para orientar a aplicação prática desses sistemas e assegurar sua eficácia, durabilidade e segurança, comitês técnicos em todo o mundo têm estabelecido recomendações normativas detalhadas. A publicação de normas e práticas recomendadas é fundamental para garantir a confiabilidade e a padronização dos reforços estruturais.

A seguir, destacam-se os documentos técnicos mais relevantes nesse campo, que servem como guia regulamentador para a aplicação de sistemas empregando FRP em estruturas de concreto.

- **ACI 440.2R (2017)** - *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*;
- **fib Bulletin 14 (2001)** - *Externally bonded FRP reinforcement of R.C. structures*.
- **fib Bulletin 90 (2019)** - *Externally applied FRP reinforcement for concrete structures*.
- **Comitê Técnico CT 303 - Prática Recomendada IBRACON / ABECE (2023)** – Reforço de elementos estruturais de concreto com sistema de Polímeros Reforçados com Fibras (FRP) aplicado externamente.
- **ISIS Canada Manual N° 4 (2001)** - *Reinforcing Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers*.
- **Japan Society of Civil Engineers - JSCE (1997)** - *Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fiber reinforcing materials*.
- **CNR-DT 200 Rome (2004)** - *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures*.

Esses documentos desempenham um papel fundamental ao estabelecer as práticas e parâmetros de projeto para aplicação de sistemas de reforço em FRP. Nesse trabalho serão avaliadas as recomendações descritas no guia americano ACI 440.2R (2017) e as recomendações da federação europeia presentes no *Bulletin fib 90* (2019).

## 2.5 DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO EM ELEMENTOS REFORÇADOS COM FRP'S

O dimensionamento à flexão de elementos estruturais reforçados com FRP é um processo que envolve a compreensão das propriedades mecânicas tanto do material existente (concreto e aço) quanto do FRP. O objetivo do reforço é aumentar a capacidade de carga de um elemento estrutural, melhorar sua ductilidade e sua capacidade de deformação antes da falha. Para o dimensionamento à flexão, são consideradas o guia ACI 440.2R e *Bulletin fib 90*.

Na avaliação dos requisitos básicos para dimensionamento de elementos reforçados com FRP, vários aspectos devem ser atendidos para garantir a segurança estrutural, compatibilidade de deformação e durabilidade do sistema de reforço. Esses requisitos incluem considerar o efeito da armadura pré-existente e camada de reforço em FRP, com a consideração dos mecanismos de ruptura prematuros.

O projeto de estruturas de concreto armado com FRP geralmente é regido por requisitos de manutenção, como controle de abertura de fissuras e limitação de deflexões. Vários princípios e procedimentos de projeto foram desenvolvidos para abordar esses estados limite de manutenção para estruturas de concreto reforçado com FRP, incluindo recomendações dos guias ACI 440.2R (2017) e do *fib* Bulletin 90 (2019).

Os coeficientes de segurança são usados para garantir que as incertezas nos materiais sejam consideradas no projeto de elementos estruturais reforçados com FRP. O uso de compósitos de FRP para reforço estrutural envolve incertezas inerentes à estrutura existente, bem como incertezas decorrentes da falta de conhecimento e experiência no uso de compósitos de FRP. Essas incertezas podem incluir a heterogeneidade do material e a falta de certeza sobre as propriedades dos materiais empregados (Brehm; Hertle, 2021).

O ACI 440 especifica coeficientes de segurança para o projeto de elementos reforçados com FRP, levando em conta a resistência dos materiais de FRP e as incertezas associadas à sua aplicação e ao comportamento a longo prazo. Os fatores de redução de resistência ( $\phi$ ) são aplicados à capacidade de resistência calculada dos elementos reforçados para determinar a resistência de projeto. O *fib* Bulletin 90 (2019) introduz conceitos de coeficientes de segurança baseados na teoria da confiabilidade, sugerindo fatores de segurança que variam de acordo com o nível de risco aceitável, a importância da estrutura, e a confiabilidade dos dados de material e carga.

O elemento estrutural usualmente é projetado em função das seções de maior solicitação à flexão, que costuma ocorrer sobre a região dos apoios em casos de momentos negativos, e no meio do vão para momentos positivos. Após a escolha da seção a ser analisada, deve-se tomar como base a seção transversal mostrada na Figura 2.20 para a determinação do momento resistente na seção ( $M_r$ ) ou da quantidade de reforço necessária ( $A_f$ ).

Pode-se levar em conta todas as camadas de armaduras existentes na seção transversal, no entanto, em casos gerais é comum considerar somente a presença da armadura principal. Percebe-se que camadas próximas a linha neutra não resultam em uma contribuição significativa no momento resistente, por outro lado, as armaduras mais distantes da LN possuem maior braço de alavanca e por isso, uma maior contribuição no momento resistente.

Para momentos positivos, conforme mostrado, a região superior estará comprimida e a região inferior estará tracionada. Nessa situação (momento positivo) o elemento de reforço em FRP deverá ter sua área ( $A_f$ ) disposta na face inferior, contribuindo com sua resistência à tração.

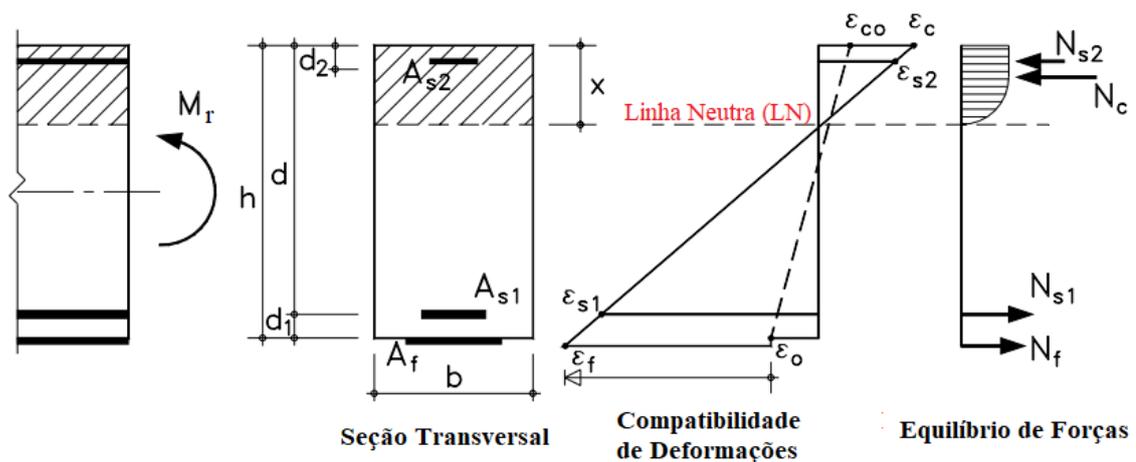


Figura 2.20: Seção transversal de elemento em concreto reforçado à flexão com FRP, Adaptado de MATTHYS (2000).

As condições de equilíbrio da seção transversal são obtidas por meio do momento resultante calculado em torno do ponto de aplicação da força de compressão no concreto, resultando no momento resistente ( $M_r$ ) e pelo somatório de forças horizontais que deve ser nulo para satisfazer o equilíbrio.

A compatibilidade de deformações é levada em conta pela consideração clássica da resistência dos materiais que as seções transversais permanecem planas após a deformação, tomando os limites permitidos para cada material é obtido o diagrama de deformações mostrado na Figura 2.20. As normas e recomendações técnicas em geral descrevem limites distintos para consideração das deformações limites do FRP e do concreto.

Nos tópicos seguintes, serão apresentados como os códigos normativos consideram a seção transversal em concreto armado, frente à situação de reforço com elementos em FRP. Serão preservadas as nomenclaturas e as simbologias utilizadas pelos respectivos textos.

### 2.5.1 ACI 440.2R – 2017

O guia ACI 440.2R (2017) trata sobre reforço de elementos estruturais utilizando FRP e faz a distinção entre as técnicas NSM e EBR. O método proposto pelo guia utiliza dois fatores de redução no processo de dimensionamento. Limita a ductilidade do elemento por meio da imposição de valores mínimos para deformação na camada de armadura existente.

No que se refere às tensões e deformações últimas, o ACI 440.2R (2017) recomenda que deve ser aplicado um fator de redução ( $C_E$ ). Assim, as tensões ( $f_{fu}$ ) e deformações ( $\varepsilon_{fu}$ ) últimas a serem usadas no reforço são determinadas conforme apresentado nas Equação 2-1 e Equação 2-2.

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* \quad \text{Equação 2-1}$$

$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^* \quad \text{Equação 2-2}$$

Na qual:

$f_{fu}^*$  – Tensão máxima no FRP informada pelo fabricante ou obtida experimentalmente;

$\varepsilon_{fu}^*$  – Deformação máxima no FRP informada pelo fabricante ou obtida experimentalmente.

O fator de redução ambiental, tem como objetivo ajustar os parâmetros de resistência de acordo com as condições de exposição às quais o reforço será instalado. Os materiais que constituem o reforço (fibras e resinas) podem ter sua resistência e durabilidade significativamente reduzidas devido ao meio em que estarão expostos. Esse fator é determinado conforme apresentado na Tabela 2.1, e deve ser considerado em situações de projeto. No entanto, para os propósitos desta pesquisa, em análises subsequentes, será considerado com valor unitário ( $C_E=1$ ).

Tabela 2.1: Fator de Redução ( $C_E$ ), de acordo com o ACI 440 (2017).

<b>Condições de exposição</b>	<b>Tipo de Fibra</b>	<b>Fator de redução ambiental (<math>C_E</math>)</b>
Ambiente interno de baixa agressividade	Carbono (CFRP)	0,95
	Vidro (GFRP)	0,75
	Aramida (AFRP)	0,85
Ambiente externo (pontes, cais e estacionamentos abertos)	Carbono (CFRP)	0,85
	Vidro (GFRP)	0,65
	Aramida (AFRP)	0,75
Ambiente de alta agressividade (fabricas de produtos químicos e estações de tratamento de água)	Carbono (CFRP)	0,85
	Vidro (GFRP)	0,50
	Aramida (AFRP)	0,70

Como pode ser visto, se o reforço for executado em locais protegidos das intempéries, como ambientes internos de residências e salas comerciais, o fator de redução é próximo de um. No entanto, se o ambiente for agressivo, com exposição prolongada a alta umidade, agentes químicos agressivos, ciclos de congelamento e descongelamento, água salgada ou alcalinidade, um fator de redução mais baixo deve ser utilizado.

A ruptura do concreto por esmagamento ocorrerá, segundo a norma, quando for atingido a deformação última de compressão ( $\varepsilon_{cu}$ ) de 0,003 (3,0‰). A ruptura do reforço com FRP ocorre quando este atinge sua deformação última ( $\varepsilon_{fu}$ ), que pode ser encontrada por meio de ensaios ou obtida em catálogos fornecidos pelos fabricantes.

Para prevenir rupturas prematuras causadas devido o descolamento do FRP, em sistemas EBR, normalmente induzida por fissuras intermediárias de flexão-cisalhamento, o guia recomenda manter a deformação efetiva no FRP abaixo do valor limite ( $\varepsilon_{fd,EBR}$ ), definida pela Equação 2-3. Essa recomendação do ACI 440 (2017) foi proposta inicialmente por Teng *et al.* (2003, 2004).

$$\varepsilon_{fd,EBR} = 0.41 \sqrt{\frac{f'_c}{n E_f t_f}} \leq 0.9 \varepsilon_{fu} \quad \text{Equação 2-3}$$

Onde:

$\varepsilon_{fd,EBR}$  – Deformação limite no FRP para evitar ruptura prematura (RP-IC ou RP-ED);

$\varepsilon_{fu}$  – Deformação última do FRP (conforme Equação 2-2);

$f'_c$  – Resistência a compressão do concreto (MPa);

$n$  – número de camadas de FRP (laminados e mantas/tecidos);

$E_f$  – Módulo de elasticidade do FRP (MPa);

$t_f$  – Espessura unitária do FRP (mm).

O guia cita que a deformação efetiva no reforço ( $\varepsilon_{fd,NSM}$ ) de FRP, quando utilizada a técnica de colagem em entalhes no concreto (NSM), normalmente deve estar situada entre  $0,6\varepsilon_{fu}$  e  $0,9\varepsilon_{fu}$ . Analisando o banco de dados descrito em Bianco *et al.* (2014), o comitê do ACI 440 (2017) recomenda limitar a deformação efetiva no reforço FRP-NSM conforme Equação 2-4.

$$\varepsilon_{fd,NSM} \leq 0.7 \varepsilon_{fu} \quad \text{Equação 2-4}$$

Na estimativa da resistência a flexão de elementos reforçados com FRP, deve-se assumir algumas condições, sendo:

- a) O cálculo deve ser elaborado tomando-se como base as dimensões, o arranjo das armaduras e as propriedades dos materiais presentes no elemento a ser reforçado;
- b) Existe compatibilidade de deformações, ou seja, as seções permanecem planas após o carregamento;
- c) Desprezar a deformação de cisalhamento que ocorre na camada de adesivo, pois trata-se de uma camada muito fina;
- d) A máxima deformação de compressão a ser aplicada no concreto é  $\varepsilon_{cu}=0,003$  (3,0‰);
- e) É desprezado a resistência à tração do concreto;
- f) O FRP apresenta comportamento linear elástico até a ruptura.

Pode ser necessário remover parte da carga variável que atua sobre o elemento durante o procedimento de reforço a fim de diminuir a deflexão existente. Se for possível, pode-se remover equipamentos, materiais, vedações ou outros itens que possam ser movidos com relativa facilidade. No entanto, a deformação inicial já presente no elemento deve ser considerada no cálculo.

A deformação efetiva final na camada de FRP ( $\varepsilon_{fe}$ ) pode ser calculada por meio da compatibilidade de deformações na seção, conforme mostrado na Equação 2-5 . A deformação inicial ( $\varepsilon_{bi}$ ) presente no elemento (durante a execução do reforço) precisa ser considerada e seu valor subtraído da deformação final.

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \left( \frac{d_f - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd} \quad \text{Equação 2-5}$$

Em que:

$\varepsilon_{cu}$  – Deformação limite no concreto;

$d_f$  – Altura efetiva da camada de FRP;

$c$  – Altura da linha neutra;

$\varepsilon_{bi}$  – Deformação inicial presente na face mais externa do elemento (que recebe o FRP).

A deformação inicial presente no substrato de concreto pode ser determinada conforme os procedimentos descritos nas Práticas Recomendadas pelo CT 303 – Comitê Técnico do IBRACON/ABECE (2023). Embora os cálculos detalhados não sejam apresentados nesse

estudo, pois não se enquadram no escopo desse trabalho, é essencial considerar essas deformações iniciais para uma análise precisa e correta no projeto de reforço estrutural.

Ao realizar um reforço à flexão utilizando elementos de FRP, sejam estes aplicados na superfície (EBR) ou em entalhes no concreto (NSM), observa-se uma alteração no comportamento à flexão, caracterizada pela redução da ductilidade do elemento original devido à introdução do reforço. Para mitigar o risco de uma ruptura súbita, o guia ACI 440 (2017) recomenda que, para garantir uma ruptura com ductilidade adequada, a deformação na camada de armadura deva ser, no mínimo, 0,005 (5,0‰). Essa recomendação está alinhada com a filosofia de dimensionamento de seções sob controle de tensão, conforme estabelecido pelo ACI 318 (2019).

O ACI 440 (2017) e ACI 318 (2019) recomendam que a deformação no aço atinja pelo menos o valor de 0,005. Caso isso não seja possível, o fator de redução da resistência ( $\phi$ ) empregado nos cálculos terá um valor inferior, a depender da magnitude da deformação efetiva na armadura ( $\varepsilon_t$ ), conforme Equação 2-6. Aconselham também, que a tensão ( $f_y$ ) a ser utilizada na armadura pré-existente, seja até 550 MPa.

$$\phi = \begin{cases} 0,90 & \text{para } \varepsilon_t \geq 0,005 \\ 0,65 + \frac{0,25 (\varepsilon_t - \varepsilon_{sy})}{0,005 - \varepsilon_{sy}} & \text{para } \varepsilon_{sy} < \varepsilon_t < 0,005 \\ 0,65 & \text{para } \varepsilon_{sy} \leq \varepsilon_t \end{cases} \quad \text{Equação 2-6}$$

Na qual:

$\varepsilon_t$  – Deformação atuante (efetiva) na camada de armadura tracionada;

$\varepsilon_{sy}$  – Deformação de escoamento da armadura (aço) existente.

Para calcular o momento resistente da seção reforçada ( $M_n$ ), deve-se proceder com o equilíbrio da seção transversal, considerando a compatibilidade de deformações entre as camadas de concreto, armadura e o reforço em FRP. Como este estudo se concentrará em dados experimentais, o uso do fator de redução da resistência ( $\phi$ ) não será abordado no escopo, sendo considerado com valor unitário em análises subsequentes.

O processo de cálculo é iterativo. Inicialmente, propõe-se um valor para a altura da linha neutra ( $c$ ). Em seguida, verifica-se o equilíbrio e o nível de deformação atuante nas camadas de concreto, armadura e reforço em FRP. Caso haja diferença entre as resultantes internas de

compressão e tração na seção transversal, um novo valor para  $c$  deve ser adotado. Este procedimento é repetido até que se atinja o equilíbrio e nenhuma deformação supere os limites estabelecidos para cada material.

A seção transversal com presença de reforço visto na Figura 2.21, é a definida pelo ACI 440 (2017). Pode-se notar que a norma considera apenas as armaduras na região tracionada e o reforço de FRP (NSM ou EBR). A armadura na região comprimida não é levada em conta, procedimento este favorável a segurança.

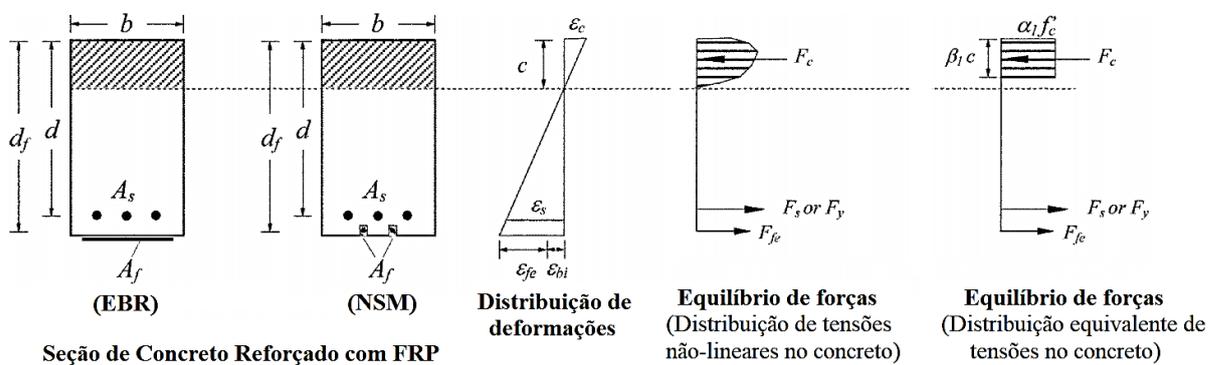


Figura 2.21: Equilíbrio de uma seção em concreto armado reforçada a flexão com FRP, Adaptado do ACI 440.2R (2017).

Da compatibilidade de deformações, pode-se chegar à deformação atuante na camada de armadura tracionada ( $\epsilon_s$ ) por meio da Equação 2-7.

$$\epsilon_s = (\epsilon_{fe} + \epsilon_{bi}) \left( \frac{d - c}{d_f - c} \right) \quad \text{Equação 2-7}$$

Onde:

$\epsilon_s$  – Deformação na camada de armadura tracionada (aço);

$d$  – Altura útil da armadura tracionada (aço).

A tensão atuante na armadura ( $f_s$ ) depende do nível de deformação aplicada, se essa for menor ou igual a deformação de escoamento ( $\epsilon_{sy}$ ), a tensão é obtida por Lei de Hooke. Em caso contrário, deve-se adotar o valor da tensão de escoamento ( $f_y$ ), conforme a mostrado na Equação 2-8.

$$f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y \quad \text{Equação 2-8}$$

Na qual:

$E_s$  – Módulo de elasticidade do aço;

$f_y$  – Tensão atuante do aço.

Nos modelos constitutivos que representam o concreto à compressão, usualmente são atribuídas curvas tensão-deformação obtidas de equações não-lineares, ilustrando o comportamento plástico do concreto, onde as tensões não são diretamente proporcionais à deformação. Na prática de projeto, para o cálculo do equilíbrio da seção, é comum substituir essa configuração não linear do diagrama por uma forma mais simples e equivalente em termos de resultante.

O diagrama não linear pode ser substituído por um de valor constante (chamado de bloco de compressão ou *Whitney stress block*). No ACI 440.2R (2017) é atribuído a constante  $\alpha_1$  que define a intensidade das tensões de compressão, e o valor  $\beta_1$  que ajusta a altura do bloco equivalente, como pode ser observado na figura anterior e descrito na Equação 2-9.

$$\alpha_1 f'_c \beta_1 b c = A_s f_s + A_f f_{fe} \quad \text{Equação 2-9}$$

Onde:

$b$  – Largura da seção transversal,

$c$  – Altura da Linha Neutra,

$A_s$  – Área de aço tracionada

$A_f$  – Área de reforço (FRP)

$f_{fe}$  – Tensão efetiva no reforço

De acordo com o guia, se o modo de ruptura do elemento fletido for controlada pelo esmagamento do concreto antes ou depois do escoamento da armadura, pode-se adotar o valor de  $\alpha_1 = 0,85$ . Caso a resistência de projeto do concreto ( $f'_c$ ) esteja entre 17 e 27 MPa, pode ser usado  $\beta_1 = 0,85$ . Esse valor é reduzido linearmente na taxa de 0,05 para cada 7,0 MPa se o valor de  $f'_c$  superar os 27 MPa, até o limite mínimo de 0,65.

Se o elemento tiver ruptura controlada pela falha do reforço (FRP), a deformação no concreto ( $\varepsilon_c$ ) pode ser inferior ao seu valor limite (0,003). Dessa forma, se faz necessário corrigir os parâmetros ( $\alpha_1$  e  $\beta_1$ ) que definem o bloco de tensões no concreto, conforme mostrado na Equação 2-10, Equação 2-11 e Equação 2-12.

$$\beta_1 = \frac{4\varepsilon'_c - \varepsilon_c}{6\varepsilon'_c - 2\varepsilon_c} \quad \text{Equação 2-10}$$

$$\alpha_1 = \frac{3\varepsilon'_c \varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3\beta_1 \varepsilon_c^2} \quad \text{Equação 2-11}$$

$$\varepsilon'_c = \frac{1.7 f'_c}{E_c} \quad \text{Equação 2-12}$$

Tem-se:

$\varepsilon'_c$  – Deformação do concreto não confinado

$\varepsilon_c$  – Deformação efetiva (atuante) na fibra mais comprimida do concreto

Após o equilíbrio da seção ser atingido (força resultante nula), parte-se ao cálculo do momento resistente ( $M_n$ ). Para isso, realiza-se o somatório de momentos em torno do ponto de aplicação da resultante de compressão no concreto ( $F_c$ ), igualando-o ao momento resistente ( $M_n$ ) obtém-se a Equação 2-13.

$$M_n = A_s f_s \left( d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \psi_f A_f f_{fe} \left( d_f - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad \text{Equação 2-13}$$

Como pode ser visto, a norma recomenda ainda um segundo fator de redução ( $\psi_f$ ) para calcular a parcela de resistência devido ao FRP. Tem como objetivo melhorar a previsão do momento resistente, em decorrência da alteração no modo de falha do elemento reforçado, esse valor é  $\psi_f = 0,85$ . Esse fator, também é considerado como unitário nesse trabalho.

Na filosofia de projeto usada pela norma, o momento fletor solicitante ( $M_u$ ) deve ser sempre menor ou igual ao momento resistente da seção ( $M_n$ ) minorado pelo fator de redução da resistência ( $\phi$ ), conforme Equação 2-14. O momento solicitante deve ser calculado por meio de envoltória de esforços, usando os fatores de ponderação impostos pela norma ACI 318

adequado para cada tipologia de ações permanentes, acidentais e excepcionais, as combinações de carga devem ser devidamente avaliadas buscando as situações mais críticas de projeto.

$$\phi M_n \geq M_u \quad \text{Equação 2-14}$$

### 2.5.2 *Bulletin fib 90 – 2019*

A filosofia de dimensionamento a flexão descrita no *Bulletin fib 90* (2019) é semelhante as prescrições do guia americano, fazendo as seguintes considerações para a análise de seções reforçadas a flexão com materiais compósitos:

- a) O escorregamento entre o FRP e o concreto é negligenciável;
- b) A resistência ao cisalhamento interlaminar do FRP é maior do que a resistência ao cisalhamento da ligação com o adesivo;
- c) A preparação da superfície do substrato de concreto é suficiente para atingir o nível de força de adesão exigida no projeto;
- d) O estado de deformação inicial do elemento a ser reforçado pode ser determinado com base em análise elástica da seção transversal fissurada.

Um elemento fletido com reforço aplicado externamente com FRP pode falhar de acordo com algum dos seguintes modos de ruptura:

- a) Escoamento da armadura seguida pelo esmagamento do concreto;
- b) Escoamento da armadura seguido da ruptura do FRP;
- c) Esmagamento do concreto (ruptura frágil não permitida);
- d) Ruptura prematura por perda de ação do reforço devido ao descolamento, normalmente após o escoamento da armadura (modo de falha mais comum).

Para cálculo da resistência à flexão, em elementos reforçados com FRP, vale salientar que são empregados os mesmos princípios de dimensionamento em ambas as técnicas de reforço, seja NSM ou EBR. Deve-se, portanto, partir primeiro para a avaliação da capacidade resistente a flexão, em seguida, realizar a verificação dos modos de falha descritos anteriormente. É importante prover meio para que ocorra o escoamento da armadura tracionada antes da falha do FRP, para ser gerado um certo grau de ductilidade ao elemento.



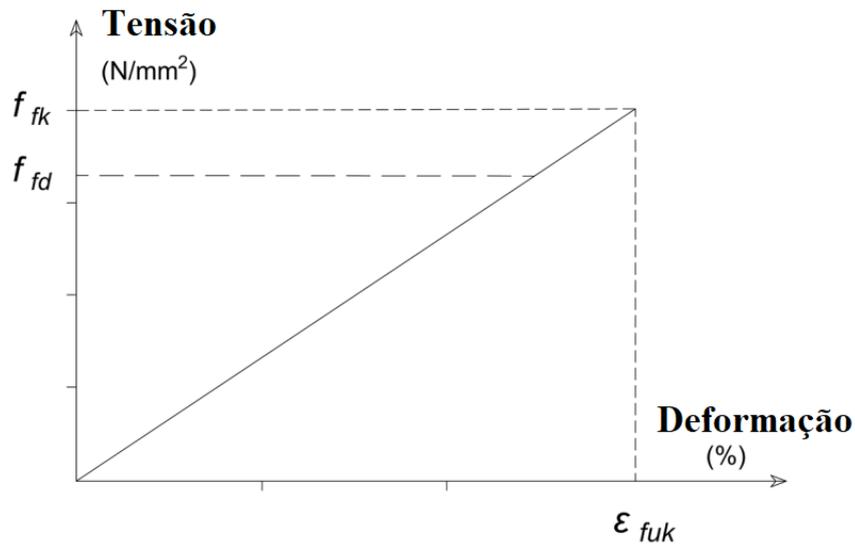


Figura 2.23: Gráfico Tensão-Deformação para elementos de FRP, Adaptado do *Bulletin FIB* 90 (2019).

A tensão de projeto ( $f_{fd}$ ) do FRP utilizada em análise de Estado Limite Último (ELU) é avaliada por meio da tensão última característica, do fator de redução que depende da situação de projeto ( $\gamma_f$ ) e um outro fator de redução ( $\eta$ ) relacionado à técnica empregada NSM ou EBR, conforme mostra a Equação 2-15.

$$f_{fd} = \eta \frac{f_{fk}}{\gamma_f} \quad \text{Equação 2-15}$$

Na qual:

$f_{fd}$  – Tensão admissível do FRP (valor de projeto);

$\eta$  – Fator de redução para o FRP;

$f_{fk}$  – Tensão admissível do FRP (valor característico);

$\gamma_f$  – Coeficiente de ponderação da resistência do FRP.

A deformação máxima ( $\epsilon_{fRd}$ ) atuante no FRP necessita ser limitada por meio do fator de redução ( $\eta$ ), cujo valor é unitário para reforço FRP-EBR, enquanto para FRP-NSM, tal coeficiente vale 0,8; e pelo coeficiente de segurança ( $\gamma_f$ ), que possui valor de 1,25 para cargas permanentes e 1,0 para cargas acidentais, conforme:

$$\epsilon_{fRd,max} = \eta \frac{f_{fk}}{\gamma_f E_f} = \frac{f_{fd}}{E_f} \quad \text{Equação 2-16}$$

Sendo:

$\varepsilon_{fRd,max}$  – Deformação máxima no FRP;

$E_f$  – Módulo de elasticidade do FRP.

A Equação 2-16 é válida quando pode ser considerada a ação completa do reforço (Ruptura da Fibra – RF), sem ocorrência de outros tipos de ruptura, além da ruptura do próprio FRP.

Em casos de reforço usando FRP-EBR, para evitar a ruptura por descolamento causado por fissuras intermediárias (IC – *Intermediate Crack Debonding*), pode-se limitar a tensão atuante no reforço conforme Equação 2-17. Para sistemas de reforço empregando FRP-NSM, não é necessária a verificação desse modo de ruptura.

$$f_{fbd,IC} = \frac{k_{cr,k} k_k k_b \sqrt{\frac{2E_f}{t_f} f_{cm}^{2/3}}}{\gamma_{fb}} \quad \text{Equação 2-17}$$

$$k_b = \frac{\sqrt{2 - \frac{b_f}{b}}}{\sqrt{1 + \frac{b_f}{b}}} \quad \text{Equação 2-18}$$

Sendo  $f_{cm}$  a resistência a compressão do concreto (MPa),  $t_f$  a espessura (mm) e  $b_f$  a largura da camada de reforço (mm),  $E_f$  é o módulo de elasticidade do FRP. Os parâmetros  $K_{cr,k}$ ,  $K_k$ , são coeficientes de ajuste obtidos por meio de ensaios, e podem assumir valores médios de 2,1 e 0,25, respectivamente, ou, valores característicos de 1,8 e 0,17.

Para evitar rupturas por descolamentos na zona final de ancoragem (*End Debonding - ED*), a tensão atuante no FRP-EBR pode ser limitada conforme a Equação 2-19, em função do comprimento de ancoragem  $l_e$ .

$$f_{lbd} = \frac{k_k}{\gamma_{fb}} k_b \beta_l \sqrt{\frac{2E_f}{t_f} f_{cm}^{2/3}} \quad \text{Equação 2-19}$$

$$\beta_l = \left\{ \frac{l_b}{l_e} \left( 2 - \frac{l_b}{l_e} \right) \right\} < 1 \quad \text{Equação 2-20}$$

$$l_e = \frac{\pi}{k_b} \sqrt{\frac{E_f t_f}{8f_{cm}^{2/3}}}$$

Sendo:

$f_{lbd}$  – Tensão resistente para evitar rupturas prematura na região de ancoragem do FRP

$l_b$  – Comprimento de ancoragem efetivo/existente (mm)

$l_e$  – Comprimento de ancoragem necessário (mm)

A recomendação do *fib* 90 sugere algumas formas para verificar os modos de ruptura por descolamento na região final de ancoragem (ED). No caso de FRP-NSM, uma maneira de se evitar esse tipo de ruptura, é limitar a deformação na camada de reforço pelo valor obtido na Equação 2-21. Esse modelo foi baseado em ensaios experimentais de 174 espécimes, envolvendo diferentes formas de ruptura: na interface entre concreto-adesivo, adesivo-FRP ou ruptura do adesivo.

$$\varepsilon_{f,max,ED} = a \frac{p_{f,g}^c}{(E_f A_f)^c} \quad \text{Equação 2-21}$$

Sendo  $p_{f,g}$  o perímetro da abertura (ranhura) para instalação do FRP-NSM,  $E_f$  o módulo de elasticidade da fibra, e  $A_f$  a área de reforço, os demais parâmetros presentes nessa equação são coeficientes de regressão obtidos experimentalmente, conforme sugerido pelo *fib*, para  $a$ ,  $b$  e  $c$ , seus valores valem 252, 0.823, e 0.66, respectivamente. Para usar como valores característicos (em situação de projeto) usar  $a = 157$ .

A altura útil (efetiva) do FRP é calculada conforme Figura 2.24 e descrita na Equação 2-22.

$$d_f = h - \left(t_s - \frac{b_f}{2}\right) \quad \text{Equação 2-22}$$

Na qual:

$d_f$  – Altura útil efetiva da camada de reforço (mm);

$h$  – Altura total da seção transversal (mm);

$t_s$  – Altura da abertura (mm);

$b_f$  – Largura da lâmina/barra de FRP (mm).

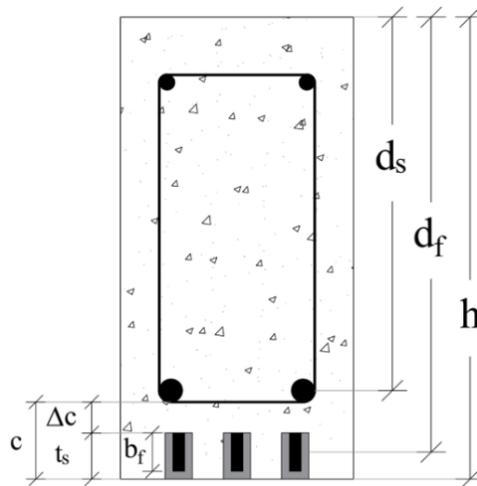


Figura 2.24: Seção transversal com reforço FRP-NSM, *Bulletin FIB 90* (2019)

O equilíbrio da seção transversal pode ser feito considerando todas as camadas de armadura, conforme mostrado na Figura 2.25. O diagrama de tensões na região comprimida pode ser simplificado por um diagrama retangular, a máxima deformação no concreto é assumida como sendo 3,5‰.

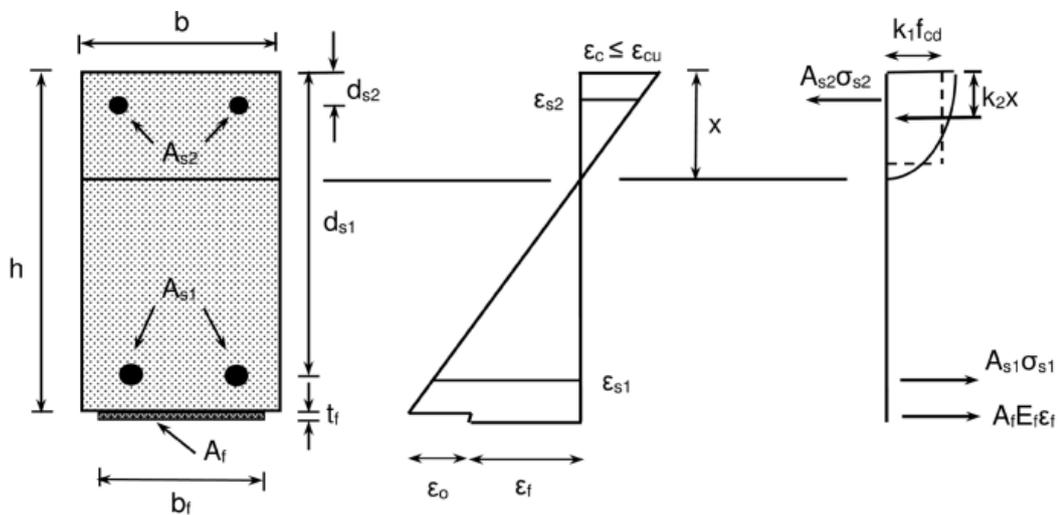


Figura 2.25: Elementos da seção transversal, e o equilíbrio estático de forças, *Bulletin fib 90* (2019)

O equilíbrio de forças deve ser garantido, conforme a verificação de igualdade apresentada na Equação 2-23. O momento resistente de cálculo da seção ( $M_{rd}$ ) pode ser encontrado por meio do equilíbrio de momentos em qualquer ponto ao longo da altura da seção,

no caso de escolher o ponto de aplicação da resultante de compressão no concreto, a equação ficará conforme mostrado na Equação 2-24.

$$k_1 f_{cd} b x + A_{s2} \sigma_{s2} = A_{s1} \sigma_{s1} + A_f E_f \varepsilon_f \quad \text{Equação 2-23}$$

$$M_{rd} = A_{s1} \sigma_{s1} (d_{s1} - k_2 x) + A_f E_f \varepsilon_f (h - k_2 x) + A_{s2} \sigma_{s2} (k_2 x - d_{s2}) \quad \text{Equação 2-24}$$

Tem-se:

$k_1$  – Parâmetro referente ao bloco de compressão do concreto;

$k_2$  – Parâmetro referente ao bloco de compressão do concreto;

$x$  – Altura da linha neutra;

$d_{s1}$  – Altura útil da armadura inferior;

$d_{s2}$  – Altura útil da armadura superior;

$A_{s1}$  – Área de aço inferior;

$A_{s2}$  – Área de aço superior;

$\sigma_{s1}$  – Tensão atuante na camada de armadura inferior;

$\sigma_{s2}$  – Tensão atuante na camada de armadura superior.

As tensões nas camadas de armaduras (pré-existentes), podem ser encontradas por meio do menor dos valores encontrados na Equação 2-25 para a camada inferior e na Equação 2-26 para a camada superior.

$$\sigma_{s1} = \min \left( \varepsilon_c \frac{d_{s1} - x}{x}, \frac{f_{yd}}{E_s} \right) E_s \quad \text{Equação 2-25}$$

$$\sigma_{s2} = \min \left( \varepsilon_c \frac{x - d_{s2}}{x}, \frac{f_{yd}}{E_s} \right) E_s \quad \text{Equação 2-26}$$

Os fatores  $k_1$  e  $k_2$  são usados para corrigir o diagrama de tensões de compressão no concreto, que na prática se comporta de maneira não linear, apresentando um diagrama em formato parábola-retângulo, no entanto, para fins práticos é tratado como um diagrama retangular equivalente. São calculados por meio das Equação 2-27 e Equação 2-28.

$$k_1 = \begin{cases} 1000\varepsilon_c \left( 0,5 - \frac{1000}{12} \varepsilon_c \right) & \text{para } \varepsilon_c \leq 0,002 \\ 1 - \frac{2}{3000\varepsilon_c} & \text{para } 0,002 < \varepsilon_c \leq 0,0035 \end{cases} \quad \text{Equação 2-27}$$

$$k_2 = \begin{cases} \frac{8 - 1000\varepsilon_c}{4(6 - 1000\varepsilon_c)} & \text{para } \varepsilon_c \leq 0,002 \\ \frac{1000\varepsilon_c(3000\varepsilon_c - 4) + 2}{2000\varepsilon_c(3000\varepsilon_c - 2)} & \text{para } 0,002 < \varepsilon_c \leq 0,0035 \end{cases} \quad \text{Equação 2-28}$$

As deformações nas diversas camadas presentes ao longo da seção devem ser verificadas, devendo não exceder o limite da deformação dos materiais. É preciso garantir que a armadura tracionada esteja pelo menos escoando, para garantir um certo nível de ductilidade ao elemento reforçado. A deformação no FRP também não pode ser superior a deformação de ruptura do compósito, e pode ser obtida por meio da Equação 2-29.

$$\varepsilon_f = \varepsilon_c \frac{h - x}{x} - \varepsilon_0 \quad \text{Equação 2-29}$$

Após o dimensionamento à flexão, também é importante realizar a verificação da resistência ao cisalhamento. Nesse trabalho limita-se a verificar, o tipo de ruptura prematura causada por desprendimento da camada de concreto que serve de cobrimento às armaduras em conjunto com o FRP (*Concrete Cover Separation – CCS*). É um tipo de ruptura relacionada à resistência ao cisalhamento do concreto.

De acordo com o *fib* 90 pode ser utilizado o modelo de Jansze (1997) para verificar a força cortante ( $V_{rd}$ ) máxima no elemento, para não ocorrer ruptura por deslocamento da camada de cobrimento em concreto, conforme mostrado ilustrado na Figura 2.26 e descrito nas equações Equação 2-30 e Equação 2-31.

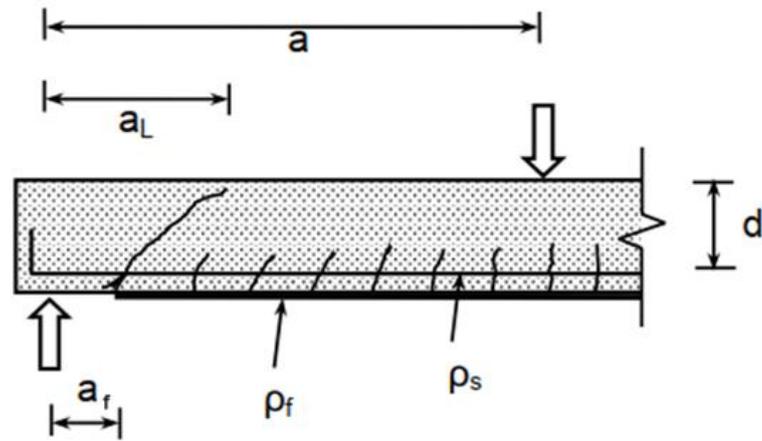


Figura 2.26: Ruptura por CCS - Vão fictício de cisalhamento, analogia para elementos reforçados com FRP's, *Bulletin fib 90* (2019).

$$V_{Sd} \leq V_{Rd} = \tau_{Rd} b d \quad \text{Equação 2-30}$$

$$\tau_{Rd} = 0,18 \sqrt[3]{3 \frac{d}{a_L} \left( 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \sqrt[3]{100 \rho_s f_{ck}} \right)} \quad \text{Equação 2-31}$$

$$a_L = \sqrt[4]{\frac{(1 - \sqrt{\rho_s})^2}{\rho_s} d a_f^3} \quad \text{Equação 2-32}$$

Sendo:

$a_L$  – o vão fictício de cisalhamento (mm);

$a_f$  – a distância entre o apoio e a extremidade do FRP (mm);

$\rho_s$  – taxa de armadura.

Também é apresentado a Equação 2-33, uma extensão do modelo de Jansze, que também representa a força máxima de cisalhamento antes de causar falha por CCS, para valores acima destes, é necessário reforço ao corte. Esse modelo é baseado nas recomendações do *Euro Code* (2010) para resistência ao cisalhamento em elementos sem armadura (estribos).

$$V_{Rd,f} = 0,75 \left[ 1 + 19,6 \frac{(100 \rho_s)^{0,15}}{a_f} \right] V_{Rd,c} b_w d \quad \text{Equação 2-33}$$

$$V_{Rd,c} = \min \begin{cases} \frac{0,18}{\gamma_f} k (100 \rho_s f_c)^{1/3} \\ 0,035 k^{3/2} f_c^{1/2} \end{cases} \quad \text{Equação 2-34}$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 \quad \text{Equação 2-35}$$

Onde:

$V_{rd,c}$  – a resistência ao cisalhamento em elementos de concreto sem armadura de corte;

$b_w$  – a largura da seção (ou largura da alma em seções T);

$\rho_s$  – a taxa de armadura existente precisa ser limitado em  $\rho_s \leq 0,02$ .

Ambos os modelos podem ser empregados, nesse trabalho será dado enfoque ao proposto inicialmente por Jansze (1997), que utiliza o conceito de vão fictício de cisalhamento. Nesse modelo de cálculo, não é levado em conta a presença de armaduras de cisalhamento (estribos).

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1 APRESENTAÇÃO GERAL

Esse trabalho trata-se de um estudo teórico e analítico com base em um banco de dados com resultados experimentais, cujo tema se refere ao reforço estrutural à flexão em vigas de concreto armado usando FRP como material de reforço. O presente estudo pode ser dividido em três partes:

- I. Referencial teórico (Capítulo 2);
- II. Banco de dados (Capítulo 4);
- III. Análise dos modelos de cálculo (Capítulo 5);

O desenvolvimento do referencial teórico baseia-se em pesquisas em artigos científicos, teses e dissertações sobre o tema, fornecendo a base teórica necessária para compreensão do assunto, alinhada às recomendações normativas mais relevantes da atualidade. Tópicos específicos foram dedicados para abordar pontos importantes, como as características gerais dos FRP's, a metodologia executiva, as normas técnicas e o dimensionamento estrutural do reforço.

Foi construído um banco de dados com 47 trabalhos experimentais envolvendo reforço à flexão com FRP's aplicados em elementos do tipo viga de concreto armado, abrangendo uma ampla variedade de parâmetros. Destacam-se os distintos resultados obtidos com a técnica de colagem externa (EBR) e com a técnica aplicada em ranhuras na zona de cobrimento em concreto (NSM).

Os parâmetros geométricos e mecânicos das espécimens presentes no banco de dados são utilizados na terceira etapa, como entrada para análise dos modelos de dimensionamento ao ELU (Estado Limite Último) para reforço com FRP, descritos no guia americano ACI 440.2R (2017) e no *Bulletin fib* 90 (2019), recomendado pela Federação Internacional do Concreto (*fib*). A avaliação primária desse item terá como base de comparação a carga última teórica, obtida com os modelos de cálculos, e a carga última experimental. Também serão realizados comparativos com o modo de ruptura, incremento de resistência e a deformação última na camada de FRP, entre valores experimentais e os previstos pelos modelos avaliados.

São utilizados tabelas e gráficos de dispersão para apresentar os resultados. Dados estatísticos como média simples, desvio padrão e coeficiente de variação, são mostrados para melhorar o entendimento geral dos parâmetros. Para observar possíveis tendências de comportamento e relações entre os parâmetros, também são apresentadas retas de ajuste, suas equações e os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) ao utilizar a técnica de regressão linear simples.

Todo o desenvolvimento dos cálculos foi realizado por meio de planilhas eletrônicas através do *software Microsoft Excel*. Os principais dados de saída são os valores do momento resistente da seção transversal ( $M_{u,teo}$ ), carga última ( $P_{u,teo}$ ), deformação limite no FRP ( $\epsilon_{f,teo}$ ), incremento de carga e o modo de ruptura.

Para registro de informação no banco de dados, as propriedades dos materiais são tomadas com seus valores médios, com controle rigoroso de todos os parâmetros envolvidos, diferente das situações de projeto, onde são empregados valores característicos. Alguns autores presentes no banco de dados não informaram valores experimentais para o módulo de elasticidade do concreto ( $E_c$ ) e módulo de elasticidade do aço ( $E_s$ ), nessas situações, foi considerado valores teóricos conforme ACI 318 (2019).

O valor da deformação limite aplicada no FRP é um fator de análise importante nesse trabalho, por isso, decidiu-se avaliar as considerações previstas em cada recomendações técnicas.

As normas e recomendações em geral trazem alguns modelos que limitam o valor da deformação na camada de reforço com vista a impedir a ocorrência de rupturas prematuras do reforço, chamadas usualmente de descolamento, desprendimento ou arrancamento. O guia americano ACI 440 (2017) adota a deformação limite para impedir rupturas prematuras por descolamento do FRP devido a fissuras intermediárias e de extremidade (flexão ou flexão-cisalhamento). O *Bulletin fib 90* (2019) apresenta vários modelos para alguns modos de ruptura mais frequentes.

Os demais parâmetros, são tratados conforme cada normatização. O material concreto, assume modelos constitutivos com diagramas não-linear, a tensão de ruptura é corrigida para levar em conta o efeito de cargas de longa duração (efeito *Rusch*), a profundidade da linha neutra é ajustada para assumir distribuição uniforme de tensões (*stress concrete block*) durante as verificações de equilíbrio, e a deformação máxima de esmagamento no concreto com valores entre 3,0 e 3,5%.

Para obtenção do momento resistente na seção transversal, é considerado a geometria e materiais conforme informados pelos autores do banco de dados. A altura útil da armadura inferior ( $d$ ) e superior ( $d'$ ) quando não especificados, foram consideradas nesse trabalho como sendo de 0,9 e 0,1 da altura total da viga, respectivamente. É computado a contribuição da armadura inferior ( $A_s$ ) e superior ( $A_{s'}$ ), não sendo consideradas outras camadas. O processo de cálculo é iterativo, onde são testados diferentes valores para a altura da linha neutra, até a convergência do equilíbrio, em que o somatório total de forças resultantes na seção é nulo.

O modo de ruptura do elemento dependerá de diversos fatores, dentre eles a taxa de reforço, taxa de armadura existente e a rigidez relativa dos materiais. No entanto, na avaliação da compatibilidade de deformação entre as camadas da seção transversal, é assumido que a falha pode acontecer por rupturas conhecidas como clássicas, ocorrendo pelo esmagamento do concreto, deformação plástica das armaduras ou ruptura do FRP, ou ainda, rupturas tidas como prematuras, a qual ocorre algum mecanismo de descolamento do reforço antes de atingir sua capacidade máxima.

Um esquema geral dessa dissertação pode ser visto na Figura 3.1.

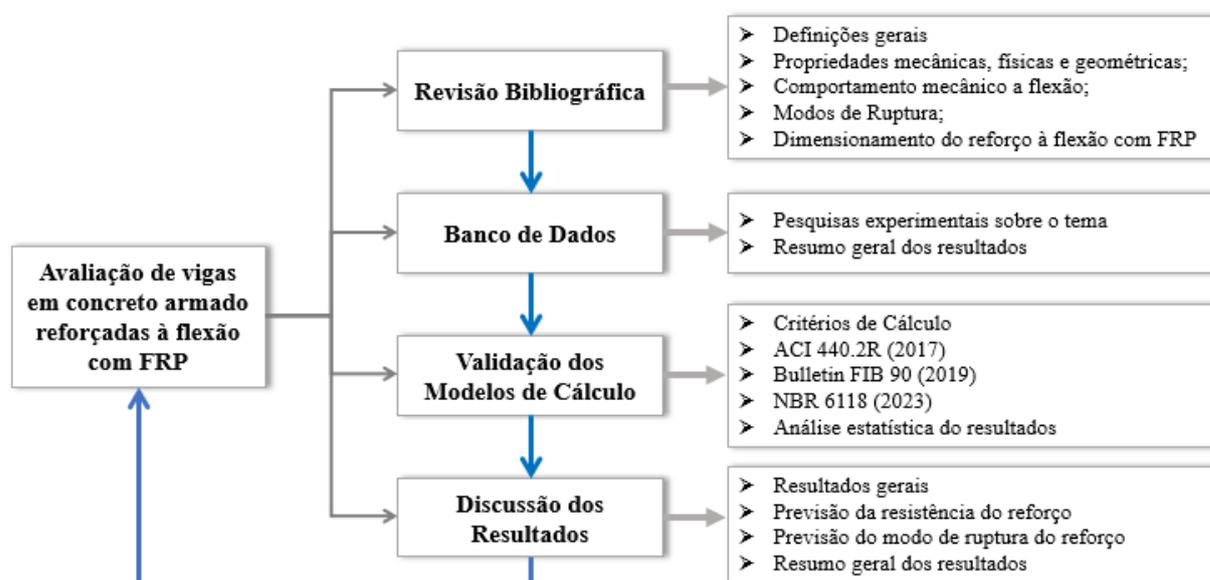


Figura 3.1: Esquema de organização dessa dissertação.

### 3.2 CRITÉRIOS DE ANÁLISE

Na literatura técnica são encontrados diversos modelos para o cálculo à flexão e estimativa do modo de ruptura em elementos reforçados com FRP. Para melhor compreensão do trabalho, são apresentados os critérios de análise para cada recomendação técnica.

Os parâmetros do banco de dados são usados para alimentar os modelos preconizados pelo ACI 440.2R (2017) e *Bulletin fib* 90 (2019) a fim estimar a capacidade resistente das espécimens e comparar com os resultados experimentais. A escolha se deve ao fato da relevância internacional dessas normas, além de possuírem o material de referência atualizado sobre o tema no presente momento.

Na Figura 3.2 são apresentados os critérios de análise para cada modelo de cálculo. Em ambos os casos são utilizados valores médios para representar as propriedades dos materiais, e não são utilizados coeficientes de segurança ou fatores de redução da resistência.

	Parâmetros	Valores adotados
ACI 440.2R (2017)	1) Propriedades dos materiais:	Valores médios
	2) Deformação do FRP:	$\varepsilon_f \leq \varepsilon_{fd}$ $\varepsilon_{fd} = k_m \varepsilon_{fk}$ (NSM / EBR)
	3) Lei de comportamento do concreto:	Conforme ACI 440.2R / ACI 318
	4) Modos de Rupturas Assumidos	RC / RF / RP-IC / RP-ED
	5) Equações de equilíbrio:	Conforme ACI $\psi_f = 1,0$ $\phi = 1,0$
<i>Bulletin fib</i> 90 (2019)	1) Propriedades dos materiais:	Valor médio
	2) Deformação do FRP:	$\varepsilon_f \leq \varepsilon_{fd}$ $\varepsilon_{fd} = \min \left\{ \begin{array}{l} \eta \varepsilon_{fu} \\ \varepsilon_{fd,IC} \end{array} \right.$ (EBR) $\varepsilon_{fd} = \eta \varepsilon_{fu}$ (NSM)
	3) Lei de comportamento do concreto:	Conforme FIB 90
	4) Modos de Rupturas Assumidos	RC / RF / RP-IC / RP-ED / RP-CCS
	5) Equações de equilíbrio:	Conforme FIB / Fator de correção: $\eta=1,0$ (EBR) e $\eta=0,8$ (NSM)

Figura 3.2: Critérios de análise para o ACI 440 e *fib* 90.

A fim de evitar a ruptura prematura do reforço, por falhas de descolamento causadas por fissuras de flexão-cisalhamento e problemas de ancoragem, é estabelecido valores limites

para a deformação máxima na camada de FRP, conforme cada recomendação técnica. Este valor limite depende da técnica de colagem (NSM ou EBR) e dos parâmetros físicos do material, sendo estabelecido de maneira distinta pelo ACI 440 e *fib* 90.

Dentre as pesquisas realizadas para construção do banco de dados, é observado várias nomenclaturas para os modos de ruptura. Na prática, pode ser complicado definir o tipo de ruptura, por questões intrínsecas a metodologia de ensaio, ou até mesmo pela ruptura não estar bem caracterizada. Para padronizar as nomenclaturas na apresentação dos resultados desse trabalho, o tipo de ruptura pode ser dividido em dois grupos: ruptura clássica, onde existe aproveitamento máximo dos materiais (esmagamento do concreto seguido pelo escoamento das armaduras) e rupturas prematuras, onde ocorre falha prematura do FRP por mecanismos de descolamento ou desprendimento do substrato.

Dentre as rupturas prematuras, são várias as definições e conceitos estabelecidos. Para essa pesquisa, é padronizado semelhante ao que é especificado no *Bulletin fib* 90 (2019). Nesse caso, pode existir uma ruptura prematura do FRP causada por fissuras intermediárias originadas da flexão-cisalhamento, chamadas aqui de RP-IC (em referência a *Intermediate Crack Debonding*), e de maneira semelhante, quando a ruptura ocorre na zona final de ancoragem do reforço, será descrita como RP-ED (em referência a *End Debonding*).

Pode ocorrer ainda um tipo de ruptura, também iniciado na região final de ancoragem do FRP, porém, havendo o desprendimento do reforço em conjunto com a camada de cobrimento em concreto, chamada de RP-CCS (em referência a *Concrete Cover Separation*). A verificação desse modo de ruptura prematuro, só será realizada para o *fib* 90, envolve a resistência ao cisalhamento do elemento, e, portanto, é realizada de forma separada.

Com objetivo de padronizar as nomenclaturas, na Tabela 3.1 é apresentado detalhes dos tipos de ruptura, uma breve descrição e a sigla utilizada nas análises desse trabalho. Podem ser encontrados outros tipos e classificações para os modos de falha, no entanto, será utilizada a nomenclatura que melhor se adequa aos modelos de cálculo estudados. O *fib* 90 apresenta verificações para todos os modos de ruptura prematuros observados, no entanto o guia ACI 440 considera os modos RP-ED e RP-IC em uma mesma verificação ao limitar a deformação no FRP, o modo RP-CCS não é considerado de forma explícita pelo guia, traz um valor limite para a força cortante no elemento não precisar adicionar reforço na região de ancoragem.

Tabela 3.1: Descrição para os modos de ruptura assumidos nesse trabalho.

<b>Sigla</b>	<b>Tipo</b>	<b>Descrição</b>
<b>RC</b>	Clássica	Ruptura causada pelo esmagamento do concreto seguido pelo escoamento das armaduras (deformação plástica excessiva).
<b>RF</b>	Clássica	Ruptura do FRP. Quando é possível a mobilização completa da resistência do compósito. Sem ocorrência de rupturas prematuras por descolamento do reforço.
<b>RP-IC</b>	Prematura	Descolamento do FRP devido a fissuras intermediárias de flexão ( <i>Intermediate Crack Debonding</i> ). É mais relevante quando empregado EBR.
<b>RP-ED</b>	Prematura	Descolamento do FRP na região de ancoragem ( <i>End Debonding</i> ). Causado por fissuras de flexão-cisalhamento.
<b>RP-CCS</b>	Prematura	Desplacamento da camada de cobrimento em concreto na região final da ancoragem do FRP ( <i>Concrete Cover Separation</i> ). Envolve a resistência ao cisalhamento do concreto.

Os valores para a relação  $P_{u,exp}/P_{u,teo}$  serão classificados segundo o critério de penalidade proposto por Collins (2001), o *Demerit Points Classification* – DPC, e adaptado por Moraes Neto (2013), conforme apresentado na Tabela 3.2. O DPC categoriza a relação unitária em faixas de valores, classificando-as em cinco níveis, que vão entre extremamente conservador a extremamente perigoso, com nível de penalidade variando entre 0 e 10 pontos. Essa classificação é útil para analisar a eficiência de cada modelo de cálculo em prever a carga última em elementos reforçados a flexão com FRP's.

Tabela 3.2: Critério de classificação DPC proposto por Collins (2001) e adaptado por Moraes Neto (2013)

$P_{u,exp}/P_{u,teo}$	<b>Classificação</b>	<b>Penalidade</b>
< 0,50	Extremamente Perigoso	10
[0,50 – 0,85[	Perigoso	5
[0,85 – 1,15[	Segurança apropriada	0
[1,15 – 2,00[	Conservador	1
$\geq 2,00$	Extremamente Conservador	2

### 3.3 BANCO DE DADOS

Com objetivo de avaliar o comportamento de elementos do tipo vigas reforçados à flexão com FRP's, foi construído um banco de dados com resultados experimentais realizados por pesquisadores de diversos países, entre os anos 2000 e 2024, que utilizaram as técnicas de colagem denominadas de NSM e EBR. Esses resultados servirão de base para o capítulo seguinte, sendo utilizados para analisar o comportamento dos modelos teóricos estabelecidos pelo ACI 440 e *Bulletin fib* 90.

Os critérios de seleção e escolha foram estabelecidos com objetivo de homogeneizar os parâmetros do banco de dados, sendo eles:

- a) Elementos do tipo viga, reforçados à flexão;
- b) Elementos com reforço ao momento positivo (fibra inferior), não sendo levados em conta elementos contínuos ou com reforço ao momento negativo (fibra superior);
- c) Elementos com seção transversal retangular (R) ou em Tê (T);
- d) Elementos fabricados em concreto de resistência usual, não sendo considerados concretos de resistências mais elevadas com  $f_{ck}$  superior a 60 MPa, ou concretos especiais;
- e) Emprego somente da técnica de colagem NSM ou EBR;
- f) FRP em formato de tecidos/mantas, laminados (tiras) e barras de seção circular;
- g) Uso de reforço em FRP fabricado com fibra de carbono (CFRP) ou fibra de vidro (GFRP). Não foram considerados reforço usando aço convencional (CA-50 ou CA-60) ou em fibra de aramida (AFRP);
- h) Apenas um tipo de FRP e uma técnica de colagem por elemento, não sendo considerado sistemas mistos ou híbridos;
- i) Carregamentos estáticos e de curta duração. Não foram considerados efeitos dinâmicos, fadiga ou fluência do concreto;
- j) Elementos sem pré-carregamento (não fissurados);
- k) Elementos com ruptura caracterizada por cisalhamento não serão considerados;
- l) Não são considerados elementos com colagem parcial, somente colagem completa do FRP;
- m) Ensaio à flexão em vigas com 4 pontos de aplicação de carga (Ensaio de *Stuttgart*).

O banco de dados possui um acervo de 47 pesquisas experimentais, que envolve um total de 324 vigas, dessas 112 espécimens reforçadas à flexão com a técnica de colagem *NSM*

e 147 com a técnica *EBR*, sendo 35% e 45% da quantidade total de ensaios, respectivamente, conforme pode ser visto na Tabela 3.3. A quantidade restante representa os elementos de referência (sem reforço), com 65 vigas, representando 20% das espécimens totais inseridas no banco de dados, esses elementos foram avaliados apenas para contabilizar os incrementos de resistência teórico, e não participam das demais análises.

Os autores marcados com “\*” realizaram suas pesquisas no Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília (Labest – UnB).

Tabela 3.3: Banco de dados – resumo geral das pesquisas

<b>Autores (ano)</b>	<b>Seção</b>	<b><math>f_c</math> (MPa)</b>	<b>Tipo FRP</b>	<b>Total</b>	<b>NSM</b>	<b>EBR</b>
Fortes (2000)	Viga T	21,5	CFRP	8	0	6
Fortes, Barros e Padaratz (2002)	Viga Ret.	46,1	CFRP	8	4	0
Dias, Juvandes e Figueiras (2002)	Viga Ret.	41	CFRP	6	0	6
Araujo (2002)	Viga Ret.	30,4 - 33,8	CFRP	3	0	2
Beber (2003)	Viga Ret.	32,8	CFRP	14	0	12
*Lima (2004)	Viga T	41,2 - 50,1	CFRP / GFRP	8	6	0
Oller (2005)	Viga Ret.	32,2	CFRP	7	0	7
*Silva Filho (2005)	Viga T	41 - 52	CFRP / GFRP	10	5	4
*Junior (2005)	Viga T	35,8 - 47,4	CFRP	5	1	2
*Castro (2005)	Viga T	35,2 - 52,8	CFRP / GFRP	19	9	3
Maalej et al (2005)	Viga Ret.	39,8 - 41,0	CFRP	11	0	11
Moon et al (2005)	Viga Ret.	30	CFRP	6	6	0
Kang et al. (2005)	Viga Ret.	32	CFRP	5	4	0
Niu et al. (2006)	Viga Ret.	31,6 - 35,9	CFRP	11	0	11
Barros et al (2007)	Viga Ret.	44,2	CFRP	12	3	6
Yost <i>et al.</i> (2007)	Viga Ret.	37,2	CFRP	15	12	0
Aram et al. (2008)	Viga Ret.	49 - 52	CFRP	2	0	2
Kotynia et al (2009)	Viga Ret.	32,3 - 37,3	CFRP	2	0	2
Siddiqui (2009)	Viga Ret.	35	CFRP	3	0	3
Rusinowski e Taljsten (2009)	Viga Ret.	55,8	CFRP	2	0	2
Hong (2012)	Viga Ret.	20,7	CFRP	4	0	4
Dias, Barros e Azevedo (2012)	Viga Ret.	50,2	CFRP	4	3	0
*Manzano (2012)	Viga T	47	CFRP / GFRP	3	0	2
Lim (2013)	Viga Ret.	30	CFRP	6	6	0
Monteiro (2014)	Viga T	20,4 - 22,9	CFRP	6	3	2
Al-Zaid et al. (2014)	Viga Ret.	30	CFRP	2	0	2
Vieira (2014)	Viga Ret.	36,5 - 41,5	CFRP	15	12	0
Peng et al. (2014)	Viga Ret.	21,3	CFRP	1	0	1
*Silva (2014)	Viga T	40,6 - 49,4	CFRP / GFRP	8	0	6
Al-Saawani et al. (2015)	Viga Ret.	17,4 - 35,3	CFRP	6	0	6
Hussein (2016)	Viga Ret.	29,6	CFRP	5	4	0
Melo (2017)	Viga Ret.	44,8	CFRP / GFRP	6	4	0
Turco et al. (2017)	Viga Ret.	27,3 - 42,6	CFRP	6	0	6
Marques (2017)	Viga Ret.	44,54	CFRP	10	2	4
Fu et al (2017)	Viga Ret.	25,9 - 49	CFRP	2	0	2
Saed et al (2018)	Viga Ret.	32,8	CFRP	8	4	0
Fu et al (2018)	Viga Ret.	47 - 48,2	CFRP	5	0	5
El-Zeadani (2019)	Viga Ret.	22,7	CFRP	1	0	1
Santos (2019)	Viga Ret.	24,05	CFRP	11	0	10
Al-Saawani, El-Sayed e Al-Negheimish (2020)	Viga Ret.	28,5	CFRP	14	0	10
Slaitas e Valinovic (2020)	Viga Ret.	50	CFRP	1	0	1
Zhou et al. (2020)	Viga Ret.	28,5	CFRP	1	0	1
*Pinto (2023)	Viga Ret.	31,64	CFRP	8	4	0
*Dal Pont (2023)	Viga Ret.	44,3	CFRP	5	4	0
Cordina et al (2023)	Viga Ret.	23,8-44,76	CFRP	3	0	3
Baena et al. (2023)	Viga Ret.	31,8 - 48,1	CFRP	24	16	0
Codina et al. (2024)	Viga Ret.	44,8	CFRP	2	0	2

A maior parte dos ensaios foram realizados através do emprego de FRP's fabricados em fibra de carbono (CFRP), cerca de 95% do total, e apenas 5% em fibra de vidro (GFRP). A resistência à compressão do concreto ( $f_c$ ) empregada nos ensaios variou entre 20,7 e 55,8 MPa, a resistência última do FRP ( $f_{fu}$ ), entre 347 e 4900 MPa, enquanto a deformação última do FRP apresentou valores entre 6,55 e 28,6%. A taxa de reforço variou entre 0,01% e 1,07%, e a taxa de armadura passiva exibiu estimativas entre 0,19 e 1,71%. Um resumo com os valores máximos, mínimos, e a média dos parâmetros mais relevantes do banco de dados são apresentados na Tabela 3.4 para cada técnica de colagem.

Tabela 3.4: Resumo geral dos parâmetros mais relevantes.

Parâmetro	Mínimo	Máximo	Média
<b><i>NSM</i></b>			
$f_c$ (MPa)	22,93	52,80	39,63
$f_{fu}$ (MPa)	347,00	3697,00	2282,89
$E_f$ (GPa)	36,70	254,08	151,86
$\varepsilon_{fu}$ (MPa)	6,55	28,60	15,21
$\rho_s$ (%)	0,19%	1,57%	0,71%
$\rho_f$ (%)	0,01%	1,07%	0,13%
<b><i>EBR</i></b>			
$f_c$ (MPa)	20,7	55,80	35,61
$f_{fu}$ (MPa)	724,00	4900,00	2958,67
$E_f$ (MPa)	41,80	270,00	188,35
$\varepsilon_{fu}$ (MPa)	6,40	28,60	15,40
$\rho_s$ (%)	0,19%	1,71%	0,67%
$\rho_f$ (%)	0,02%	0,69%	0,17%

Os parâmetros dos materiais (concreto, armadura e FRP) foram registrados com seus valores médios informados pelos autores, quando houve ensaios de qualificação desses materiais. Em alguns trabalhos, foi informado especificações apresentadas pelos fabricantes (aço e FRP). O módulo de elasticidade do concreto, quando não informado pelos autores, foi registrada com seu valor determinado de acordo com o especificado pela norma americana ACI 318 (2019).

Uma informação importante que também foi extraída do banco de dados, é o incremento de resistência do elemento, que representa o aumento da capacidade resistente da viga por meio da aplicação do reforço com FRP. Para isso são usados elementos de referência (sem reforço) para comparar com os elementos reforçados, ao utilizar como parâmetro a carga última

experimental ( $P_{u,exp}$ ). Vale ressaltar que tiveram trabalhos que não executaram vigas de referência, assim, algumas espécimens não terão a avaliação desse incremento de resistência.

A deformação última no FRP ( $\varepsilon_{fu,exp}$ ) medida durante a falha do elemento ensaiado, foi registrada em torno de 40% das espécimens totais. Alguns trabalhos não realizaram a medição desse parâmetro, devido algum problema durante realização dos ensaios. De forma semelhante ocorre para os modos de ruptura, nem todos os trabalhos trouxeram essa informação, alguns apresentam somente imagens ou descrições genéricas, em alguns casos, quando se havia clareza na definição do tipo de ruptura, essa era registrada, caso contrário, era desconsiderada.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. BANCO DE DADOS

A seguir é apresentado o banco de dados em função de alguns parâmetros de maior relevância, como incremento de resistência experimental, resistência à compressão do concreto, módulo de elasticidade do FRP, a relação entre área de reforço e área de armadura existente, deformação última (fabricante) do FRP, a relação entre deformação última experimental e limite (fabricante), e os modos de ruptura experimental.

A Figura 4.1 apresenta o incremento de resistência das vigas reforçadas com FRP utilizando as técnicas NSM e EBR. A análise dos dados mostra que a frequência no incremento de resistência é variável, no entanto, cerca de 75% da população de estudo apresentou incremento de resistência de até 70%. Foram observados valores experimentais de até 126% e 198%, para EBR e NSM, respectivamente. O valor médio foi de 55,8% para NSM e 43% para EBR, o que mostra uma tendência de melhor eficiência mecânica para a técnica NSM em comparação à técnica EBR, uma vez que permite suportar carregamentos últimos mais elevados.

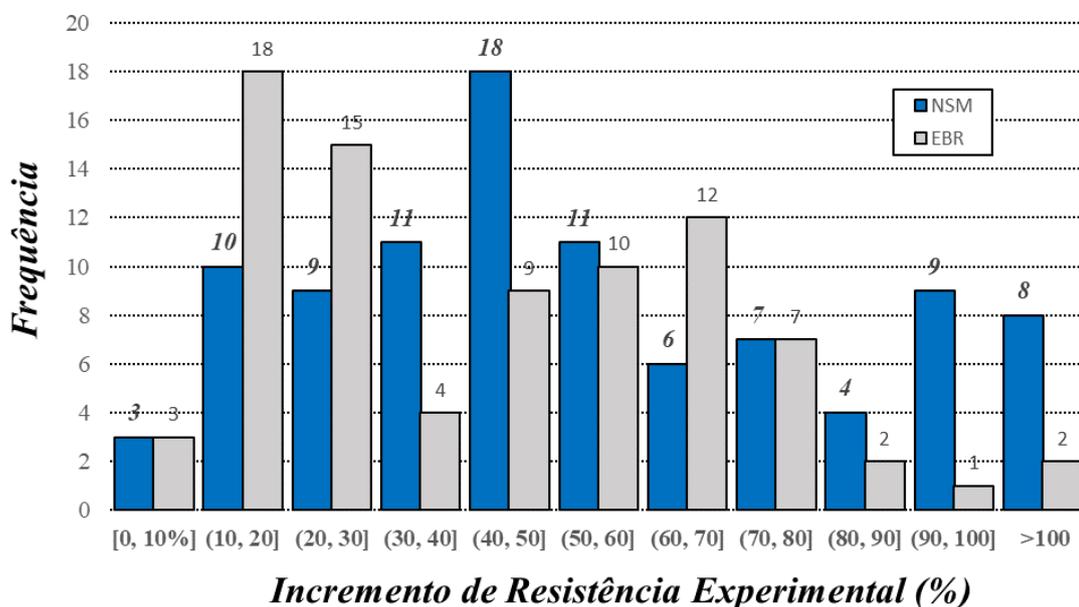


Figura 4.1: Frequência vs Incremento de Resistência Experimental

No banco de dados em estudo, foi adotado como critério o emprego de concretos com resistência à compressão entre 20 e 60 MPa. De acordo com o limite estabelecido, a Figura 4.2 indica a frequência das vigas ensaiadas para alguns intervalos de resistência à compressão. Deste modo, verifica-se que cerca de 95% dos espécimens apresentavam resistência à compressão estipulada entre 20 e 50 MPa. A maior frequência ocorre no intervalo de resistência entre 40 e 50 MPa, com 103 espécimens, o que equivale a 36% do total de vigas avaliadas.

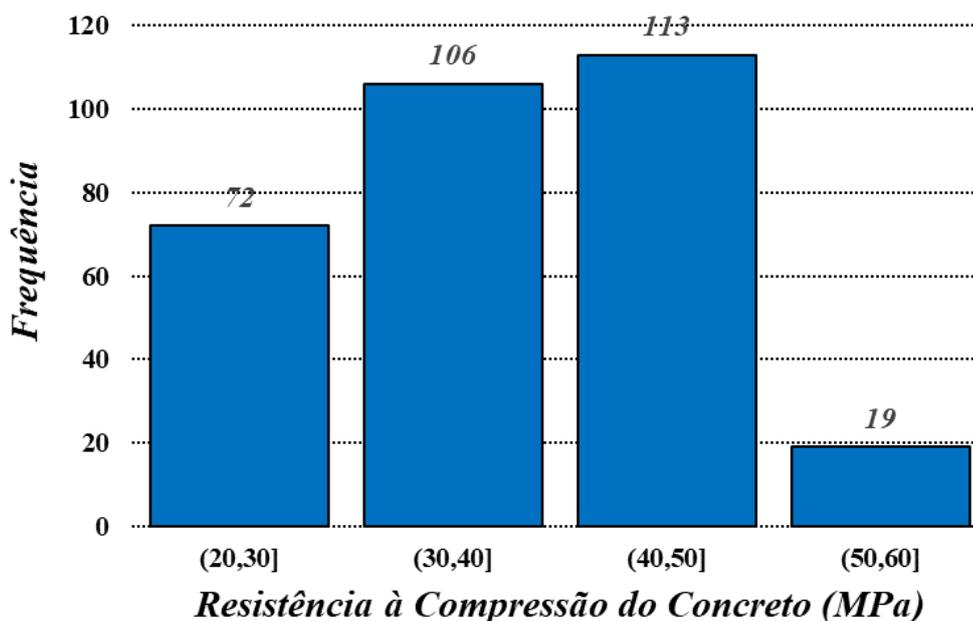


Figura 4.2: Frequência vs Resistência à compressão do concreto

Na Figura 4.3 é apontado o intervalo do módulo de elasticidade dos FRP's analisados nesta pesquisa. Observa-se uma ampla faixa de valores, com valor mínimo e máximo de 36,7 e 270 GPa, respectivamente. No entanto, 44% da população de estudo apresentava módulo de elasticidade entre 150 e 200 MPa.

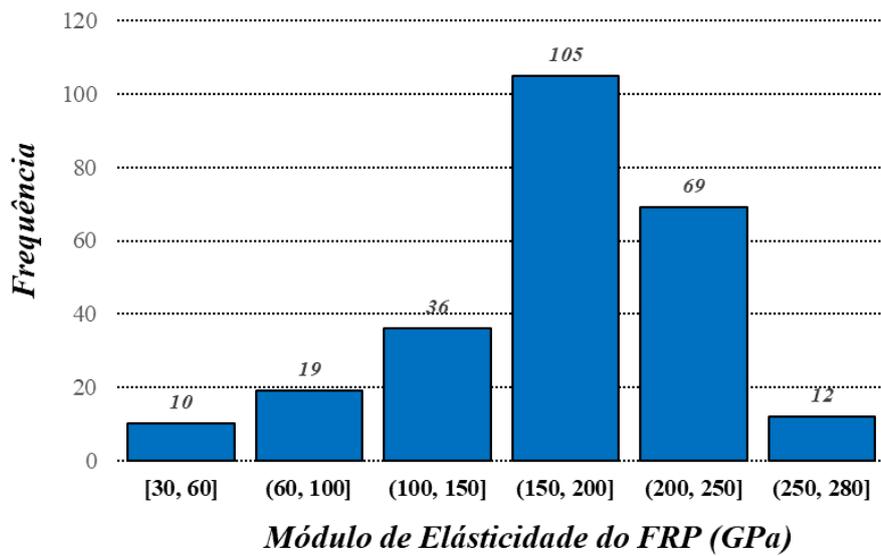


Figura 4.3: Frequência vs Módulo de elasticidade do FRP

A frequência para a relação entre área de reforço e área de armadura é mostrado na

Figura 4.4. Pode-se observar que em torno de 73% das amostras possuem relação de até 0,3, ou seja com área de reforço de até 30% da área de armadura pré-existente. A maior frequência está na relação entre 0,1 e 0,2, que representa 31% do espaço amostral estudado.

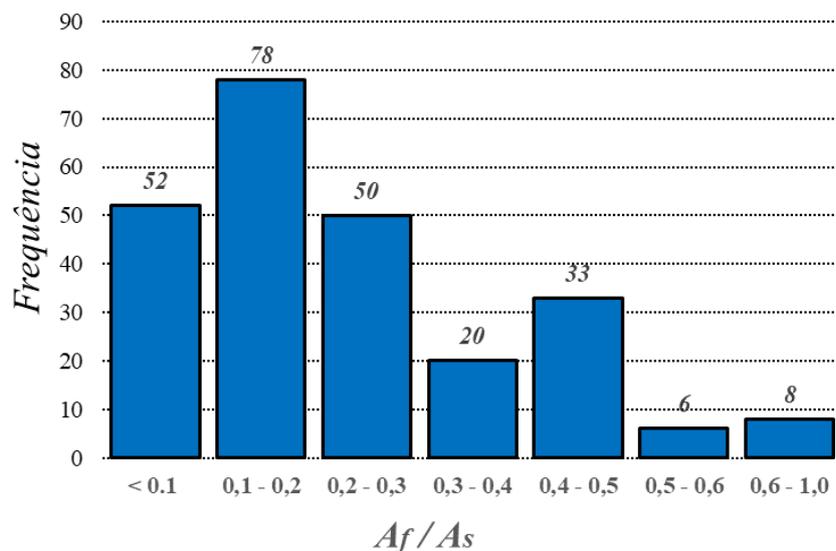


Figura 4.4: Frequência para a relação entre área de reforço e área de armadura

A Figura 5.5 exibe a distribuição da deformação última (limite informado pelo fabricante) nos FRP's utilizados no reforço das vigas presentes no espaço amostral. A menor deformação limite registrada foi de 6,4%, enquanto a maior foi de 28,6%. Em geral, 90% das espécimens avaliadas possuem elementos reforçados em FRP com deformações últimas entre 10 e 20‰, e somente 11 amostras com valores menores que 10‰.

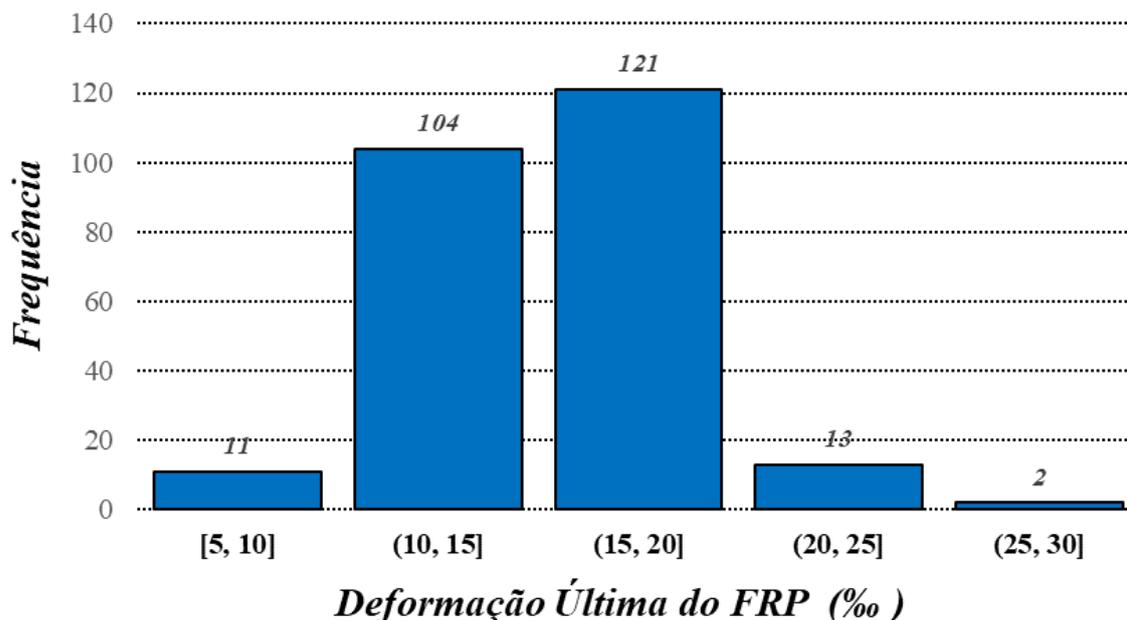


Figura 4.5: Frequência vs Deformação última do FRP

Na Figura 4.6 é exposto a relação entre os valores de deformação última medida experimentalmente e a deformação limite (informado pelo fabricante ou medido experimentalmente), para as espécimens reforçadas por meio da técnica NSM e EBR.

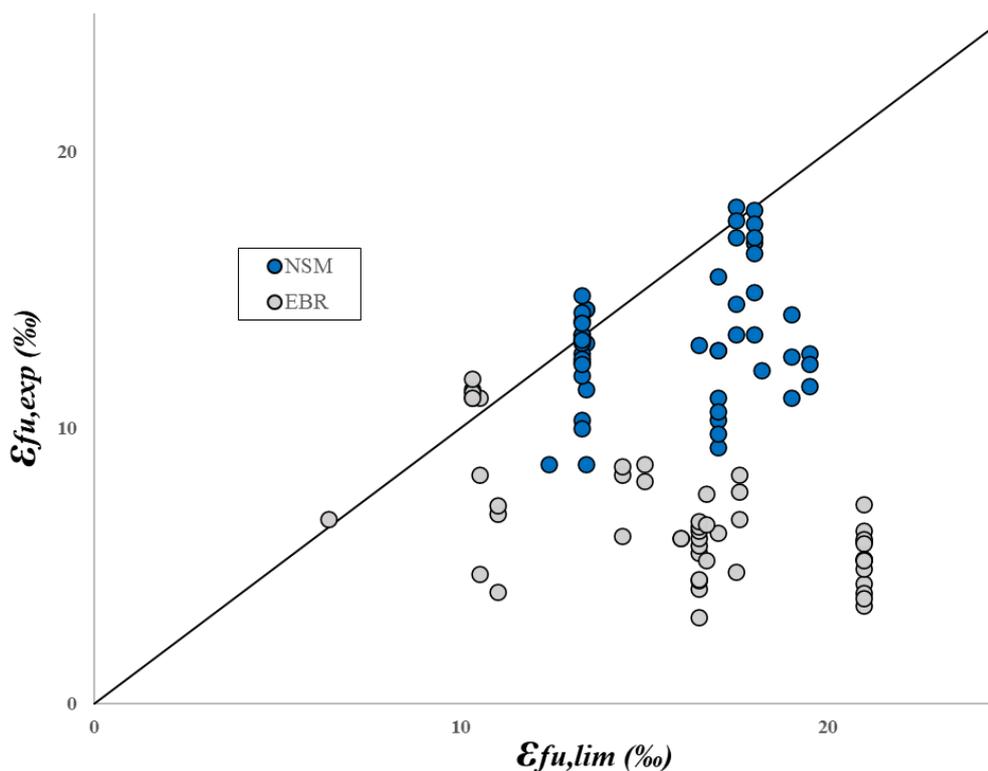


Figura 4.6: Relação entre deformação experimental e deformação limite (informado pelo fabricante)

É possível notar que poucos elementos tocaram ou ultrapassaram a reta de relação unitária, isso pode evidenciar que em situações de reforço é pouco provável conseguir a mobilização total da resistência do FRP, devido a ocorrência de modos de ruptura prematuros por algum mecanismo de descolamento ou deslocamento. Adicionalmente, verifica-se uma tendência de valores mais elevados de deformação última experimental para a técnica NSM em comparação à EBR.

Para a técnica NSM esses valores se situaram em sua maioria, acima de 9%, ao contrário, os valores para deformação última experimental no FRP-EBR permanecem em sua maioria abaixo desse valor. No caso da EBR, esses resultados do banco de dados, corroboram com as indicações do *German Institute*, citado pelo *Bulletin fib* 14 (2001), onde recomendava-se limitar a deformação limite entre 6,5 e 8,5%.

Os dados indicam uma superioridade da técnica NSM, pois apresenta a possibilidade de uma maior eficiência na utilização do reforço, devido ao melhor aproveitamento do FRP por mobilizar maiores deformações no FRP antes da falha ocorrer, isso também é notado em Billota

*et al.* (2015), Barros e Dias (2007), Juvandes, Azevedo e Henriques (2012) e em Fortes, Barros e Padaratz (2002).

A Figura 4.7 apresenta a frequência dos modos de ruptura experimentais das vigas presentes no espaço amostral analisado, por meio do gráfico é possível constatar que:

- Ruptura Prematura por descolamento do FRP causado por fissuras intermediárias (RP-IC): Este foi o modo de ruptura mais comum, ocorrendo em 41% dos espécimes estudados.
- Ruptura Clássica (RC): Foi o segundo modo de ruptura mais frequente, observado em 37% das vigas ensaiadas.
- Ruptura Prematura por desprendimento da camada de cobrimento de concreto (RP-CCS): Representou 17% dos modos de ruptura encontrados na população analisada.
- Ruptura Prematura por descolamento na região de ancoragem do FRP (RP-ED): Foi o modo de ruptura menos frequente, ocorrendo em apenas 5% das vigas ensaiadas.

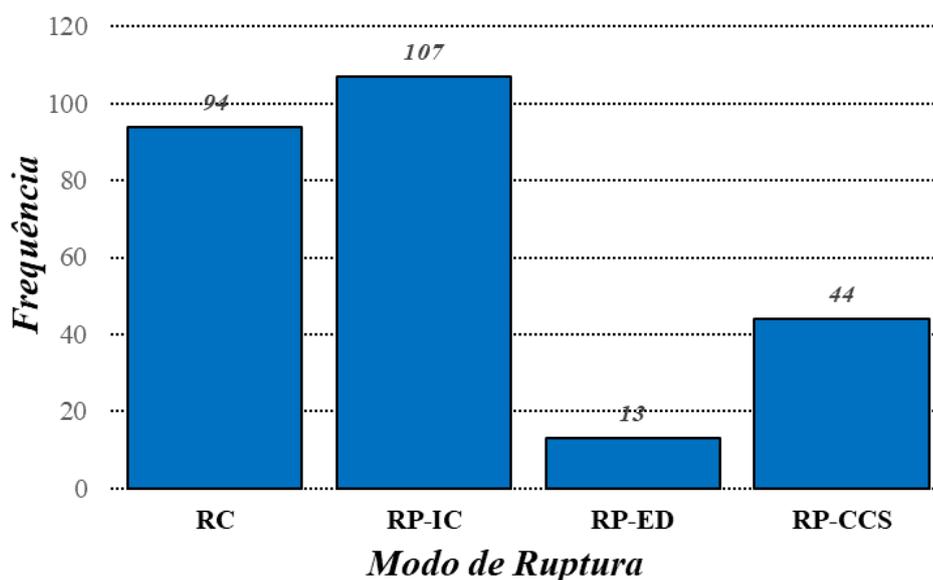


Figura 4.7: Modo de Ruptura Experimental

Assim, observa-se que dentre os modos de ruptura avaliados, 63% ocorreram de forma prematura devido descolamento do reforço, porcentagem semelhante também foi obtida por Orlando, Bittencourt e Meneghetti (2022).

## 4.2. AVALIAÇÃO DOS MODELOS DE CÁLCULO

Nessa seção são apresentados os resultados obtidos com a aplicação dos modelos de cálculo estabelecidos pelo ACI 440.2R (2017) e *Bulletin fib* 90 (2019), ao tomar como base o banco de dados desenvolvido no capítulo anterior.

O procedimento de cálculo aqui considerado leva-se em conta apenas o momento fletor resistente da seção, onde por sua vez obtém-se a carga última teórica. Salienta-se que, a resistência ao cisalhamento, normalmente envolvida em reforço à flexão simples, deve ser considerada com o mesmo rigor, no entanto, essa etapa do cálculo não faz parte do escopo desse trabalho e, portanto, não será abordada.

Nas seções seguintes serão apresentados gráficos e tabelas com os resultados obtidos pela aplicação dos modelos de cálculo. Será dada atenção aos parâmetros considerados mais importantes para a avaliação deste trabalho, como a relação entre carga última experimental ( $P_{exp}$ ) e teórica ( $P_{teo}$ ), deformação última do FRP experimental ( $\varepsilon_{f,exp}$ ) e teórica ( $\varepsilon_{f,teo}$ ), incremento de resistência nas espécimens reforçadas e o modo de ruptura.

### 4.2.1. ACI 440.2R (2017)

A avaliação do guia ACI 440.2R (2017) será baseada na ausência de influência de qualquer tipo de fator de segurança ou ajuste. Assim, os valores do fator de correção da resistência do FRP ( $\psi_f$ ) e do fator de segurança ( $\phi$ ) foram mantidos como unitários. Esta análise simula a condição típica de laboratório, onde todos os parâmetros são rigorosamente mensurados e o carregamento é aplicado de forma controlada e mantido por curto intervalo de tempo, não sendo necessário a aplicação de fatores de segurança para avaliação dos modelos de cálculo.

A Figura 4.8, apresenta a dispersão dos resultados obtidos na relação entre o valor da carga experimental e a carga teórica ( $P_{exp}/P_{ACI}$ ). Utilizou-se regressão linear simples, com a apresentação das retas de ajustes, suas equações e o valor do coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Os elementos marcados na cor azul escuro são espécimens que empregaram a técnica NSM, e na cor cinza claro os elementos que empregaram EBR, a reta em linha contínua representa a relação unitária entre os parâmetros, valores acima indicam previsões a favor da segurança e valores abaixo dessa reta indicam pontos contrários a segurança.

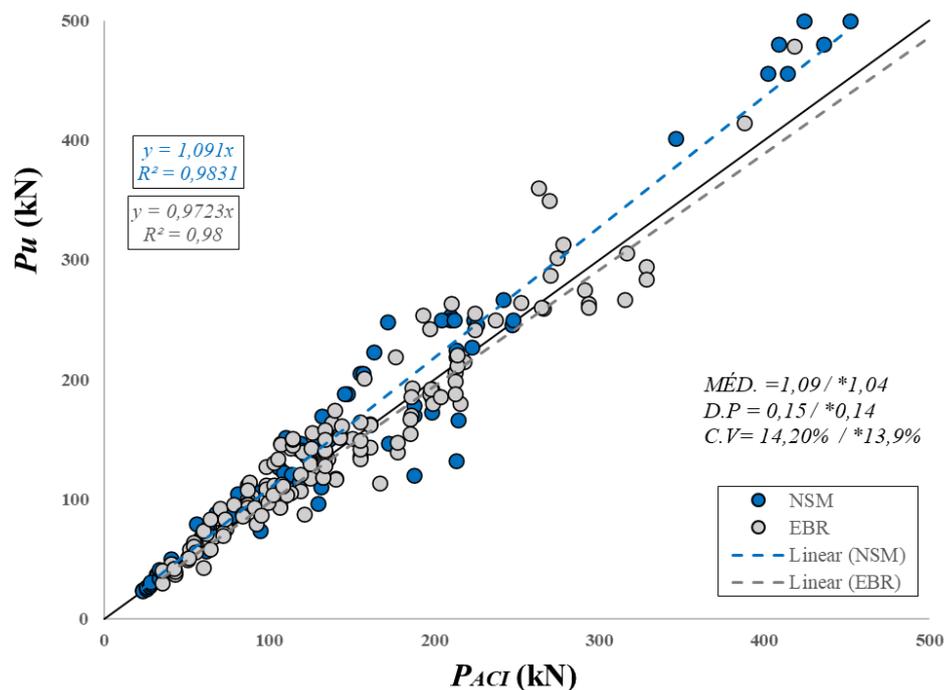


Figura 4.8: Dispersão dos resultados para a relação entre a carga última experimental e teórica

Para a relação  $P_{exp}/P_{ACI}$ , o ACI 440 resultou em valores médios de 1,09 para o sistema NSM e 1,04 para EBR, com desvio padrão de 0,15 e 0,14, respectivamente, e coeficiente de variação de 14,2% e 13,9%. Nesse último parâmetro a dispersão dos dados foi baixa e praticamente idêntica para ambas as técnicas.

As retas de ajustes, obtidas por regressão linear, indicam resultados ligeiramente mais seguros para a técnica NSM, o coeficiente de determinação  $R^2$  foi de 0,98 em ambas as técnicas. Os parâmetros estatísticos mostram que esse modelo de cálculo aplicado ao espaço amostral em análise se mostrou consistente ao objetivo de prever a resistência à flexão das vigas reforçadas com FRP, ao mostrar um bom comportamento quanto a previsão, e baixa variabilidade de resultados.

A frequência para as relações entre carga última experimental e teórica são apresentadas conforme o critério de penalidade de Collins na Figura 4.9, ao utilizar o *Demerit Points Classification* (DPC), adaptado por Neto (2013).

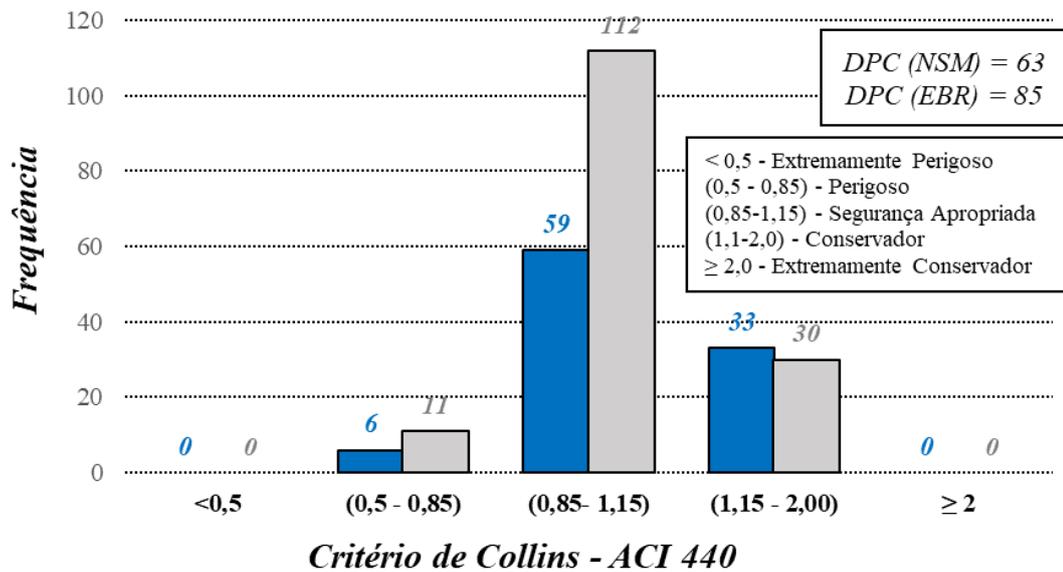


Figura 4.9: Frequência para as relações carga última experimental e teórica (ACI)

Conforme critério do DPC proposto por Collins, pode-se avaliar que 68% das amostras ficaram dentro da faixa de segurança adequada com 171 espécimens totais, sendo 59 para a técnica NSM e 112 para a técnica EBR, e menos de 7% das previsões foram classificadas em perigoso ou extremamente perigoso. Para a quantidade de dados analisados, a pontuação referente a penalidade de Collins (DPC) foi de 63 para NSM e 85 para EBR, totalizando 148 pontos para as duas técnicas.

A Figura 4.10 indica a relação entre a deformação última experimental e teórica do FRP, para as técnicas de colagem NSM e EBR. Retas de regressão linear também são apresentadas.

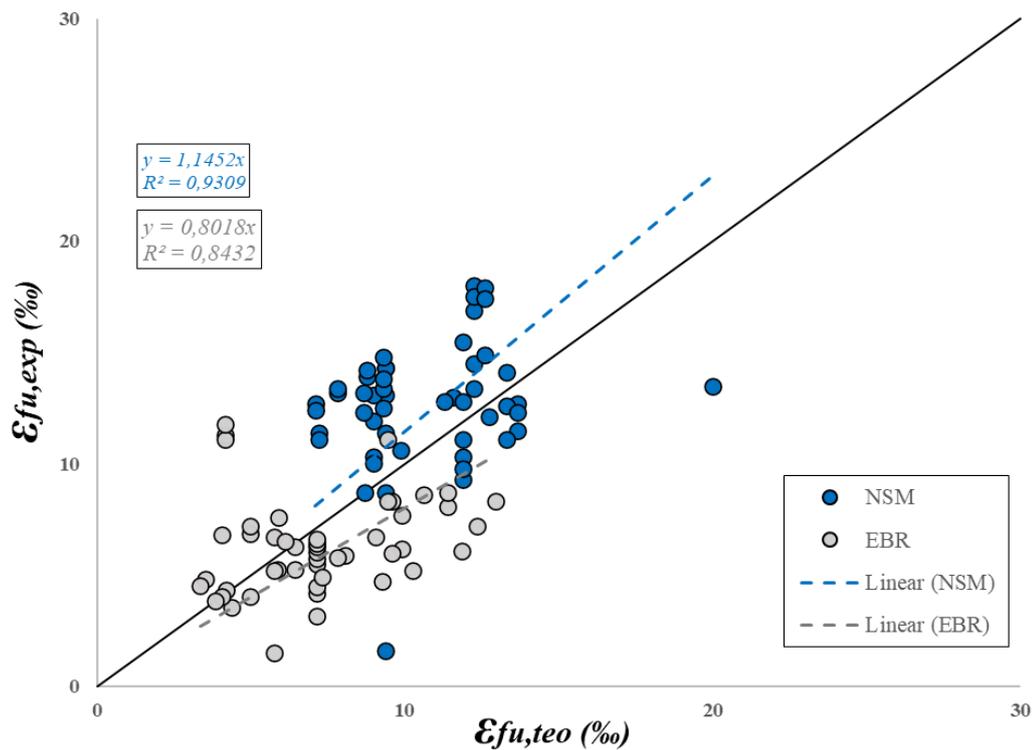


Figura 4.10: Deformação última experimental vs deformação última teórica (ACI)

A Figura 4.10 ilustra que a técnica NSM exibiu valores mais seguros em relação às estimativas das deformações últimas, com reta de ajuste superior à reta da relação unitária, existindo uma maior densidade de pontos acima desta linha. Nesse método, a maioria das espécimens obteve valores de deformação última experimental superiores a 9‰, enquanto na técnica EBR, a maioria dos valores foram inferiores a 9‰. Para a previsão da deformação última teórica, em ambas as técnicas de colagem, os valores em sua maioria ficaram inferiores a 15‰. Esse comportamento indica que o guia do ACI 440 (2017) foi mais conservador ao tratar da técnica NSM. Adicionalmente, observa-se uma maior dispersão dos dados para a técnica EBR, como evidenciado pelo coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,84 na reta de ajuste, em comparação a 0,93 da técnica NSM.

As Figuras Figura 4.11 a Figura 4.15 apresentam a relação entre o valor da carga experimental e a carga teórica ( $P_{exp}/P_{ACI}$ ) para as técnicas de colagem NSM e EBR, em função da resistência à compressão do concreto, da relação entre taxa de armadura equivalente ( $\rho_{sf}$ ) e a taxa de armadura ( $\rho_s$ ), do módulo de elasticidade do FRP, taxa de armadura existente e número de camadas de reforço.

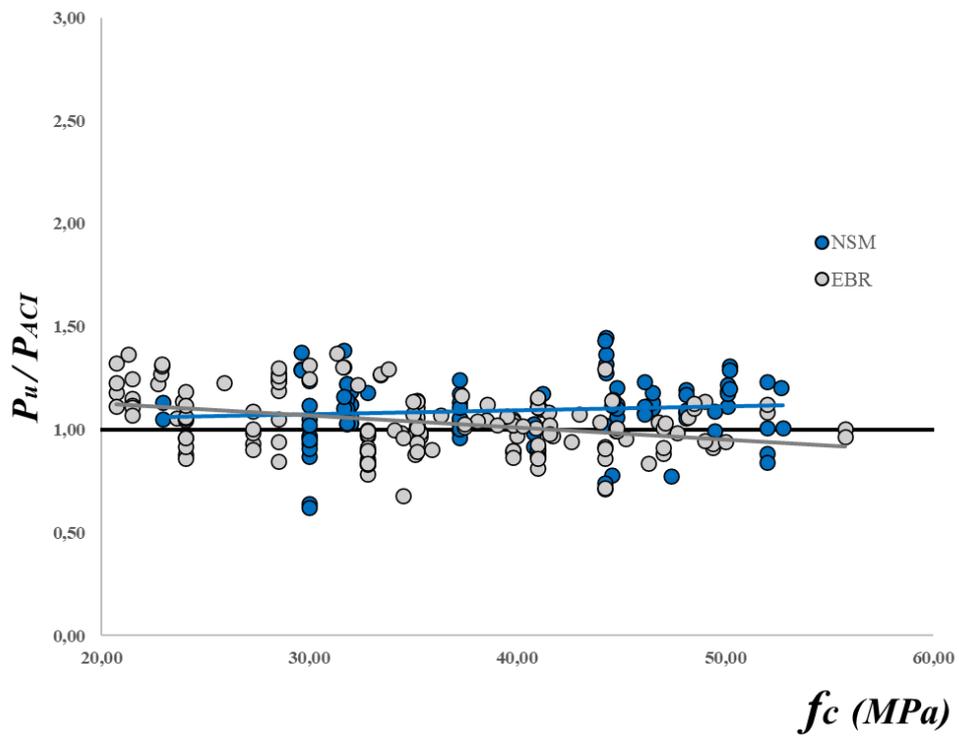


Figura 4.11: Relação carga experimental e carga teórica vs resistência à compressão do concreto

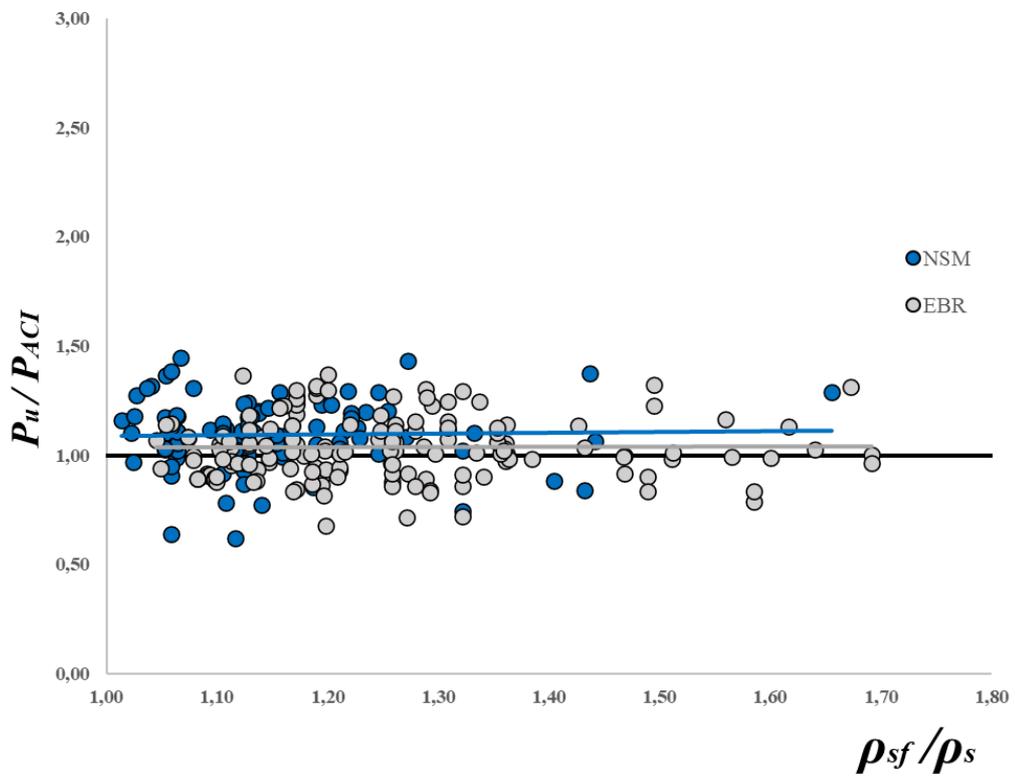


Figura 4.12: Relação carga experimental e carga teórica vs relação taxa de armadura equivalente e taxa de armadura

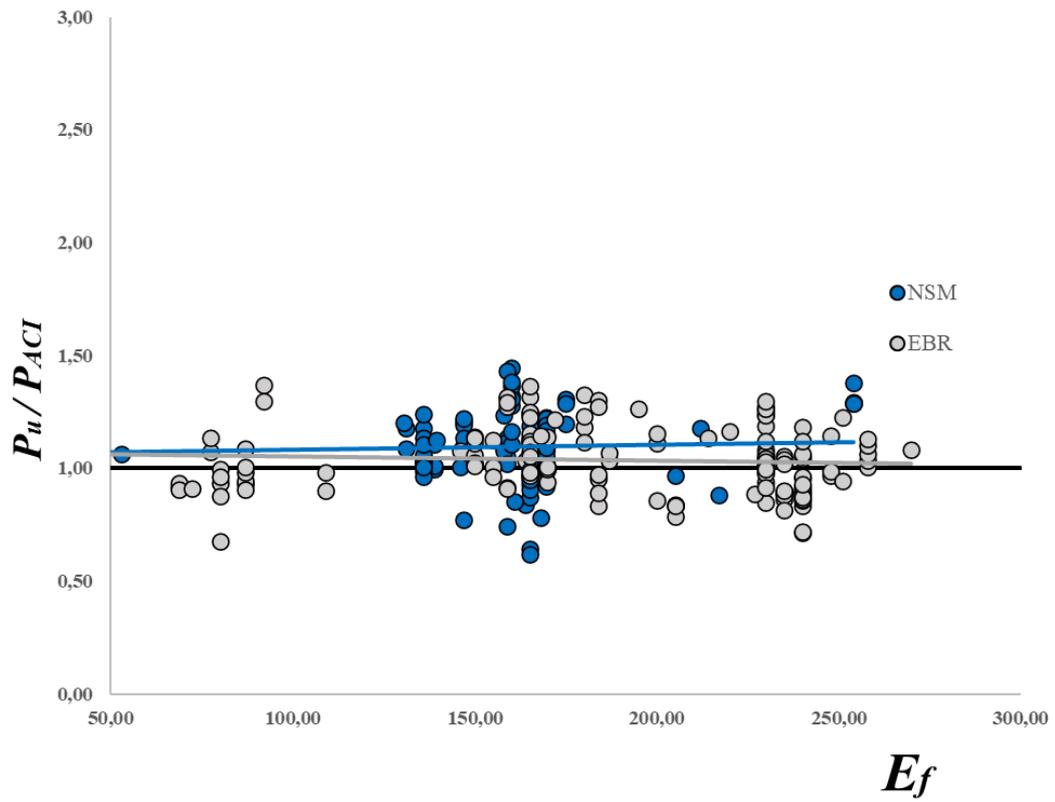


Figura 4.13: Relação carga experimental e carga teórica vs módulo de elasticidade do FRP

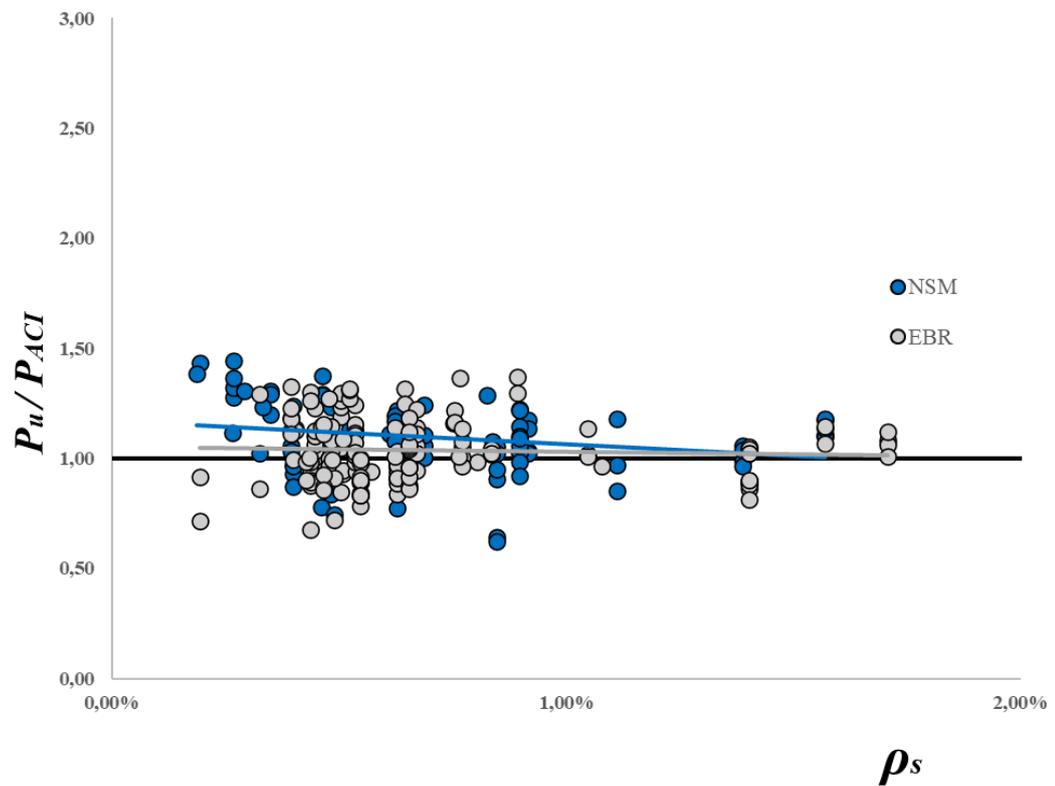


Figura 4.14: Relação carga experimental e carga teórica vs Taxa de armadura

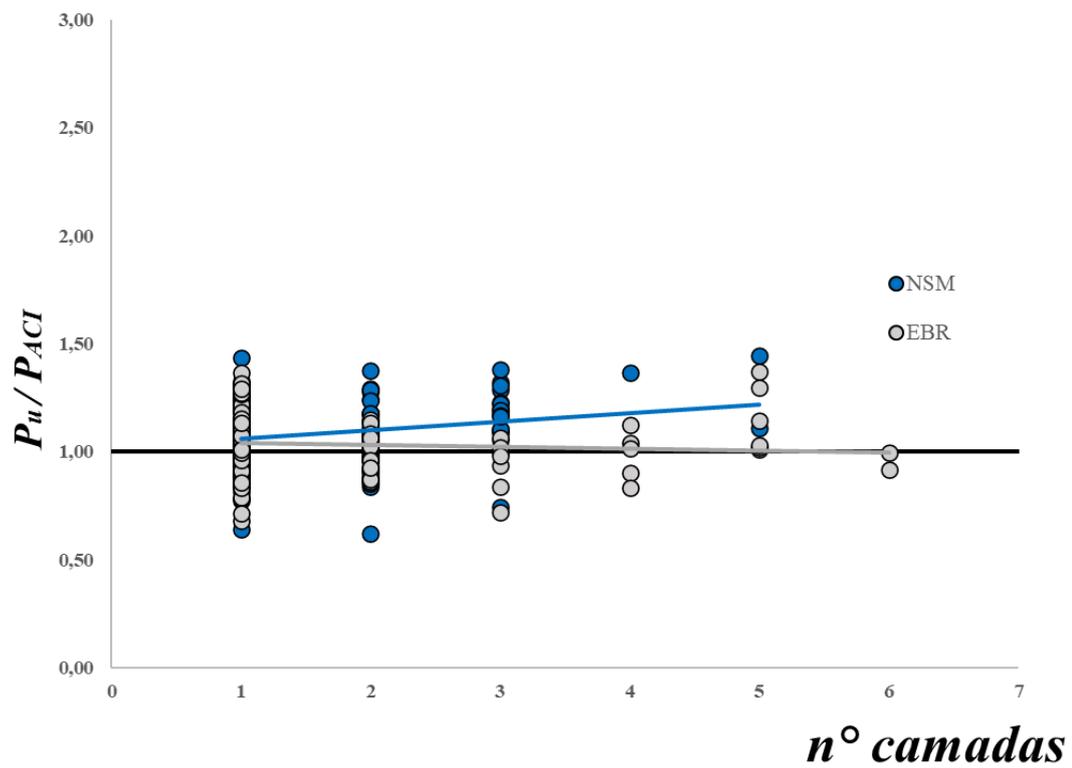


Figura 4.15: Relação carga experimental e carga teórica vs número de camadas de FRP

Nas Figura 4.16 e Figura 4.17 são apresentadas as relações unitárias em função da espessura do FRP, no caso de FRP-EBR são considerados mantas ou laminados, e para FRP-NSM são considerados laminados e barras.

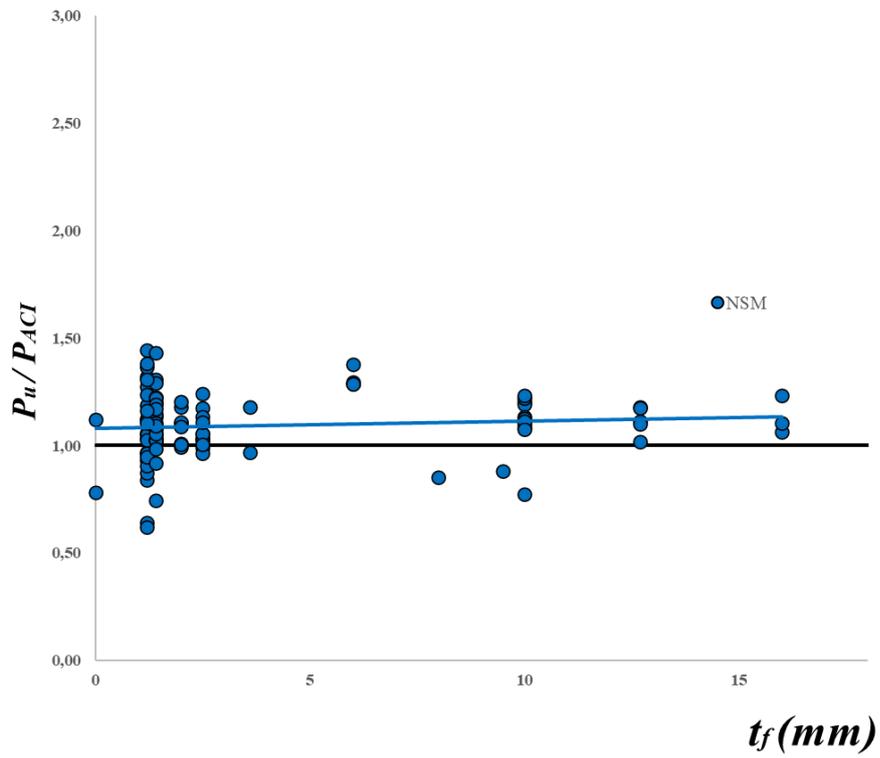


Figura 4.16: Relação carga experimental e carga teórica vs espessura ou diâmetro do FRP-NSM

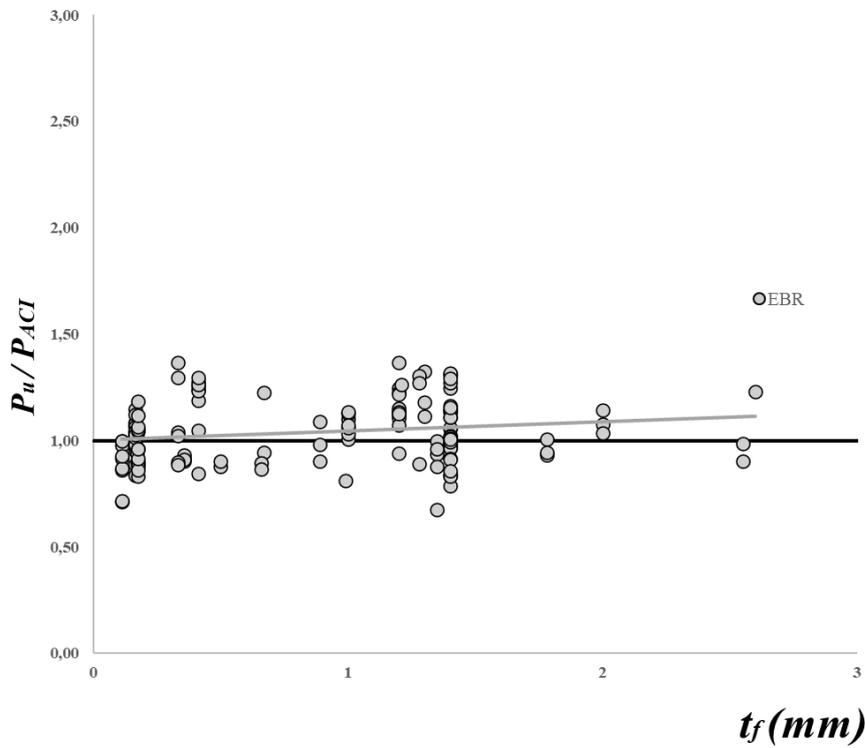


Figura 4.17: Relação carga experimental e carga teórica vs espessura do FRP-EBR

O modelo estabelecido pelo guia ACI 440 (2017), conforme observado nos gráficos anteriores, parece não sofrer alteração significativa na previsão da carga última em função da variação dos parâmetros avaliados.

A resistência a compressão do concreto não indicou nenhuma alteração significativa na previsão do modelo, com sua variação. Portanto, esse parâmetro tem pouca influência na resistência final do elemento, conforme comentado também em Kotynia (2012).

Nota-se que o reforço à flexão é notadamente mais seguro quando empregado a técnica NSM em comparação a técnica EBR, no entanto, essa diferença de eficiência parece diminuir à medida que se tem maiores valores de taxa de armadura existente ou maiores taxas equivalente de reforço, isso é observado também nos trabalhos realizado por Barros *et al.* (2007) e Beber (2003).

O número de camadas de FRP no formato de mantas ou laminados, para a técnica EBR, não demonstrou diferença significativa com o aumento do número de camadas, conforme observado também por Ferreira *et al.* (2019), onde acrescenta que esse não é necessariamente um parâmetro que deva ser penalizado na previsão da resistência última, conforme definido pelo modelo proposto no ACI 440, e evidenciado por resultados de Beber *et al.* (2000) e Bilota *et al.* (2015).

A espessura da fibra é um parâmetro importante no cálculo da deformação limite no FRP. Na avaliação pode-se notar que a espessura da fibra resultou em pouca variação na previsão da carga última. Observou-se uma tendência branda de resultados mais conservadores à medida que se utilizam espessuras mais elevadas, principalmente quando empregada a técnica EBR. Essa tendência sugere que, embora a espessura da fibra influencie a deformação limite, sua influência na previsão da carga última é mínima. No entanto, a utilização de espessuras maiores tende a fornecer margens de segurança adicionais, especialmente no método EBR, que prece ser mais sensível às variações de espessura da fibra em comparação à técnica NSM. Isso pode ser atribuído ao comportamento diferente de aderência e distribuição de tensões entre as duas técnicas de reforço.

A Figura 4.18 apresenta a frequência para os intervalos de incremento de resistência obtido com a aplicação do modelo de cálculo do ACI 440 (2017) para a técnica NSM e EBR.

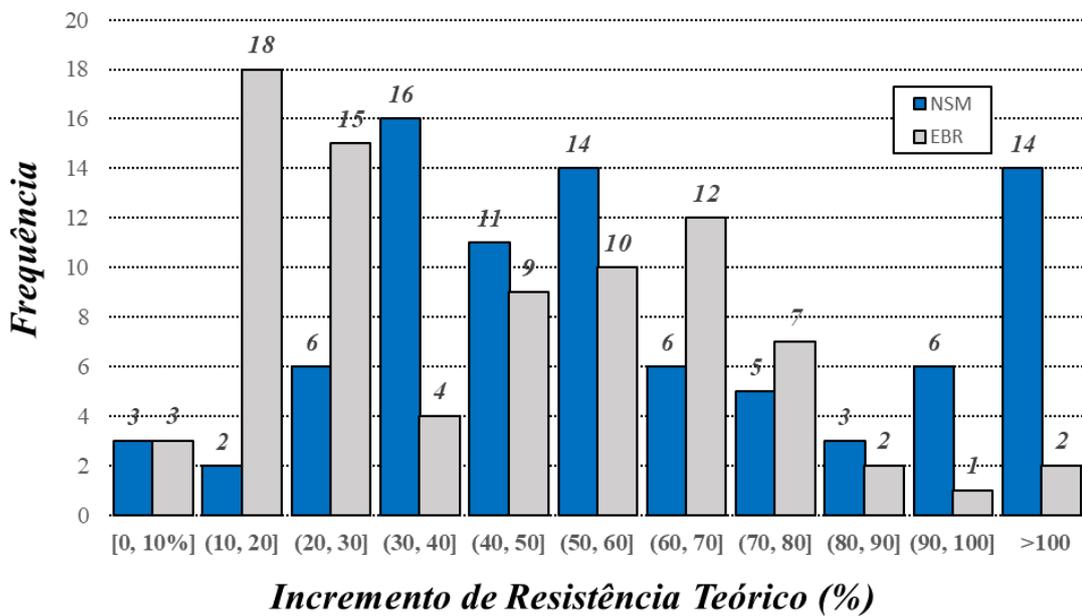


Figura 4.18: Frequência para o Incremento de Resistência Teórico

Como pode ser observado, há faixas de valores com frequência bastante variável em ambas as técnicas NSM e EBR. Apenas 16% dos dados apresentaram valores menores que 20% de incremento de resistência, enquanto pelo menos 50% das espécimens obtiveram incremento de resistência superior a 50%.

A Tabela 4.1 resume os principais resultados obtidos pela aplicação do ACI 440 no espaço amostral do banco de dados. Apresentam-se os valores mínimos, máximos, média, Desvio Padrão (DP) e Coeficiente de Variação (CV) para as relações unitárias. Esses parâmetros estatísticos fornecem uma visão abrangente da dispersão e consistência dos dados, permitindo uma avaliação mais rigorosa da eficácia das diretrizes do ACI 440 em relação às amostras analisadas.

Tabela 4.1: Resumo dos resultados para o ACI 440.2R (2017)

Parâmetro	Mínimo	Máximo	Média	DP	CV
<b>NSM</b>					
$P_{exp}/P_{ACI}$	0,62	1,45	1,09	0,15	14,2%
IR (Experimental)	6,1%	198,4%	55,8 %	-	-
IR (Teórico)	5,2%	194,4%	65,1%	-	-
$\varepsilon_{f,exp}/\varepsilon_{fu,teo}$	0,17	1,79	1,24	0,32	26,0%
Modo de Ruptura (Precisão)		16,3%			
<b>EBR</b>					
$P_{exp}/P_{ACI}$	0,68	1,37	1,04	0,14	13,9%
IR (Experimental)	5,5%	126,2%	43,0%	-	-
IR (Teórico)	7,0%	137,0%	61,3%	-	-
$\varepsilon_{f,exp}/\varepsilon_{fu,teo}$	0,26	2,84	0,99	0,53	53%
Modo de Ruptura (Precisão)		60,8%			

A relação ( $P_{exp}/P_{ACI}$ ) e ( $\varepsilon_{f,exp}/\varepsilon_{fu,teo}$ ) apresenta resultados favoráveis a segurança para as técnicas avaliadas, com valores mais seguros para as espécimens reforçadas utilizando NSM. A dispersão dos resultados para a relação da carga última é baixa, com desvio padrão de 0,15 e 0,14 para NSM e EBR, respectivamente, e coeficiente de variação de 14% em ambas as técnicas.

Para a relação envolvendo a deformação última no espaço amostral avaliado, foi demonstrado menor dispersão para a técnica NSM, com desvio padrão de 0,32 e coeficiente de variação de 26%, esse último parâmetro apresentou variação de 53% para a técnica EBR. Esta maior dispersão nos valores previstos para a deformação última teórica também foi observada por Orlando, Bittencourt e Meneghetti (2022).

Ao avaliar o incremento de resistência teórico obtido com o ACI 440 (2017), observa-se que os valores máximos teóricos e experimentais para a técnica NSM e EBR ficaram bastante próximos. Para a técnica EBR, o valor máximo teórico foi de 137%, enquanto o valor experimental foi de 126,2%. Em média, obteve-se um incremento de resistência de 65,1% para NSM e 61,3% para EBR.

O modo de ruptura teórico e experimental também foram avaliados e comparados. Quando a previsão teórica coincidia com a experimental, era contabilizado um acerto. Dessa

forma, obteve-se uma taxa de acerto de 16,3% para a técnica NSM e 60,8% de precisão para a técnica EBR. Nesse modelo de cálculo não foi considerado a verificação da ruptura por CCS.

### 4.3. Bulletin fib 90 (2019)

A avaliação do *Bulletin fib 90* (2019) é semelhante à realizada para o ACI 440 (2017), e será baseada na ausência de qualquer tipo de fator de segurança ou ajuste. É realizado o cálculo a flexão, para se obter o momento resistente da seção e assim a carga última, ao limitar a deformação na camada de FRP a fim de evitar rupturas prematuras, dessa forma pode-se identificar rupturas prematuras (RP-IC ou RP-ED) ou clássicas (RC ou RF). A ruptura por descolamento da camada de cobertura de concreto (RP-CCS) é realizada à parte, pois envolve cálculos baseados na resistência ao cisalhamento do concreto, e, portanto, a carga última vem por meio da força cortante máxima no elemento, nesse caso é utilizado o modelo proposto por Jansze (1997).

A Figura 4.19 apresenta a dispersão dos resultados obtidos na relação entre o valor da carga experimental e a carga teórica ( $P_{exp}/P_{fib}$ ). Foi utilizado regressão linear simples, com a apresentação das retas de ajustes, suas equações e o valor do coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Os elementos marcados na cor azul são espécimens que empregaram a técnica NSM, e na cor cinza os elementos que empregaram EBR, a reta em linha contínua representa a relação unitária entre os parâmetros, pontos acima indicam previsões a favor da segurança e valores abaixo dessa reta indicam pontos contrários a segurança.

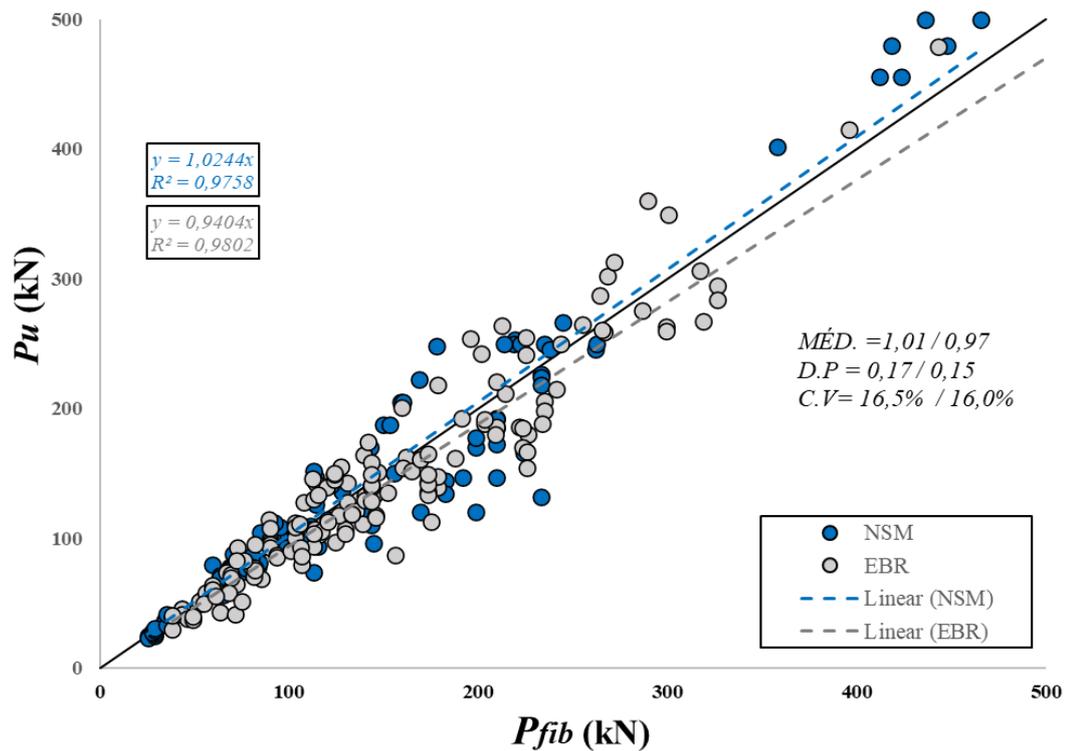


Figura 4.19: Dispersão dos resultados para a relação entre a carga última experimental e teórica

Para a relação  $P_{exp}/P_{fib}$ , o *Bulletin fib* 90 (2017) resultou em valores médios de 1,01 para o sistema NSM e 0,97 para EBR, com desvio padrão de 0,17 e 0,15, respectivamente, e coeficiente de variação de 16,5% e 15,9%. A dispersão dos dados também foi baixa e praticamente idêntica para ambas as técnicas. No entanto, o modelo do *Bulletin fib* 90 (2017) mostrou-se menos conservador que o ACI 440 (2017) e apresentou maior dispersão dentro do espaço amostral analisado.

As retas de ajustes, obtidas por regressão linear, indicam resultados ligeiramente mais seguros para a técnica NSM, o coeficiente de determinação  $R^2$  de 0,97 para NSM e 0,98 para EBR. Esses parâmetros estatísticos indicam que o modelo de cálculo demonstrou consistência na previsão da resistência à flexão das vigas reforçadas com FRP, mostrando um bom comportamento quanto a previsão, e baixa variabilidade de resultados.

A frequência das relações entre carga última experimental e teórica é apresentada conforme o critério de penalidade de Collins na Figura 4.9, usando o *Demerit Points Classification* (DPC), adaptado por Moraes Neto (2013).

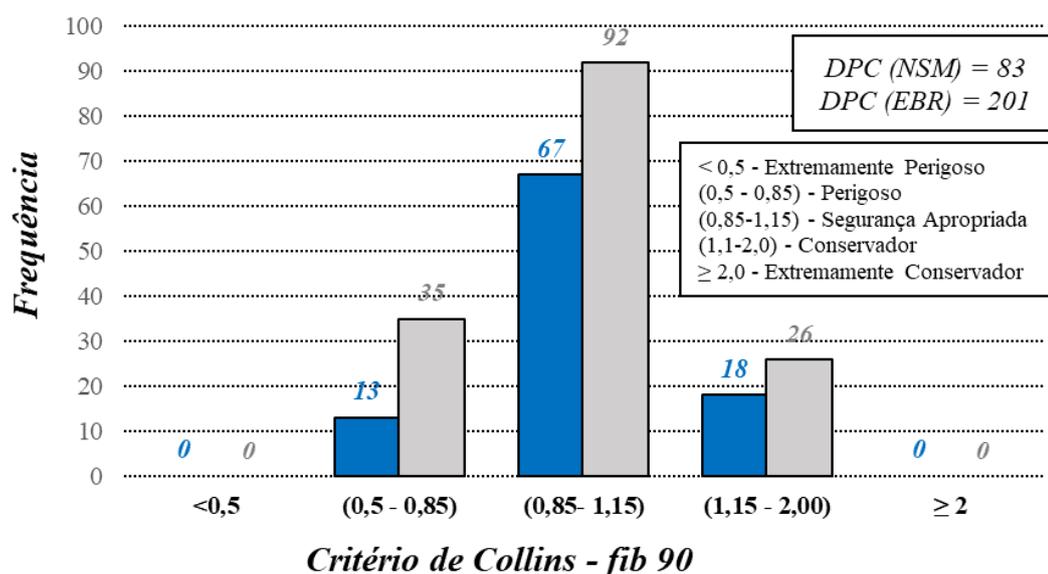


Figura 4.20: Frequência para as relações carga última experimental e teórica (*fib*)

Conforme critério do DPC proposto por Collins, pode-se avaliar que 63% das amostras ficaram dentro da faixa de segurança adequada com 159 espécimens, sendo 57 para a técnica NSM e 92 para a técnica EBR. No entanto, pelo menos 19% das previsões foram classificadas como perigosas. Para a quantidade de dados analisados, a pontuação referente à penalidade de Collins (DPC) foi de 83 para NSM e 201 para EBR, totalizando 284 pontos para as duas técnicas.

Em resumo, a avaliação por esse critério demonstra que a técnica NSM possui uma pontuação de penalidade menor em comparação com a técnica EBR, indicando uma maior segurança e eficiência desse modelo de cálculo quando aplicado a técnica NSM. No entanto, a presença de uma porcentagem significativa de previsões classificadas como perigosas, principalmente para a técnica EBR, ressalta a necessidade de uma análise criteriosa e contínuas das metodologias empregadas.

A Figura 4.21 indica a relação entre a deformação última experimental e teórica do FRP, para as técnicas de colagem NSM e EBR. Retas de regressão linear têm sido apresentadas.

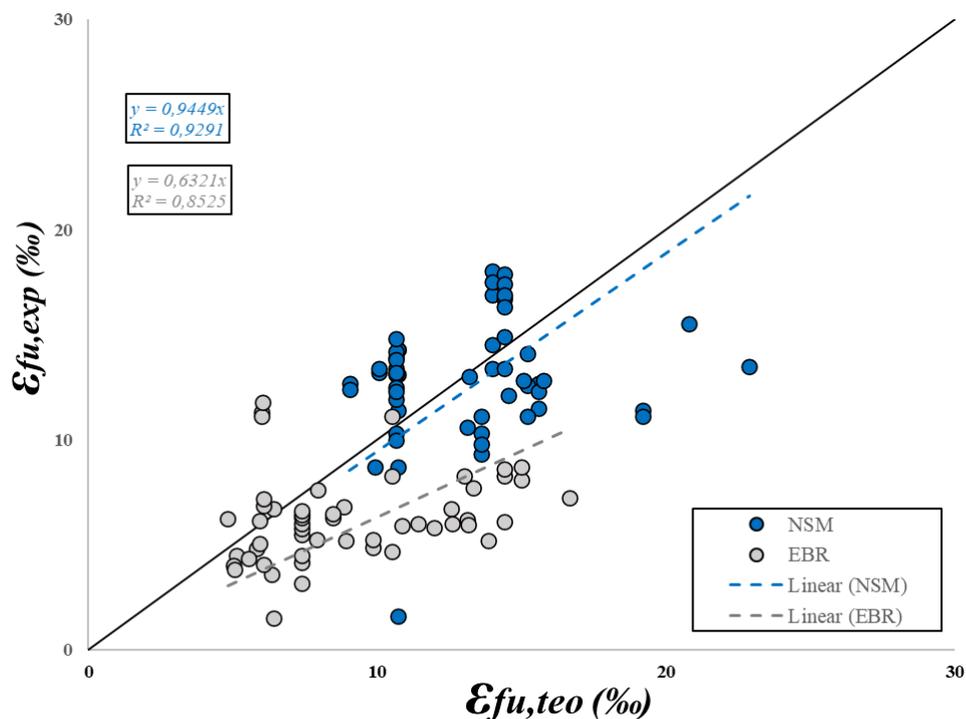


Figura 4.21: Deformação última experimental vs deformação última teórica (*fib*)

A Figura 4.21 ilustra que ambas as técnicas, NSM e EBR, apresentaram tendências que comprometem a segurança na previsão da deformação última. No entanto, a técnica NSM exibiu valores ligeiramente mais conservadores, com reta de ajuste mais próxima da relação unitária. Na técnica NSM, a maioria das espécimens obteve valores de deformação última experimental superiores a 9%, enquanto na técnica EBR, a maioria dos valores foi inferior a 9%.

Para a previsão da deformação última teórica, em ambas as técnicas de colagem, os valores ficaram predominantemente abaixo de 15%. Esse comportamento indica que o *Bulletin fib* 90 (2017) foi mais conservador ao tratar da técnica NSM. Adicionalmente, observa-se uma maior dispersão dos dados para a técnica EBR, evidenciada pelo coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,85 na reta de ajuste, em comparação a 0,92 da técnica NSM.

As Figura 4.22 a Figura 4.26 apresentam a relação entre o valor da carga experimental e a carga teórica ( $P_{exp}/P_{fib}$ ) para as técnicas de colagem NSM e EBR, em função de diversos parâmetros: a resistência à compressão do concreto ( $f_c$ ), da relação entre taxa de armadura equivalente ( $\rho_{sf}$ ) e a taxa de armadura ( $\rho_s$ ), o módulo de elasticidade do FRP, taxa de armadura existente e número de camadas de reforço. Esses gráficos permitem uma análise detalhada da

eficiência e precisão das previsões teóricas em comparação com os dados experimentais, oferecendo uma visão ampla sobre o comportamento da precisão do modelo em função dos parâmetros em questão.

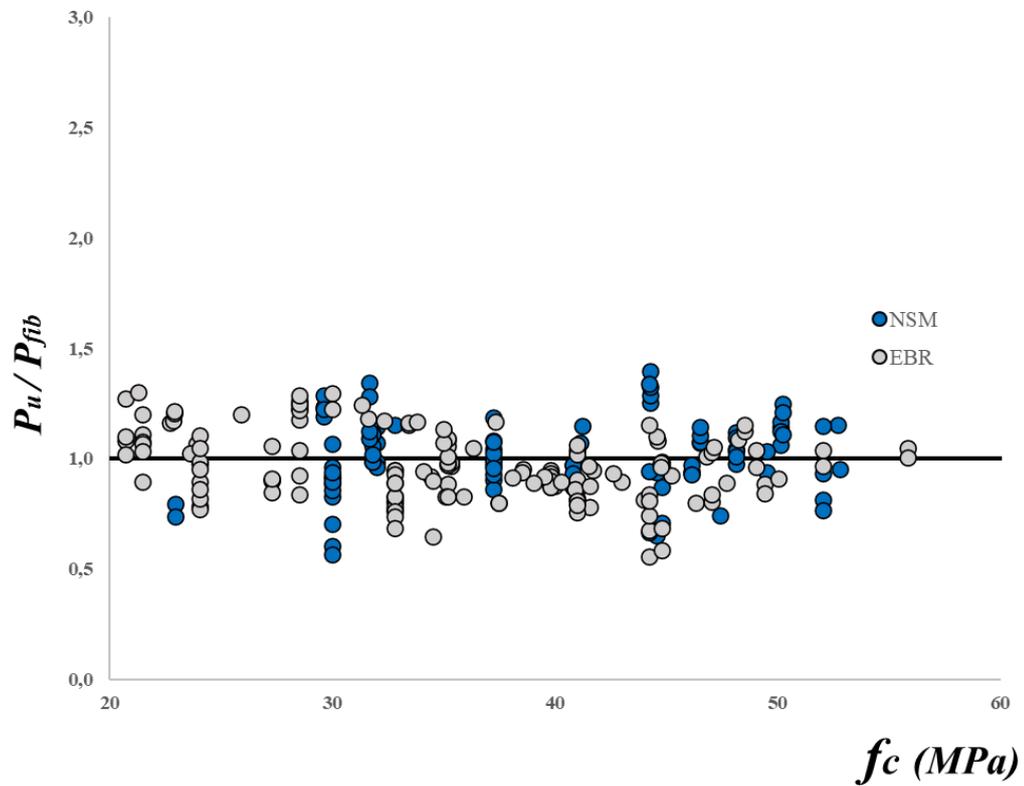


Figura 4.22: Relação carga experimental e carga teórica vs resistência à compressão do concreto

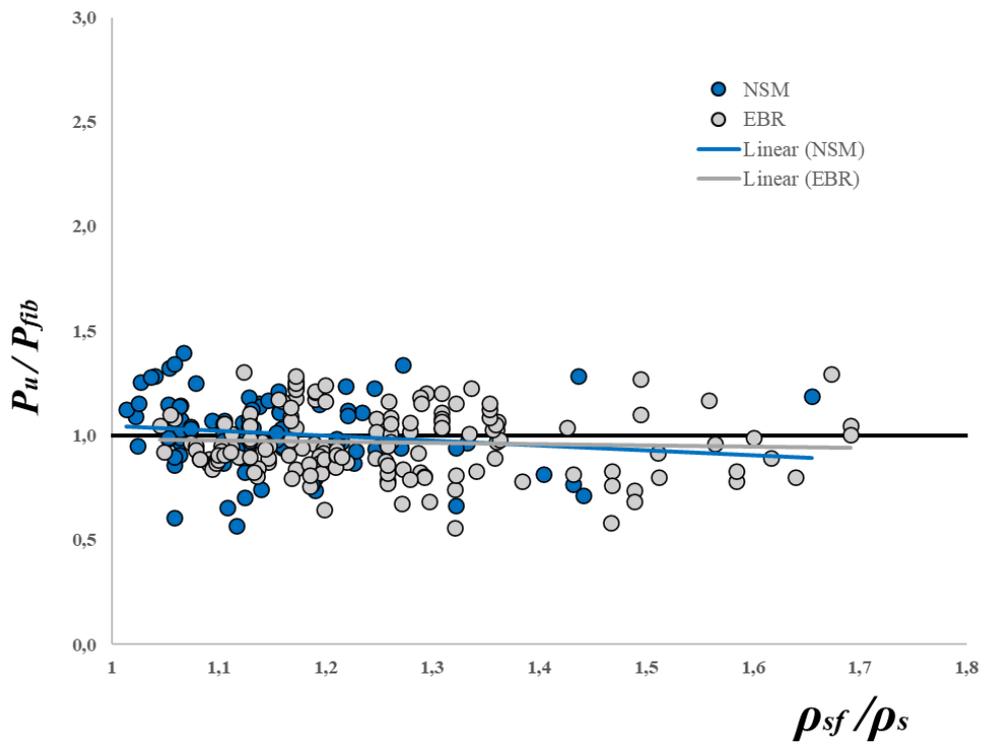


Figura 4.23: Relação carga experimental e carga teórica vs relação taxa de armadura equivalente e taxa de armadura

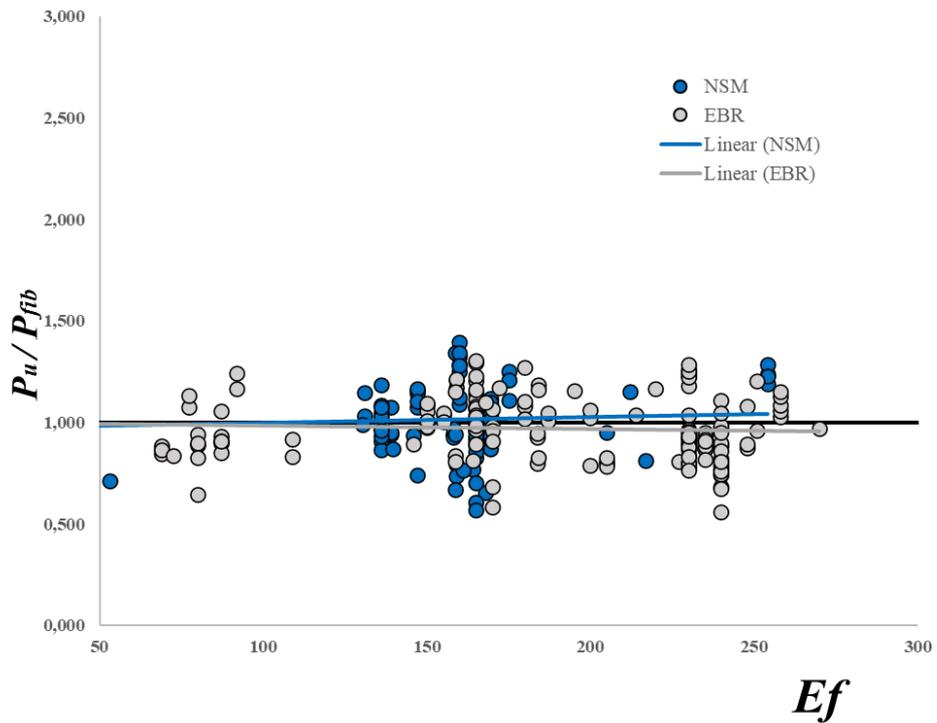


Figura 4.24: Relação carga experimental e carga teórica vs módulo de elasticidade do FRP

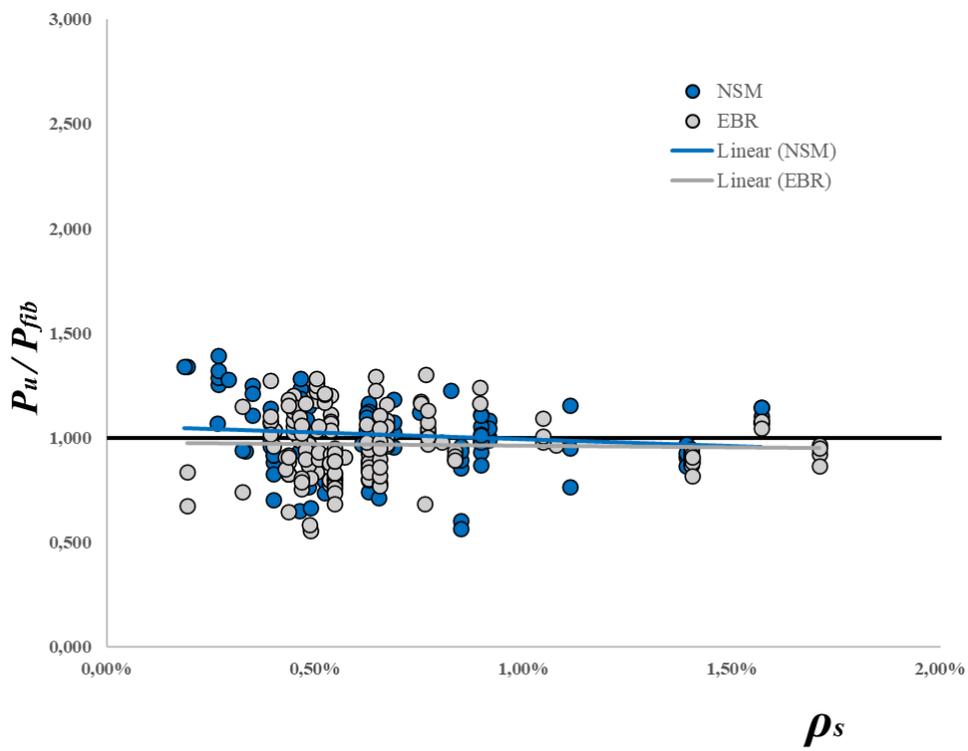


Figura 4.25: Relação carga experimental e carga teórica vs taxa de armadura

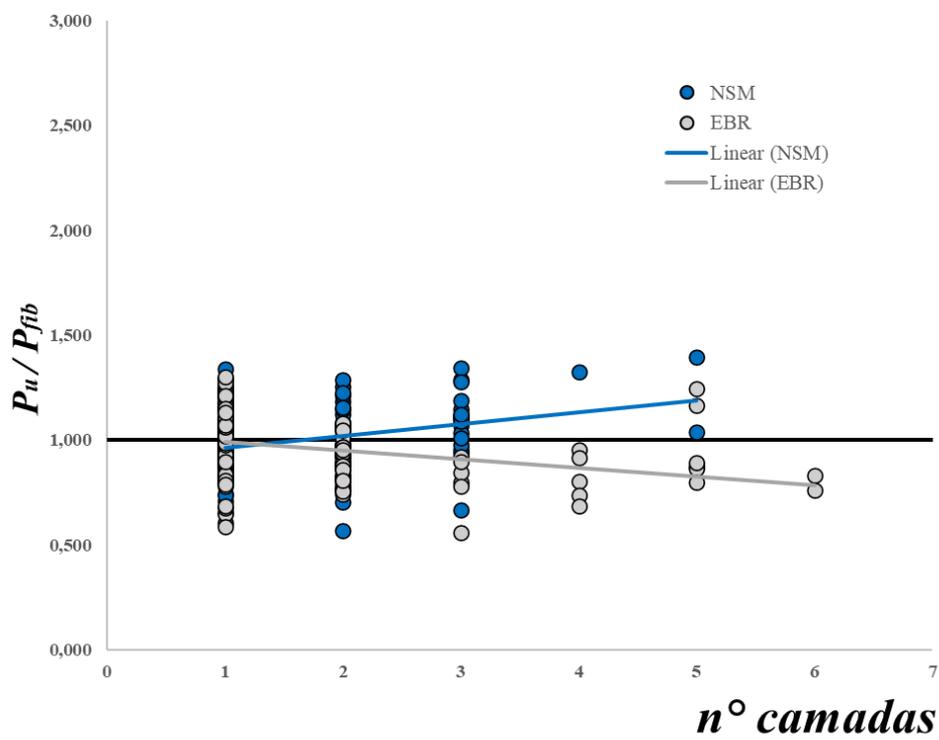


Figura 4.26: Relação carga experimental e carga teórica vs número de camadas

Nas Figura 4.27 e Figura 4.28 são apresentadas as relações unitárias em função da espessura do FRP, no caso de FRP-EBR são considerados mantas ou laminados, e para FRP-NSM são considerados laminados e barras.

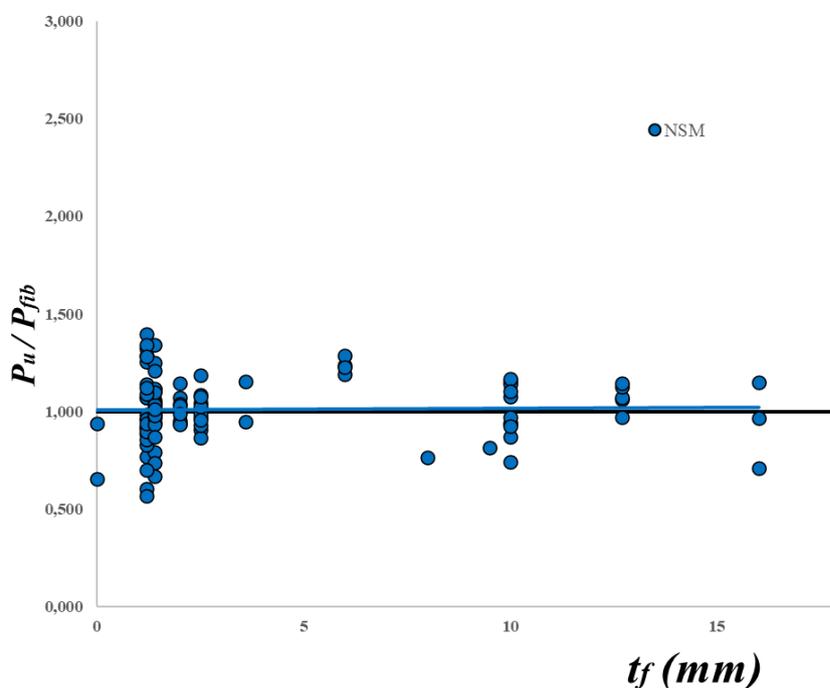


Figura 4.27: Relação carga experimental e carga teórica vs espessura ou diâmetro do FRP-NSM

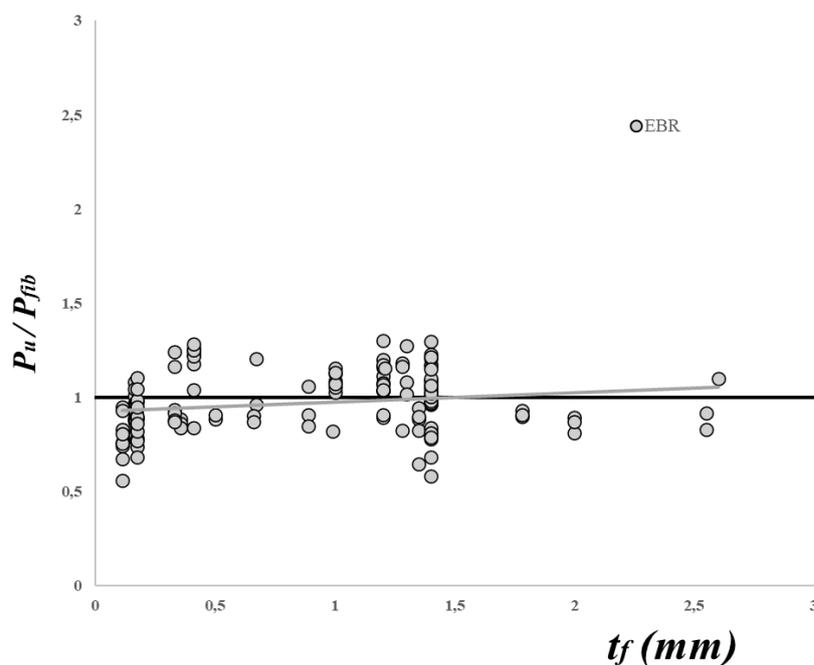


Figura 4.28: Relação carga experimental e carga teórica vs espessura ou diâmetro do FRP-EBR

O modelo estabelecido pelo *Bulletin fib 90* (2017), conforme observado nos gráficos anteriores, parece não sofrer alteração significativa na previsão da carga última em função da variação dos parâmetros avaliados. A resistência à compressão do concreto não indicou nenhuma alteração relevante na previsão do modelo, indicando que esse parâmetro tem pouca influência na resistência final do elemento.

Observa-se que o reforço à flexão é significativamente mais seguro quando empregada a técnica NSM em comparação a técnica EBR. No entanto, essa diferença de eficiência parece diminuir à medida que se aumenta a taxa de armadura existente.

O número de camadas de FRP no formato de mantas ou laminados, para a técnica EBR, não demonstrou diferença significativa com o aumento do número de camadas. Esses resultados são semelhantes aos encontrados pelo ACI 440, e observados por alguns autores citados anteriormente. Esses dados indicam que o modelo do *fib 90* é robusto e consistente na previsão da carga última, independente das variações nos parâmetros analisados.

A espessura da fibra é um parâmetro importante no cálculo da deformação limite no FRP. Na avaliação pode-se notar que a espessura da fibra resultou em pouca variação na previsão da carga última, para a técnica NSM, os valores se mantiveram estabilizados em torno da relação unitária. Observou-se uma tendência branda de resultados mais conservadores à medida que se utilizam espessuras mais elevadas quando empregada a técnica EBR, até espessuras na ordem de 1,5mm ocorre uma maior incidência de valores contra segurança, abaixo da relação unitária. Essa tendência sugere que, embora a espessura da fibra influencie a deformação limite, sua influência na previsão da carga última é mínima. No entanto, a utilização de espessuras maiores tende a fornecer margens de segurança um pouco maiores para o método EBR, que parece ser mais sensível às variações de espessura da fibra em comparação à técnica NSM. Isso pode ser atribuído ao comportamento diferente de aderência e distribuição de tensões entre as duas técnicas de reforço.

A Figura 4.29 apresenta a frequência para os intervalos de Incremento de Resistência obtido com a aplicação do modelo de cálculo do *fib 90* para a técnica NSM e EBR.

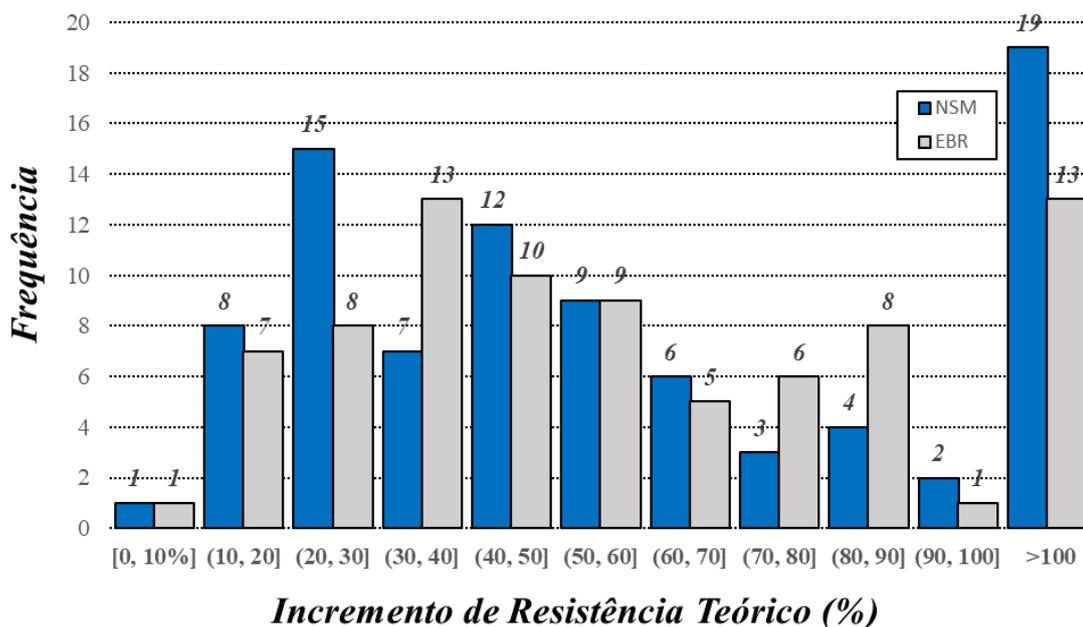


Figura 4.29: Frequência para o Incremento de Resistência Teórico

Como pode ser observado, há faixas de valores com frequência bastante variável em ambas as técnicas NSM e EBR. Apenas 7% dos dados apresentaram valores menores que 20% de incremento de resistência, e pelo menos 34% das espécimens obtiveram incremento de resistência superior a 50%.

A Tabela 4.2 resume os principais resultados obtidos pela aplicação do *Bulletin fib 90* (2017) para o espaço amostral do banco de dados. São apresentados os valores mínimos, máximos, média, desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV) para as relações unitárias. Esses parâmetros estatísticos fornecem uma visão abrangente da dispersão e consistência dos dados, permitindo uma avaliação mais rigorosa da eficácia das diretrizes do *Bulletin fib 90* (2017) em relação às amostras analisadas.

Tabela 4.2: Resumo dos resultados para o *Bulletin fib* 90 (2019)

Parâmetro	Mínimo	Máximo	Média	DP	CV
<b>NSM</b>					
$P_{exp}/P_{teo}$	0,57	1,39	1,01	0,17	16,5%
IC (Experimental)	6,1%	198,40%	55,80%	-	-
IC (Teórico)	7,63%	184,33%	62,47%	-	-
$\varepsilon_{f,exp}/\varepsilon_{fu,teo}$	0,15	1,40	1,01	0,28	27,5%
Modo de Falha s/ CCS (% Acertos)				38,78%	
Modo de Falha c/ CCS (% Acertos)				25,50%	
<b>EBR</b>					
$P_{exp}/P_{teo}$	0,56	1,30	0,97	0,15	15,9%
IC (Experimental)	5,50%	126,2%	43,0%	-	-
IC (Teórico)	5,45%	171,21%	60,60%	-	-
$\varepsilon_{f,exp}/\varepsilon_{fu,teo}$	0,23	1,96	0,77	0,36	46,8%
Modo de Falha s/ CCS (% Acertos)				59,48%	
Modo de Falha c/ CCS (% Acertos)				66,70%	

A relação ( $P_{exp}/P_{ACI}$ ) e ( $\varepsilon_{f,exp}/\varepsilon_{fu,teo}$ ) apresenta resultados com segurança adequada para as técnicas avaliadas, com valores mais conservadores para as espécimens reforçadas utilizando a técnica NSM. A dispersão dos resultados para a relação da carga última é baixa, com desvio padrão de 0,17 e 0,15 para NSM e EBR, respectivamente, e coeficiente de variação de em torno de 16%.

Para a relação envolvendo a deformação última, o espaço amostral avaliado demonstrou menor dispersão para a técnica NSM, com desvio padrão de 0,28 e coeficiente de variação de 27,5%, em comparação com 46,8% para a técnica EBR. Isso indica uma maior consistência nos resultados previstos para a técnica NSM.

Ao avaliar o incremento de resistência teórico obtido com o *fib* 90, observa-se que os valores máximos teóricos e experimentais para a técnica NSM ficaram bastante próximos. Para a técnica EBR, o valor máximo teórico foi de 171%, enquanto o valor experimental foi de 126%. Em média, obteve-se um incremento de resistência teórico de 62% para NSM e 60% para EBR.

O modo de ruptura teórico e experimental também foram avaliados e comparados. Quando a previsão teórica coincidia com a experimental, era contabilizado um acerto. Dessa

forma, obteve-se uma taxa de acerto de 38,8% para a técnica NSM e 59,5% para a técnica EBR, desconsiderando o modo de ruptura prematuro por CCS (deslocamento da camada de cobrimento de concreto). Com a consideração do modo de ruptura por CCS, a taxa de acertos caiu para 25,5% na técnica NSM e aumentou para 66,7% na técnica EBR. Esse modo de ruptura envolve avaliação do cortante máximo a ser considerado no elemento, obtendo-se a carga última de maneira distinta.

No modelo proposto por Jansze e descrito no *fib* 90, a consideração da ruptura prematura por CCS resultou em valores muito conservadores e com grande dispersão. Portanto, apenas o quantil de acertos é apresentado nas análises. Por ser um modelo simplificado, não leva em conta a contribuição das armaduras de cisalhamento (estribos), que geralmente pode gerar uma contribuição importante para mitigar a ocorrência desse modo de ruptura.

Esses resultados indicam a complexidade na previsão do comportamento de elementos reforçados com FRP e a necessidade de consideração de modelos mais abrangentes que considerem todas as variáveis envolvidas, incluindo as armaduras de cisalhamento, e outros dispositivos complementares de reforço na região de ancoragem do FRP, permitindo um dimensionamento mais eficaz e seguro das estruturas reforçadas.

#### 4.4. COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS DE CÁLCULO

Os modelos propostos pelas recomendações técnicas do *fib* 90 e ACI 440 foram avaliadas utilizando um banco de banco de dados em comum. Com propostas de cálculo distintas, esses documentos são amplamente utilizados em todo o mundo para projetar o reforço de estruturas com FRP. A seguir, são apresentados os principais resultados dos parâmetros avaliados nesta pesquisa.

Na Tabela 4.3, encontra-se os principais valores obtidos para os parâmetros avaliados nesse trabalho. São mostrados resultados para a técnica de colagem NSM e EBR, e os números obtidos para o ACI 440 (2017) e *Bulletin fib* 90 (2017).

Tabela 4.3: Resumo dos resultados – ACI 440 vs *fib* 90

Parâmetro	Valor	ACI 440.2R (2017)		<i>bulletin fib</i> 90 (2019)	
		NSM	EBR	NSM	EBR
$P_{exp}/P_{teo}$	Mínimo	0,62	0,68	0,57	0,56
	Média	1,09	1,04	1,01	0,97
	Máximo	1,45	1,37	1,39	1,30
IC (Teórico)	Mínimo	5,20	7,00	7,63	5,45
	Média	65,10	61,30	62,47	60,60
	Máximo	194,40	137,00	184,33	171,21
$\varepsilon_{f,exp}/\varepsilon_{f,teo}$	Mínimo	0,17	0,26	0,15	0,23
	Média	1,24	0,99	1,01	0,77
	Máximo	1,79	2,84	1,40	1,96
DPC	Total	63	85	83	201
Modo de Falha (% Acertos s/ CCS)	Total	16,33	60,78	38,78	59,48
Modo de Falha (% Acertos c/ CCS)	Total	-	-	25,50	66,70

De maneira geral, os resultados encontrados na análise dos modelos de cálculo estudados foram satisfatórios. Ambos os modelos, ACI 440 (2017) e *Bulletin fib* 90 (2017) apresentaram previsões seguras, com o ACI 440 (2017) mostrando uma tendência de resultados mais conservadores, especialmente para a técnica NSM, e o *Bulletin fib* 90 (2017) com tendência de resultados mais precisos.

O incremento de resistência obtidos estão alinhados com expectativas e relatos anteriores de outros autores, apresentando valores médios em torno de 60% para ambas as técnicas. A técnica NSM apresentou uma leve vantagem em relação à EBR nesse parâmetro.

A previsão da deformação última apresentou considerável dispersão, independentemente da técnica de colagem ou do modelo de cálculo adotado. Em média, os resultados para a técnica NSM mostraram-se mais seguros na previsão desse parâmetro.

Ao avaliar o DPC, observa-se que os resultados foram semelhantes entre os modelos, exceto para a previsão da carga última na técnica EBR utilizando o modelo do *Bulletin fib* 90 (2017), que apresentou mais do que o dobro do valor nas demais análises. Segundo o critério de Collins, adaptado por Moraes Neto (2013), o ACI 440 (2017) gerou mais resultados na faixa

de segurança apropriada e menos resultados na faixa considerada perigosa, sem nenhum resultado na faixa de extremamente perigoso ou extremamente conservador.

Os modos de ruptura tiveram uma previsão aceitável para a técnica EBR em ambos os modelos de cálculo. No entanto, para a técnica NSM, a taxa de acertos do modo de ruptura foi baixa, com resultados um pouco melhores quando utilizado o modelo do *Bulletin fib 90 (2017)*. A consideração da ruptura por CCS de acordo com o modelo de Jansze descrito pelo *Bulletin fib 90 (2017)*, melhorou a previsibilidade para a técnica EBR, mas reduziu o a taxa de acertos para a técnica NSM.

## 6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Este capítulo apresenta as conclusões gerais obtidas com esse trabalho, e uma breve avaliação dos modelos de cálculos analisados. As conclusões e recomendações para trabalhos futuros são apresentadas nos itens seguintes.

### 6.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

No desenvolvimento desse trabalho foi possível construir um banco de dados abrangente com resultados experimentais de 324 vigas em seção retangular ou T. Desse total, 112 vigas foram reforçadas à flexão com a técnica NSM e 147 com a técnica EBR. Foram consideradas FRP's no formato de mantas, laminados e barras, fabricados em fibra de vidro (GFRP) ou fibra de carbono (GFRP), provenientes de 47 trabalhos de pesquisas realizados entre 2000 e 2024. Entre esses, 8 trabalhos foram conduzidos no Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília (Labest-UnB), com 29 espécimens FRP-NSM e 17 FRP-EBR.

Ao utilizar os parâmetros do banco de dados, foi realizado uma análise teórica dos modelos presentes no guia ACI 440.2R (2017) e no *Bulletin fib* 90 (2019), e seus resultados foram comparados. De maneira geral, o objetivo de analisar o comportamento dos modelos frente aos resultados do banco de dados foi satisfatoriamente alcançado, validando o comportamento desses modelos, conforme já era esperado, dada a grande relevância técnica desses guias. Esses documentos servem de base para diversos outros textos, normas e recomendações práticas. Foi possível comprovar que são adequados para serem aplicados em situações reais de reforço de estruturas com insuficiência de resistência à flexão. Com os devidos fatores de segurança e coeficientes de redução, os modelos ficariam ainda mais conservadores.

A previsão da carga última e do incremento de resistência foram estimados com boa precisão pelos modelos analisados. Ambos os modelos, ACI 440.2R (2017) e *Bulletin fib* 90 (2017), apresentaram previsões seguras para a carga última, com o ACI 440.2R (2017) tendendo a resultados mais conservadores, com valor médio na relação  $P_{exp}/P_{ACI}$  de 1,09 e 1,04 para NSM e EBR, respectivamente. O *Bulletin fib* 90 (2017) proporcionando previsões mais precisas, com relação  $P_{exp}/P_{fib}$  mais próximas da unidade, sendo 1,01 para NSM e 0,97 para EBR. Esse parâmetro também apresentou baixa variabilidade, indicando resultados homogêneos, com coeficiente de variação na ordem de 14% para o ACI 440 e 16% para *fib* 90.

No entanto, a previsão do modo de ruptura foi abaixo do esperado, com previsibilidade pouco eficiente para a técnica NSM. Apenas o modelo do *Bulletin fib 90* (2017) teve uma precisão ligeiramente melhor. A previsão do modo de ruptura em elementos reforçados com FRP é um tema complexo que envolve a avaliação precisa de diversos fatores. Atualmente, existem vários modelos que buscam prever a carga última que gera a falha prematura, mas precisam ser considerados com cautela.

Os resultados abaixo do esperado para a previsão do modo de ruptura podem ser justificados pelo grau de complexidade envolvido na avaliação dos fenômenos de descolamento do FRP. Os modelos avaliados ainda não são totalmente satisfatórios para prever com exatidão o modo de ruptura do elemento, embora apresentem bons resultados na previsão da carga última.

Os resultados indicam a necessidade de aprimoramento dos modelos normativos para melhorar a previsibilidade dos modos de ruptura em elementos reforçados com FRP. A avaliação dos fenômenos de descolamento e outros fatores complexos ainda demanda um entendimento mais profundo e modelos mais abrangentes. Apesar disso, os modelos atuais fornecem boas estimativas para a carga última e incremento de resistência, contribuindo para a segurança e eficácia do reforço de estruturas utilizando FRP's.

Em termos de precisão dos resultados, o modelo previsto pelo *Bulletin fib 90* (2019) obteve os resultados mais precisos para a carga última e deformação limite no FRP, além previsão mais precisa do modo de falha. Sob a ótica da segurança, o ACI 440 (2017) foi o que trouxe resultados mais conservadores para a previsão da carga última teórica.

Ambas as técnicas de colagem (NSM ou EBR) podem ser utilizadas de forma eficiente, cada uma apresenta vantagens e desvantagens que devem ser cuidadosamente avaliadas para cada caso durante a escolha do sistema de reforço. O reforço em FRP-NSM mostrou-se superior ao FRP-EBR em termos de incremento de resistência e maior capacidade de mobilizar deformações últimas na camada de reforço.

Ao avaliar o Critério de Collins, notou-se um valor mais expressivo na pontuação do DPC para a técnica EBR obtida com o *Bulletin fib 90* (2017), o valor médio na previsão da carga última para esse caso foi o único que ficou inferior a unidade, isso indica uma necessidade

de avaliação mais cautelosa quando empregado esse modelo de cálculo para sistemas de reforço NSM-EBR.

É importante salientar que a execução do reforço deve ser realizada com o máximo de cuidado e atenção, pois a transferência de carga entre os materiais, concreto e reforço, depende diretamente do processo de colagem. Problemas durante a execução ou ancoragem inadequada do reforço podem desencadear rupturas prematuras, que tendem a diminuir drasticamente a resistência do elemento e gerar falhas catastróficas.

Por fim, utilizar materiais compósitos como os FRP's pode ser uma escolha interessante frente a diversas situações de reforço estrutural, especialmente quando se deseja realizar intervenções com o mínimo impacto estético ou em condições ambientais severas, desfavoráveis ao uso de materiais metálicos. Além disso, o uso desse sistema apresenta uma ótima relação entre resistência e peso próprio.

## 6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

É apresentado a seguir, alguns temas sugeridos para dar continuidade nas pesquisas envolvendo o reforço em elementos em concreto armado submetidos a flexão e reforçados com materiais compósitos.

- Avaliar o banco de dados por meio de estudo estatístico mais rigoroso, fazendo uma análise paramétrica dos parâmetros mais importantes, como taxa de armadura, taxa de reforço e tipo de fibra.
- Comparar mais modelos de cálculo para previsão dos modos de ruptura prematura, em elementos que falharam por *End Debonding*, *Concrete Cover Separation* e *Intermediate Crack Debonding*.
- Realizar análise numérica por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF), avaliando as técnicas de colagem NSM e EBR, comparando com resultados experimentais.
- Executar ensaios experimentais usando a técnica de colagem NSM em conjunto com dispositivos de ancoragem aderidos por meio da técnica EBR.
- Testar a aplicação de reforço estrutural em FRP-NSM e FRP-EBR em substratos reconstruídos com concreto de alta resistência.

- Avaliar espécimens reforçadas com ambas as técnicas de colagem, usando fibra de aramida (AFRP), e comparar com as previsões normativas.
- Comparar as técnicas de colagem em elementos estruturais inseridos em ambientes de alta agressividade ambiental.
- Fazer a aplicação de reforço em elementos sob carregamento, e testar a eficiência em ambas as técnicas de colagem.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDALLAH, Mohammad *et al.* Efficiency of EB CFRP composites for flexural strengthening of continuous RC beams: A comparative study with NSM CFRP rods. In: Structures. Elsevier, 2021. p. 1567-1588.

ABDULJABBAR, Marwah S.; ABDULSAHIB, Wael S. Flexural Performance of Concrete Beams Reinforced with Hybrid FRP-Steel Bars: A mini review. Engineering and Technology Journal, v. 41, n. 05, p. 619-628, 2023.

AFZAL, Muhammad *et al.* Reinforced concrete structural design optimization: A critical review. Journal of Cleaner Production, v. 260, p. 120623, 2020.

AL-JELAWY, H. Experimental and numerical investigations on bond durability of CFRP strengthened concrete members subjected to environmental exposure. 2013. 98 f. Dissertation (Master on Civil Engineering) – University of Central Florida, Orlando, 2013.

AL-MAHAIDI, Riadh; KALFAT, Robin. Rehabilitation of concrete structures with fiber-reinforced polymer. Butterworth-Heinemann, 2018.

AL-SAAWANI, Mohammed A.; EL-SAYED, Ahmed K.; AL-NEGHEIMISH, Abdulaziz I. Effect of Shear-span/Depth Ratio on Debonding Failures of FRP-strengthened RC Beams. *Journal of Building Engineering*, v. 32, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101771>.

AL-SAAWANI, M.; EL-SAYED, A.K.; AL-NEGHEIMISH, A. Effect of basic design parameters on IC debonding of CFRP-strengthened shallow RC beams. *J. Reinf. Plast. Compos.* 2015, 34, 1526–1539.

ALSHAMMARI, Basheer A. *et al.* Comprehensive review of the properties and modifications of carbon fiber-reinforced thermoplastic composites. *Polymers*, v. 13, n. 15, p. 2474, 2021.

AL-ZAID, R.A.; EL-SAYED, A.K.; AL-NEGHEIMISH, A.I.; SHURAIM, A.B.; ALHOZAIMY, A.M. Strengthening of structurally damaged wide shallow RC beams using externally bonded CFRP plates. *Lat. Am. J. Solids Struct.* 2014, 11, 946–965.

AL-ZU'BI, Hebah; ABDEL-JABER, Mu'tasim; KATKHUDA, Hasan. Flexural strengthening of reinforced concrete beams with variable compressive strength using near-surface mounted carbon-fiber-reinforced polymer strips [NSM-CFRP]. *Fibers*, v. 10, n. 10, p. 86, 2022.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 318 – Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. Farmington Hills, EUA, 2011.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 440.2R. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. Detroit, EUA, 2017.

AMRAN, YH Mugahed *et al.* Properties and applications of FRP in strengthening RC structures: A review. In: Structures. Elsevier, 2018. p. 208-238.

ARAM, M.R.; CZADERSKI, C.; MOTAVALLI, M. Debonding failure modes of flexural FRP-strengthened RC beams. Compos. Part B Eng. 2008, 39, 826–841.

ARAÚJO, Caroline Maia. Reforço de vigas de concreto à flexão e ao cisalhamento com tecidos de fibra de carbono. Rio de Janeiro: UFRJ, 2002.

ARQUEZ, Ana Paula. Aplicação de laminado de polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC) inserido em substrato de microconcreto com fibras de aço para reforço à flexão de vigas de concreto armado. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

AZEVEDO, A. S. *et al.* Fire behaviour of CFRP-strengthened RC slabs using different techniques—EBR, NSM and CREAtE. Composites Part B: Engineering, v. 230, p. 109471, 2022.

BAENA, Marta *et al.* Flexural performance and end debonding prediction of NSM carbon FRP-strengthened reinforced concrete beams under different service temperatures. Polymers, v. 15, n. 4, p. 851, 2023.

BARRIS, Cristina *et al.* Experimental Study on Flexural Cracking and Deformation of Reinforced-Concrete Beams Strengthened with NSM FRP Reinforcement. Journal of Composites for Construction, v. 27, n. 2, p. 04023006, 2023.

BARROS, J. A. O.; DIAS, S. J. E.; LIMA, J. L. T. Eficácia das técnicas baseadas em CFRP para o fortalecimento flexural e de cisalhamento de vigas de concreto. Cement and Concrete Composites, v. 29, n. 3, p. 203–217, 2007.

BARROS, J. A. O.; FORTES, A. S. Fortalecimento flexural de vigas de concreto com laminados de CFRP colados em fendas. Journal Cement and Concrete Composites, v. 27, n. 4, p. 471–480, 2005.

BARROS, Patrícia; MARTINS, Carlos; RENDA, Jorge. Validation of Structural Reinforcement Solutions, in Execution Phase. In: INCREaSE: Proceedings of the 1st International Congress on Engineering and Sustainability in the XXI Century-INCREaSE 2017. Springer International Publishing, 2018. p. 532-542.

BEBER, J. A., Campos Filho, A., Campagnolo, J. L. (2000), “*Estudo Teórico-Experimental de Vigas de Concreto Reforçadas com Tecidos de Fibra de Carbono*”. IV Simpósio EPUSP sobre estruturas de concreto, São Paulo.

BEBER, Andriei José. Comportamento Estrutural de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Compósitos de Fibra de Carbono. 2003. Tese (Doutorado em Estruturas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

BILOTTA, A.; CERONI, F.; NIGRO, E.; PECCE, M. Design by Testing of Debonding Load in RC Elements Strengthened with EBR FRP Materials. *Am. Concr. Inst. ACI Spec. Publ.* 2011, 275, 1–20.

BREHM, Eric; HERTLE, Robert. Enhancement of structural safety by safety factors – a case against the common approach. In: *IABSE Congress: Structural Engineering for Future Societal Needs*, 22-24 set. 2021, Ghent, Belgium. *Anais... Ghent: IABSE Congress Ghent*, 2021. p. 1831-1838. doi:10.2749/ghent.2021.1831.

CAIRES, Diana Maria Pereira. Reforço de vigas de concreto armado pela técnica NSM-FRP. 2023. 64 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2022.

CANAVAL, Júnior Henrique; SILVA, TJ DA; SANTOS, A. C. Estudo experimental em vigas de CA reforçadas à flexão por encamisamento e conectores. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 11, p. 810-833, 2018.

CARVALHO, Tiago Silva de. Reforço à Flexão de Vigas de Betão Armado com Compósitos de CFRP. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Estruturas e Geotecnia) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2010.

CASTRO, Eliane Kraus de. Reforço em Vigas “T” de Concreto Armado com Vários Tipos de Compósitos em Entalhes no Cobrimento de Concreto (CEC). 2005. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2005.

CHAWLA, Krishan K. *Composite materials: science and engineering*. Springer Science & Business Media, 2012.

COELHO, M. R. F.; SILVA, L.; SENA-CRUZ, J.; BARROS, J. A. Estudo comparativo de diferentes técnicas no reforço à flexão de vigas de betão armado com recurso a CFRP's sob acções monotónicas e de fadiga. *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas (RPEE)* 2011.

COSTA, I. G.; BARROS, J. A. O. Fortalecimento flexural e de cisalhamento de vigas de RC com materiais compósitos – a influência do corte de estribos de aço para instalar tiras de CFRP. *Cement and Concrete Composites*, v. 32, p. 544–553, 2010.

CODINA, A.; BARRIS, C.; JAHANI, Y.; BAENA, M.; TORRES, L. Assessment of fib Bulletin 90 Design Provisions for Intermediate Crack Debonding in Flexural Concrete Elements Strengthened with Externally Bonded FRP. *Polymers* 2023, 15, 769. <https://doi.org/10.3390/polym15030769>

CODINA, A. et al. Experimental and theoretical study on the flexural behaviour of RC beams strengthened with externally bonded reinforcement on grooves CFRP laminates. *Engineering Structures*, v. 299, p. 117091, 2024.

COLLINS, M.P. (2001). Evaluation of shear design procedures for concrete structures. A Report prepared for the CSA technical committee on reinforced concrete design.

CRUZ, José Ricardo *et al.* Flexural behaviour of NSM CFRP laminate strip systems in concrete using stiff and flexible adhesives. *Composites Part B: Engineering*, v. 195, p. 108042, 2020.

CZADERSKI, Christoph; MEIER, Urs. EBR strengthening technique for concrete, long-term behaviour and historical survey. *Polymers*, v. 10, n. 1, p. 77, 2018.

DAL PONT, Renata Soares Piazza. Análise Experimental da Resistência de Vigas de Concreto Armado Reforçadas à Flexão com PRFC e Barras de Aço pelo Método Near Surface Mounted (NSM). 2023. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2023.

DALFRÉ, G. M. Flexural and shear strengthening of RC elements. Guimarães, 2013. 432p. Tese de Doutorado – Universidade do Minho, Guimarães, 2013.

DALFRÉ, G. M.; ALVES, A.; OLIVEIRA, A. C. F. Dimensionamento de sistema de reforço à flexão com materiais compósitos segundo a técnica EBR. *Revista Concreto & Construções*. v. 94, p. 53-62, 2019.

DALFRÉ, G. M.; BARROS, J. A. O. Análise experimental e numérica de lajes de dois vãos de RC reforçadas com laminados de CFRP NSM. In: FRPRCS International Symposium, 10., ACI SP-275 Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures, Tampa, Florida, 2011.

DALFRÉ, Gláucia Maria; PARSEKIAN, Guilherme Aris; FERREIRA, Douglas da Costa. Degradation of the EBR-CFRP strengthening system applied to reinforced concrete beams exposed to weathering. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 14, p. e14208, 2021.

ANDRADE SILVA, Eduardo Melo *et al.* MÉTODOS PARA RESTAURAÇÃO E REFORÇO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO. *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação*, v. 8, n. 11, p. 2255-2286, 2022.

DIAS, Salvador JE; JUVANDES, Luís FP; FIGUEIRAS, Joaquim A. Comportamento de vigas de betão armado reforçadas à flexão com sistemas compósitos de CFRP unidireccionais. 2002.

DIAS, Salvador JE; BARROS, Joaquim AO; AZEVEDO, Cristiana. Comportamento de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos. 2012.

EFFIONG, John Uduak; EDE, Anthony Nkem. Experimental Investigation on the Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Externally Bonded and Near-Surface Mounted Natural Fibre Reinforced Polymer Composites—A Review. *Materials*, v. 15, n. 17, p. 5848, 2022.

EL-ZEADANI, M.; SAIFULNAZ, M.R.; HEJAZI, F.; AMRAN, Y.M.; JAAFAR, M.; ALYOUSEF, R.; ALRSHOUDI, F. Mechanics-based approach for predicting the short-term deflection of CFRP plated RC beams. *Compos. Struct.* 2019, 225, 111169.

EMMONS, Peter H.; VAYSBURD, Alexander M.; THOMAS, Jay. Strengthening Concrete Structures, Part 1. *Concrete International*, v. 20, n. 3, p. 53-58, 1998.

FARAJ, N. S.; KARIM, F. R. Review On Crack Repair And Strengthening Techniques In Concrete Slabs. *The International Journal of Engineering and Science (IJES)*, v. 9, n. 04, p. 35-48, 2020.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures. *FIB Bulletin*, n. 14, Lausanne, 2001.

FERREIRA, M. P. et al. Influência da ancoragem na resistência à flexão de vigas reforçadas com mantas de PRFC. *Revista Alconpat*, v. 9, n. 1, p. 30-47, 2019.

FORTES, Adriano Silva. Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Fibras de Carbono. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

FORTES, Adriano Silva; BARROS, Joaquim A. O.; PADARATZ, Ivo José. Vigas de Betão Armado Reforçadas com Laminados de CFRP Inseridos no Betão de Recobrimento. 2002. Relatório 02-DEC/E-13, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães, 2002.

FU, B.; CHEN, G.; TENG, J. Mitigation of intermediate crack debonding in FRP-plated RC beams using FRP U-jackets. *Compos. Struct.* 2017, 176, 883–897.

FU, B.; TENG, J.; CHEN, G.; CHEN, J.; GUO, Y. Effect of load distribution on IC debonding in FRP-strengthened RC beams: Full-scale experiments. *Compos. Struct.* 2018, 188, 483–496.

FUGIYAMA, Michele Miwa *et al.* Estudos numérico-experimentais de vigas de concreto armado com reforço de fibra de carbono. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 26, 2022.

GHALEH, Reza Zamani; MOSTOFINEJAD, Davood. Behaviour of EBRIG CFRP sheet-concrete joint: Comparative assessment with EBR and EBROG methods. *Construction and Building Materials*, v. 346, p. 128374, 2022.

HAKA, Andreas T. *Engineered Stability: The History of Composite Materials in the 19th and 20th Centuries.* Springer Nature, 2023.

HENSHER, David A. *Fiber-reinforced-plastic (FRP) reinforcement for concrete structures: properties and applications.* Elsevier, 2016.

HOBBS, Mark; HATTORI, Gabriel; ORR, John. Predicting shear failure in reinforced concrete members using a three-dimensional peridynamic framework. *Computers & Structures*, v. 258, p. 106682, 2022.

HOLLAWAY, L. C. Advanced fibre-reinforced polymer (FRP) composites for structural applications: 16. Advanced fibre-reinforced polymer (FRP) composite materials in bridge engineering: materials, properties and applications in bridge enclosures, reinforced and prestressed concrete beams and columns. Elsevier Inc. Chapters, 2013.

HONG, S. Effect of Intermediate Crack Debonding on the Flexural Strength of CFRP-Strengthened RC Beams. *Polym. Mech.* 2014, 50, 523–536.

HOSEN, Md Akter *et al.* Flexural performance of RC beams strengthened with externally-side bonded reinforcement (E-SBR) technique using CFRP composites. *Materials*, v. 14, n. 11, p. 2809, 2021.

HOSEN, Md Akter *et al.* Structural performance of lightweight concrete beams strengthened with side-externally bonded reinforcement (S-EBR) technique using CFRP fabrics. *Composites Part B: Engineering*, v. 176, p. 107323, 2019.

HUSSEIN, Al-Abbas B.; GHANIM, Abbas A.; MOHSIN, Al-Fendawy D. Experimental Study on the Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using NSM CFRP Bars. 2016. Conference Paper, University of Kerbala, 2016.

SAEED, Ikram A. *et al.* Flexural behavior of RC beams strengthened by NSM-CFRP laminates or bars. *Engineering and Technology Journal*, v. 36, n. 4A, p. 358-367, 2018.

JANSZE, W. Strengthening of reinforced concrete members in bending by externally bonded steel plates. 1997. Tese (Doutorado em Filosofia) – TU Delft, The Netherlands, 1997.

JUVANDES, L. F. P. Reforço e reabilitação de estruturas de betão usando materiais compósitos de CFRP. Tese para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, 385 p. FEUP, Porto – Portugal, 1999.

KANG, Jae-Yoon; PARK, Young-Hwan; PARK, Jong-Sup; YOU, Young-Jun; JUNG, Woo-Tai. Analytical Evaluation of RC Beams Strengthened with Near Surface Mounted CFRP Laminates. In: SP-230: Seventh International Symposium on Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-7). American Concrete Institute, 2005. p. 779-794.

KEYA, Kamrun N. *et al.* Natural fiber reinforced polymer composites: history, types, advantages and applications. *Materials Engineering Research*, v. 1, n. 2, p. 69-85, 2019.

Kotynia, R.; Baky, H.A.; Neale, K.W.; Ebead, U.A. Flexural Strengthening of RC Beams with Externally Bonded CFRP Systems: Test Results and 3D Nonlinear FE Analysis. *J. Compos. Constr.* 2008, 12, 190–201.

LAMBA, Nitin; RAJ, Ritu; SINGH, Poonam. Mechanical characteristics of high strength concrete incorporating recycled CFRP fibers. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 139, n. 47, p. e53183, 2022.

LI, Mingcan; LI, Xuhong. Investigation on bond performance of concrete strengthened with CFRP plates. *AIP Advances*, v. 13, n. 6, 2023.

LIM, D.H. An Experimental Study of Flexural Strengthening Method of Reinforced Concrete Beams with Near Surface Mounted CFRP Strips. *Journal of the Korea Society of Civil Engineers*, Vol. 33, No. 1, p.131-136, 2013.

LIMA, ANDERSON BERMOND DE. Reforço à flexão de vigas “T” de concreto armado através da inserção de compósitos de FRP no concreto de cobertura. 2004. xxviii, 220 f., il. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

LIMA, Leonardo Siqueira de. Reforço à Flexão de Vigas de Concreto Armado Utilizando Compósitos de Fibras de Carbono e de Vidro. 2004. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

MAALEJ, M.; LEONG, K. Effect of beam size and FRP thickness on interfacial shear stress concentration and failure mode of FRP-strengthened beams. *Compos. Sci. Technol.* 2005, 65, 1148–1158.

MAAZOUN, Azer *et al.* New technique to protect RC slabs against explosions using CFRP as externally bonded reinforcement. In: *Critical Energy Infrastructure Protection*. IOS Press, 2022. p. 125-133.

MANZANO, Manuel Alejandro Rojas. Análise Experimental do Reforço Híbrido de Vigas “T” de Concreto Armado com Colagem Externa de Compósitos de Fibra de Carbono e de Vidro. 2012. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

MARQUES, Guilherme Granata. Análise Experimental de Sistemas de Reforço Estrutural à Flexão com Laminados de PRFC Aplicados a Vigas de Concreto Armado. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

MATTHYS, S. Comportamento estrutural e projeto de membros de concreto reforçados com reforço externamente colado de FRP. 2000. Tese (Doutorado) - Universidade de Ghent.

MELO, Renan Henrique de. Reforço à flexão de vigas com compósitos de fibras de vidro e de carbono inseridos no concreto de cobertura. 2017. 189 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia dos Transportes, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2017.

MOHAMED, Khaled; BENMOKRANE, Brahim. Recent Canadian Developments Related to FRP Reinforcement for Sustainable and Resilient Concrete Structures, Design Codes, and Field Applications in Infrastructures and Buildings. In: International Symposium of the International Federation for Structural Concrete. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023. p. 3-12.

MONTEIRO, António Carlos Pereira Janes. Reforço de Vigas de Betão Armado com Armaduras Exteriores de FRP. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Estruturas e Geotecnia) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2014.

MORAES NETO, B.N. (2013). Comportamento à Punção de Lajes Lisas em Concreto Reforçado com Fibras de Aço sob Carregamento Simétrico. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.TD-001A/13 Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 343 p.

MOSHIRI, Niloufar *et al.* Bond Behavior of Prestressed CFRP Strips-to-Concrete Joints Using the EBROG Method: Experimental and Analytical Evaluation. Journal of Composites for Construction, v. 27, n. 1, p. 04022104, 2023.

MOON, D.Y.; OH, H.S.; ZI, G.S. Assessment of Flexural Strengthening Behavior Using the Stirrup-Cutting Near Surface Mounted (CNSM) CFRP strip. Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, Vol. 16, No. 6, pp.102-112, 2005.

NASER, M. Z.; HAWILEH, R. A.; ABDALLA, J. A. Fiber-reinforced polymer composites in strengthening reinforced concrete structures: A critical review. Engineering Structures, v. 198, p. 109542, 2019.

NETO, Tarcísio Gomes Parente *et al.* Análise teórica comparativa entre os tipos de reforço estrutural aplicados em vigas de concreto armado. Research, Society and Development, v. 10, n. 13, p. e20101320182-e20101320182, 2021.

NIU, H.; VASQUEZ, A.; KARBHARI, V. Effect of material configuration on strengthening of concrete slabs by CFRP composites. Compos. Part B Eng. 2005, 37, 213–226.

OBAIDAT, Yasmeeen Taleb. Effect of Slenderness Ratio on Confined Reinforced Concrete Columns Using NSM-CFRP Rope. Practice Periodical on Structural Design and Construction, v. 28, n. 1, p. 04022069, 2023.

OBAIDAT, Yasmeeen Taleb; BARHAM, Wasim; ABU LIBDEH, Rawan. Development of interaction diagrams of reinforced concrete short columns strengthened by NSM-CFRP strips using finite element method. International Journal of Building Pathology and Adaptation, 2022.

OLLER, E. Peeling Failure in Beams Strengthened by Plate Bonding. A Design Proposal; Universitat Politècnica de Catalunya: Barcelona, Spain, 2005.

OLIVEIRA JUNIOR, Francisco Sávio de. Reforço à Flexão de Vigas “T” de Concreto Armado com Colagem Externa e Inserção de Compósitos com Fibra de Carbono e Barras de Aço no

Concreto de Cobrimento. 2005. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2005.

ORLANDO, Igor Del Gaudio; BITTENCOURT, Túlio Nogueira; MENEGHETTI, Leila Cristina. Reinforced concrete structures strengthened with CFRP (ACI x FIB)-Recommendations for bending design criteria. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 15, n. 2, p. e15204, 2021.

ORTIZ, Jesús D. *et al.* FRP-reinforced/strengthened concrete: State-of-the-art review on durability and mechanical effects. *Materials*, v. 16, n. 5, p. 1990, 2023.

PAWLAK, Aleksandra M. *et al.* The Use of CFRP for Structural Reinforcement—Literature Review. *Metals*, v. 12, n. 9, p. 1470, 2022.

PENG, H.; ZHANG, J.; CAI, C.; LIU, Y. An experimental study on reinforced concrete beams strengthened with prestressed near surface mounted CFRP strips. *Eng. Struct.* 2014, 79, 222–233.

PINTO, Laura Gomes. Análise da Resistência de Vigas de Concreto Armado Reforçadas à Flexão com Fibra de Carbono pelo Método *Near Surface Mounted*. Monografia de Projeto Final em Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, novembro de 2018.

PINTO, L.G. (2023). Avaliação Experimental da Eficiência de Vigas de Concreto Armado Reforçadas à Flexão com Barras de Aço e Argamassa Polimérica pelo Método Near Surface Mounted (NSM). Dissertação de Mestrado em Estruturas, Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 128p.

PRÁTICA RECOMENDADA IBRACON/ABECE - Reforço de elementos estruturais de concreto com sistemas de Polímeros Reforçados com Fibras (FRP) Aplicado Externamente. CT 303 - Comitê Técnico IBRACON/ABECE sobre Uso de Materiais não Convencionais para Estruturas de Concreto, Fibras e Concreto Reforçado com Fibras, 2023.

RAJAK, Dipen Kumar; WAGH, Pratiksha H.; LINUL, Emanoil. Manufacturing technologies of carbon/glass fiber-reinforced polymer composites and their properties: A review. *Polymers*, v. 13, n. 21, p. 3721, 2021.

ROMANICHEN, Romulo Menk; SOUZA, Rafael Alves. Consolos de concreto armado reforçados com protensão externa. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 12, p. 812-831, 2019.

RUSINOWSKI, P.; TÄLJSTEN, B. Intermediate Crack Induced Debonding in Concrete Beams Strengthened with CFRP Plates—An Experimental Study. *Adv. Struct. Eng.* 2009, 12, 793–806.

SAGATOV, B. Study on reinforced concrete elements of buildings and structures with cracks, reinforced with composite polymer materials. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2023. p. 012043.

SANTOS, Juliane da Costa. Análise Experimental de Vigas de Concreto Armado Submetidas a Carregamento Prévio e Reforçadas à Flexão com Compósitos Reforçados com Fibra de Carbono. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

SAUSE, Markus GR. Monitoramento in situ de compósitos reforçados com fibras: teoria, conceitos básicos, métodos e aplicações . Springer, 2016.

SIDDIKA, Ayesha *et al.* Strengthening of reinforced concrete beams by using fiber-reinforced polymer composites: A review. *Journal of Building Engineering*, v. 25, p. 100798, 2019.

SIDDIQUI, Nadeem Ahsan. Experimental investigation of RC beams strengthened with externally bonded FRP composites. *Latin American Journal of Solids and Structures*, v. 6, n. 4, p. 343-362, 2009.

SILVA FILHO, José Neres da. Análise Experimental de Vigas “T” em Concreto Armado Reforçadas à Flexão com FRP Submetidas a Carregamentos Pseudo-estáticos e Cíclicos. 2005. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2005.

SILVA, Aloísio Sthéfano Corrêa; BANDEIRA, Alex Alves. Análise de vigas de concreto armado reforçadas à flexão com fibras de carbono: abordagem teórica e computacional. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 12, p. 233-254, 2019.

SILVA, J. R. Reforço híbrido à flexão de vigas “T” de concreto armado com compósitos de fibras de carbono e fibras de vidro. 2014. 276 f. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília, Brasília.

SLAITAS, J.; VALIVONIS, J. Full moment-deflection response and bond stiffness reduction of RC elements strengthened with prestressed FRP materials. *Compos. Struct.* 2020, 260, 113265.

TENG, J. G. *et al.* Falhas de descolamento em vigas de RC reforçadas com tiras de CFRP montadas na superfície próxima. *ASCE Journal of Composites for Construction*, v. 10, n. 2, p. 92–105, 2006.

TENG, J. G. *et al.* Intermediate crack-induced debonding in RC beams and slabs. *Construction and Building Materials*, v. 17, n. 6-7, p. 447-462, 2003.

THAKUR, Aishwarya; SAURAV. A Review on Non-destructive Techniques for Corrosion Monitoring in Reinforced Concrete Structures. *Recent Advances in Structural Engineering and Construction Management: Select Proceedings of ICSMC 2021*, p. 951-968, 2022.

TURCO, A.; BOCCIARELLI, M.; NANNI, A.; POGGI, C. Influence of width and thickness of composite laminates on the flexural behavior of reinforced concrete beams and slabs. *Compos. Struct.* 2017, 178, 186–194.

VIEIRA, Mylene de Melo. Estudo Experimental de Vigas de Concreto Armado Reforçadas à Flexão com Polímero Reforçado com Fibra de Carbono. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

WIERZBICKI, Luísa R. Análise do Desempenho da Técnica de Reforço NSM (*Near Surface Mounted*) com Fibras de Carbono em Vigas Submetidas à Flexão. 2021.108f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2021.

YANG, Jincheng. Flexural strengthening of reinforced concrete beams using externally bonded CFRP: An innovative method for the application of prestressed CFRP laminates. 2019. Tese de Doutorado. Chalmers Tekniska Hogskola (Sweden).

YANG, Z. Behavior and design of earthquake resistant concrete structure. ACE, v. 3, p. 16-21, 2023. DOI: 10.54254/2755-2721/3/20230309.

YOST, J.R.; GROSS, S.P.; DINEHART, D.W.; MILDENBERG, J.J. Flexural Behavior of Concrete Beams Strengthened with Near-Surface-Mounted CFRP Strips. ACI Structural Journal, Vol. 104, No. 4, 2007.

ZHOU, C.-Y.; YU, Y.-N.; XIE, E.-L. Strengthening RC beams using externally bonded CFRP sheets with end self-locking. Compos. Struct. 2020, 241, 112070.

# APÊNDICES

## APÊNDICE A – BANCO DE DADOS

DADOS GERAIS										DADOS GEOMÉTRICOS (cm)										ARMADURA PASSIVA										CONCRETO										REFORÇO (FRP)										RESULTADOS									
Seção	Autor (ano)	Tipos de FRP	Tipos de Colagem	H	hw	bf	bf	d	df	Ac (cm²)	av (cm)	ad	ps	Av	Es (GPa)	Vy	fy	fc	Ec (GPa)	rh (%)	P cam	tf	Ar	pf	Ef	fm	Pu	fm	Incr. de resistência (%)	Tipos de ruptura																													
VA 2.1	T	REF.	REF.	40,00	55,00	15,00	10,00	35,20	2,45	0,00	1000,00	1,50	4,26	0,00628	6,28	1,24	222,50	551,50	2,48	46,30	24,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	163,0	RC																													
VA 2.2	T	REF.	REF.	40,00	55,00	15,00	10,00	35,20	2,45	0,00	1000,00	1,50	4,26	0,00628	6,28	1,24	222,50	551,50	2,48	36,50	27,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	185,0	RC																														
VB 2.1	T	NSM	NSM	40,00	55,00	15,00	10,00	35,20	2,45	39,10	1000,00	1,50	4,26	0,00628	6,28	1,24	222,50	551,50	2,48	49,50	24,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	246,0	RP-CCS																														
VB 2.2	T	NSM	NSM	40,00	55,00	15,00	10,00	35,20	2,45	39,10	1000,00	1,50	4,26	0,00628	6,28	1,24	222,50	551,50	2,48	52,80	28,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	250,0	RP-CCS																														
VC 2.1	T	NSM	NSM	40,00	55,00	15,00	10,00	35,20	2,45	39,10	1000,00	1,50	4,26	0,00628	6,28	1,24	222,50	551,50	2,48	52,70	31,00	13,40	1,00	1,00	0,79	0,00079	147,00	1970,00	253,0	11,40	45,4%	RF																											
VC 2.2	T	NSM	NSM	40,00	55,00	15,00	10,00	35,20	2,45	39,10	1000,00	1,50	4,26	0,00628	6,28	1,24	222,50	551,50	2,48	50,10	30,00	19,00	1,00	1,00	0,79	0,00079	147,00	1970,00	250,0	14,30	43,7%	RF																											
VD 2.1	T	NSM	NSM	40,00	55,00	15,00	10,00	35,20	2,45	38,75	1000,00	1,50	4,26	0,00628	6,28	1,24	222,50	551,50	2,48	50,10	30,00	19,00	1,00	1,00	0,79	0,00079	147,00	1970,00	250,0	12,60	43,7%	RF																											
VE 2.1	T	EBR	EBR	40,00	55,00	15,00	10,00	35,20	2,45	40,00	1000,00	1,50	4,26	0,00628	6,28	1,24	222,50	551,50	2,48	40,00	34,00	17,60	1,00	1,00	0,50	0,00050	247,90	4356,00	206,0	6,70	18,4%	RP-IC																											
VA 5.1	T	REF.	REF.	40,00	55,00	15,00	10,00	33,60	2,45	0,00	1000,00	1,50	4,46	0,01570	15,70	1,24	222,50	551,50	2,48	47,70	32,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	398,0	RC																														
VA 5.2	T	REF.	REF.	40,00	55,00	15,00	10,00	33,60	2,45	0,00	1000,00	1,50	4,46	0,01570	15,70	1,24	222,50	551,50	2,48	45,30	32,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	398,0	RC																														
VB 5.1	T	NSM	NSM	40,00	55,00	15,00	10,00	33,60	2,45	39,10	1000,00	1,50	4,46	0,01570	15,70	1,24	222,50	551,50	2,48	46,50	32,00	13,40	1,00	1,00	0,79	0,00079	147,00	1970,00	456,0	13,10	14,6%	RF																											
VC 5.1	T	NSM	NSM	40,00	55,00	15,00	10,00	33,60	2,45	39,10	1000,00	1,50	4,46	0,01570	15,70	1,24	222,50	551,50	2,48	46,50	32,00	13,40	1,00	1,00	0,79	0,00079	147,00	1970,00	456,0	13,10	14,6%	RF																											
VD 5.1	T	NSM	NSM	40,00	55,00	15,00	10,00	33,60	2,45	38,75	1000,00	1,50	4,46	0,01570	15,70	1,24	222,50	551,50	2,48	41,10	29,00	19,00	1,00	1,00	0,24	0,00024	40,40	768,00	480,0	14,10	20,6%	RF																											
VE 5.1	T	NSM	NSM	40,00	55,00	15,00	10,00	33,60	2,45	40,00	1000,00	1,50	4,46	0,01570	15,70	1,24	222,50	551,50	2,48	44,60	28,00	17,60	1,00	1,00	0,50	0,00050	247,90	4356,00	206,0	8,30	20,4%	RP-IC																											
VE 5.2	T	REF.	REF.	55,00	25,00	25,00	55,00	50,50	4,20	0,00	375,00	1,50	2,97	0,00266	3,66	1,00	195,79	548,20	2,80	44,27	33,62	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	153,0	RC																														
VE 5.3	T	REF.	REF.	55,00	25,00	25,00	55,00	50,50	4,20	0,00	375,00	1,50	2,97	0,00266	3,66	1,00	195,79	548,20	2,80	44,27	33,62	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	153,0	RC																														
VE 5.4	T	REF.	REF.	55,00	25,00	25,00	55,00	50,50	4,20	0,00	375,00	1,50	2,97	0,00266	3,66	1,00	195,79	548,20	2,80	44,27	33,62	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	153,0	RC																														
VE 5.5	T	REF.	REF.	55,00	25,00	25,00	55,00	50,50	4,20	0,00	375,00	1,50	2,97	0,00266	3,66	1,00	195,79	548,20	2,80	44,27	33,62	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	153,0	RC																														
VE 5.6	T	REF.	REF.	55,00	25,00	25,00	55,00	50,50	4,20	0,00	375,00	1,50	2,97	0,00266	3,66	1,00	195,79	548,20	2,80	44,27	33,62	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	153,0	RC																														
VE 5.7	T	REF.	REF.	55,00	25,00	25,00	55,00	50,50	4,20	0,00	375,00	1,50	2,97	0,00266	3,66	1,00	195,79	548,20	2,80	44,27	33,62	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	153,0	RC																														
C2	R	REF	REF	40,00	20,00	20,00	40,00	35,20	2,50	40,00	800,00	0,53	1,49	0,00503	4,02	1,57	205,00	560,00	2,73	28,50	29,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	246,2	RC																														
S2	R	EBR	EBR	40,00	20,00	20,00	40,00	35,20	2,50	40,00	800,00	0,70	1,99	0,00503	4,02	1,57	205,00	560,00	2,73	28,50	29,90	16,50	1,00	1,00	0,62	0,00077	230,00	3790,00	267,1	3,16	8,5%	RP-CCS																											
C2.5	R	REF	REF	40,00	20,00	20,00	40,00	35,20	2,50	40,00	800,00	0,88	2,49	0,00503	4,02	1,57	205,00	560,00	2,73	28,50	29,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	200,0	RC																														
S2.5	R	EBR	EBR	40,00	20,00	20,00	40,00	35,20	2,50	40,00	800,00	0,88	2,49	0,00503	4,02	1,57	205,00	560,00	2,73	28,50	29,90	16,50	1,00	1,00	0,62	0,00077	230,00	3790,00	264,9	4,17	32,5%	RP-CCS																											
C3.0	R	REF	REF	40,00	20,00	20,00	40,00	35,20	2,50	40,00	800,00	1,05	2,98	0,00503	4,02	1,57	205,00	560,00	2,73	28,50	29,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	164,8	RC																														
S3.0	R	EBR	EBR	40,00	20,00	20,00	40,00	35,20	2,50	40,00	800,00	1,05	2,98	0,00503	4,02	1,57	205,00	560,00	2,73	28,50	29,90	16,50	1,00	1,00	0,62	0,00077	230,00	3790,00	263,8	4,48	60,1%	RP-CCS																											
S4.0	R	EBR	EBR	40,00	20,00	20,00	40,00	35,20	2,50	40,00	800,00	1,40	3,98	0,00503	4,02	1,57	205,00	560,00	2,73	28,50	29,90	16,50	1,00	1,00	0,62	0,00077	230,00	3790,00	218,7	5,49	57,4%	RP-IC																											
S4.5	R	EBR	EBR	40,00	20,00	20,00	40,00	35,20	2,50	40,00	800,00	1,60	4,55	0,00503	4,02	1,57	205,00	560,00	2,73	28,50	29,90	16,50	1,00	1,00	0,62	0,00077	230,00	3790,00	201,2	5,75	62,3%	RP-IC																											
S5.0	R	EBR	EBR	40,00	20,00	20,00	40,00	35,20	2,50	40,00	800,00	1,60	4,55	0,00503	4,02	1,57	205,00	560,00	2,73	28,50	29,90	16,50	1,00	1,00	0,62	0,00077	230,00	3790,00	164,3	6,01	51,5%	RP-IC																											
S5.5	R	EBR	EBR	40,00	20,00	20,00	40,00	35,20	2,50	40,00	800,00	1,75	4,97	0,00503	4,02	1,57	205,00	560,00	2,73	28,50	29,90	16,50	1,00	1,00	0,62	0,00077	230,00	3790,00	155,7	6,27	57,0%	RP-IC																											
S7.0	R	EBR	EBR	40,00	20,00	20,00	40,00	35,20	2,50	40,00	800,00	2,50	7,10	0,00503	4,02	1,57	205,00	560,00	2,73	28,50	29,90	16,50	1,00	1,00	0,62	0,00077	230,00	3790,00	143,0	6,44	60,7%	RP-IC																											
6C	R	REF	REF	19,00	15,24	15,24	19,00	14,40	0,00	0,00	289,56	1,22	8,47	0,01389	4,02	0,00	200,00	510,00	2,55	37,20	34,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	21,1	RC																														
6-FA	R	NSM	NSM	19,00	15,24	15,24	19,00	14,40	0,00	18,25	289,56	1,22	8,47	0,01389	4,02	0,00	200,00	490,00	2,45	37,20	34,16	12,12	1,00	1,00	0,38	0,00130	136,00	1648,00	24,8	17,5%	RC																												
6-FB	R	NSM	NSM	19,00	15,24	15,24	19,00	14,40	0,00	18,25	289,56	1,22	8,47	0,01389	4,02	0,00	200,00	490,00	2,45	37,20	34,16	12,12	1,00	1,00	0,38	0,00130	136,00	1648,00	23,2	10,0%	RC																												
6-FA	R	NSM	NSM	19,00	15,24	15,24	19,00	14,40	0,00	18,25	289,56	1,22	8,47	0,01389	4,02	0,00	200,00	490,00	2,45	37,20	34,16	12,12	1,00	1,00	0,38	0,00130	136,00	1648,00	26,0	18,5%	RC																												
6-FB	R	NSM	NSM	19,00	15,24	15,24	19,00	14,40	0,00	18,25	289,56	1,22	8,47	0,01389	4,02	0,00</																																											







