



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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

LUCAS CARVALHO SILVA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DE ANCORAGENS E TAXAS DE
ARMADURA NA RESISTÊNCIA À FLEXÃO DE CONSOLOS LONGOS
REFORÇADOS COM LAMINADOS DE FIBRA DE CARBONO**

TUCURUÍ

2025

LUCAS CARVALHO SILVA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DE ANCORAGENS E TAXAS DE
ARMADURA NA RESISTÊNCIA À FLEXÃO DE CONSOLOS LONGOS
REFORÇADOS COM LAMINADOS DE FIBRA DE CARBONO**

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

Orientador: Prof. Dr. Aarão Ferreira Lima Neto.

Tucuruí

2025

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

- S586a Silva, Lucas Carvalho.
Análise experimental da influência de ancoragens e taxas de armadura na resistência à flexão de consolos longos reforçados com laminados de fibra de carbono / Lucas Carvalho Silva, . — 2025.
XVIII, 117 f. : il. color.
- Orientador(a): Prof. Dr. Aarão Ferreira Lima Neto Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético, Tucuruí, 2025.
1. Laminados de PRFC. 2. Consolo. 3. Flexão. 4. Sistema de ancoragem. I. Título.

CDD 624.1834

LUCAS CARVALHO SILVA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DE ANCORAGENS E TAXAS DE
ARMADURA NA RESISTÊNCIA À FLEXÃO DE CONSOLOS LONGOS
REFORÇADOS COM LAMINADOS DE FIBRA DE CARBONO**

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

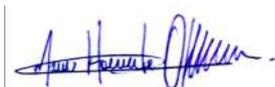
Orientador: Prof. Dr. Aarão Ferreira Lima Neto.

Aprovada em 29 de maio de 2025.

BANCA EXAMINADORA



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



Prof. Dr. Marcos Honorato de Oliveira / Universidade de Brasília - Examinador Externo



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



Dedico este trabalho a todos que
acreditam na ciência e na educação

AGRADECIMENTOS

Agradecer é a arte de reconhecer que ninguém vence sozinho. E minha trajetória ao longo desses anos de pesquisa apenas confirma essa máxima dita por Augusto Cury. Por isso, dedico este capítulo às pessoas que me ajudaram a alcançar o entendimento aqui transcrito.

Primeiramente, meus agradecimentos são direcionados às pessoas que me ofereceram orientação ao longo desta jornada. Ao meu orientador, professor Aarão Ferreira Lima Neto, e aos professores Manoel José Mangabeira Pereira Filho e Jedson Henryque Corrêa Abrantes, pelo apoio fundamental em várias etapas da minha pesquisa.

Agradeço também aos meus companheiros de pesquisa, por me apoiarem e me acolherem, tornando-se praticamente minha família em Tucuruí. Aos meus amigos Paulo Sérgio Barreiros de Leão Júnior, Jedson Henryque Corrêa Abrantes e Layse Rafaela Furtado Lima, deixo minha profunda gratidão. Graças à ajuda de vocês, este trabalho pôde ser concluído.

Agradeço a todos os colegas que compõem o NUNEA Tucuruí pela colaboração indispensável nas etapas mais exigentes do trabalho. Sem o apoio de vocês no laboratório, esta pesquisa certamente não teria sido a mesma.

À minha família, que sempre me incentivou e continua sendo minha maior fonte de apoio e inspiração. Aos meus pais, Maria Paixão Carvalho Silva e José Moacyr Costa da Silva, aos meus irmãos, Tiago Carvalho Silva e Débora Emylle Carvalho Silva, e a todos das famílias Carvalho e Gama, que, de alguma forma, contribuíram para esta vitória, o meu mais sincero agradecimento.

Os meus mais sinceros agradecimentos aos amigos que fiz em Tucuruí, pelos momentos de descontração e por me fazerem sentir em casa, mesmo estando em terras distantes: Saulo Almada, Paulo Gonçalves, Mayara Sousa, Mateus Leal, Taumaturgo Pontes, Marcus Freitas, Samayara Almeida, Júlio Cesar, Lucas Lemos, Agatha Moreno, Amanda Modesto, João Victor, João Freitas e Edil Santos. Sem vocês, este trabalho não teria sido o mesmo.

Por fim, meus agradecimentos à FAPESPA por acreditar na minha pesquisa e por apoiá-la.

Não há nada como o sonho para criar o futuro. Utopia hoje, carne e osso amanhã.

Victor Hugo

RESUMO

Para o reparo e reforço de consolos de concreto armado, buscam-se soluções que prolonguem a vida útil dessas estruturas, aumentem sua capacidade de carga, reduzam deformações e limitem a propagação de fissuras. Portanto, este trabalho apresenta ensaios em modelos experimentais de consolos reforçados com laminados de Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono (PRFC) para analisar o acréscimo de resistência nestes modelos. Todos os consolos são chanfrados e possuem a mesma geometria. Com isso, a relação entre o posicionamento do carregamento (a) e a altura útil (d) será de aproximadamente 1,28, podendo o mesmo ter características de verificação de um consolo ou de uma viga em balanço. Dessa forma, todas as peças possuem arranjo geométrico com 250 mm de largura, altura de engastamento de 400 mm, altura na face externa de 200 mm e comprimento de 570 mm. O principal objetivo desta pesquisa é analisar o comportamento do reforço, conforme a variação da taxa de armadura principal e da ancoragem, comparar os resultados experimentais com normas vigentes e verificar se os sistemas de ancoragem propostos evitarão modos de ruptura prematuros. As dimensões do reforço consistem em um laminado de (50x1440) mm, aplicado nas duas faces do consolo. Foram analisadas duas configurações para o sistema de ancoragem. O primeiro método de aplicação do sistema de ancoragem consiste na fixação de parafusos através de chapas que não perfuram o laminado, denominado *Hybrid bonding* (HB). O segundo método, classificado como FT (devido a forma de aplicação do laminado), utiliza os próprios laminados do reforço, sendo feitas sobreposições sendo a última no sentido perpendicular ao reforço e camadas anteriores. Em relação aos resultados, foi observado que ambos os métodos de ancoragem são eficientes para o acréscimo de resistência dos espécimes, sendo o HB o método de ancoragem mais adequado. Além disso, conforme a taxa de armadura, os incrementos de resistência, proporcionados pelo reforço, variam, sendo menos eficientes em consolos com maiores taxas de armadura principal. Por fim, observou-se que os métodos de ancoragem propostos não foram totalmente eficazes em impedir o descolamento do reforço ao longo do laminado. No entanto, destaca-se que nos consolos com ancoragem HB, mesmo com o descolamento do reforço, a ancoragem foi capaz de conter o escorregamento total, contribuindo para o aumento de ductibilidade do consolo, mesmo após o descolamento.

Palavras-chave: Laminados de PRFC. Consolo. Flexão. Sistema de ancoragem.

ABSTRACT

For the repair and strengthening of reinforced concrete corbels, solutions are sought that extend the service life of these structures, increase their load-bearing capacity, reduce deformations, and limit crack propagation. Therefore, this study presents tests on experimental models of corbels strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) laminates to analyze the strength enhancement in these models. All corbels are chamfered and have the same geometry. Thus, the ratio between the load application point (a) and the effective depth (d) is approximately 1.28, allowing the behavior to be characteristic of either a corbel or a cantilever beam. All specimens have a geometric arrangement with 250 mm width, 400 mm embedded height, 200 mm height at the outer face, and 570 mm length. The main objective of this research is to analyze the behavior of the reinforcement according to the variation in the main reinforcement ratio and the anchorage method, to compare the experimental results with current standards, and to verify whether the proposed anchorage systems prevent premature failure modes. The reinforcement dimensions consist of a (50x1440) mm laminate applied to both faces of the corbel. Two configurations of the anchorage system were analyzed. The first anchorage method involves attaching bolts through plates that do not perforate the laminate, known as Hybrid Bonding (HB). The second method, classified as FT (based on the laminate application approach), uses the reinforcement laminates themselves, with overlapping layers — the final one being applied perpendicular to the reinforcement and previous layers. Regarding the results, it was observed that both anchorage methods are effective in increasing the strength of the specimens, with HB being the most suitable anchorage method. Furthermore, depending on the reinforcement ratio, the strength gains provided by the reinforcement vary, being less effective in corbels with higher main reinforcement ratios. Finally, it was noted that the proposed anchorage methods were not entirely effective in preventing debonding along the laminate. However, it is worth highlighting that in the corbels with HB anchorage, even with reinforcement debonding, the anchorage was able to prevent complete slippage, contributing to increased ductility of the corbel even after debonding.

Keywords: CFRP laminates. Corbel. Bending. Anchorage system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Empregabilidade dos consolos de concreto armado.....	19
Figura 1.2 - Classificação dos consolos conforme a norma brasileira.....	20
Figura 1.3 - Comportamento estrutural conforme modelos de cálculo SF e MBT.	20
Figura 1.4 - Caso de ruptura localizada em consolo (Souza <i>et al.</i> , 2019).....	21
Figura 1.5 – Caso de ruptura de cisalhamento em consolo (Galvão e Giacomoni, 2020).....	22
Figura 1.6 - Métodos tradicionais de reforço para consolos (Adaptado de Vaněk, 1985).....	23
Figura 1.7 - Métodos atuais de reforço para consolos.	23
Figura 1.8 - Aplicação de PRFC em consolos de concreto armado (Bobek <i>et al.</i> , 2024).....	24
Figura 1.9 - Aplicação de reforço pela técnica EBR (Adaptado de Maciel <i>et al.</i> , 2024).....	25
Figura 1.10 - Investigação de consolos reforçados com PRFC em função do a/d	26
Figura 1.11 - Método de ancoragem HB-PRFC em consolos reforçados.	26
Figura 1.12 - Configurações de colagem dos laminados (Abrantes <i>et al.</i> , 2024).....	27
Figura 2.1 - Dimensões de consolos longos (Adaptado de Canha <i>et al.</i> , 2014).....	31
Figura 2.2 - Princípio de Saint-Venant (Adaptado de Beer <i>et al.</i> , 2015).....	32
Figura 2.3 - Situações típicas de regiões D (Adaptado da ABNT NBR 6118, 2023).	33
Figura 2.4 - Análise elástico linear em consolos.	34
Figura 2.5 - Representação dos modos de ruptura (Adaptado de Shakir, 2023).	35
Figura 2.6 - Adaptação do modelo de Ritter (Adaptado de Brown, 2005).....	36
Figura 2.7 - Descrição do MBT (ACI 318-M, 2019).	36
Figura 2.8 - Representações típicas de geometrias nodais (ACI 318-M, 2019).....	38
Figura 2.9 - Tipos de bielas (Adaptado de Bavaresco, 2016).....	39
Figura 2.10 - Diagrama de tensão-deformação de PRF (<i>fib</i> Bulletin 90, 2019).....	40
Figura 2.11 - Modos de ruptura em vigas com EBR (Adaptado de Gribniak <i>et al.</i> , 2017).....	43
Figura 2.12 - Técnica NSM em vigas (Alwash <i>et al.</i> , 2021).....	44
Figura 2.13 - Modos de ruptura de estruturas com a técnica NSM (Al-Saadi <i>et al.</i> , 2019).....	45

Figura 2.14 - Técnica MF em viga (Adaptado de Bank e Arora, 2007).	46
Figura 2.15 - Método MF-EBR em viga (Adaptado de Sena-Cruz <i>et al.</i> , 2012).....	46
Figura 2.16 - Modos de ruptura em vigas com MF (Adaptado de Sena-Cruz <i>et al.</i> , 2012).	47
Figura 2.17 - U- <i>Jackets</i> como ancoragem em vigas.	48
Figura 2.18 - Modos de ruptura em estruturas com a ancoragem U- <i>Jacket</i>	48
Figura 2.19 - Reforço de viga com métodos de ancoragem PRF-Spike (Alotaibi, 2024).	49
Figura 2.20 - Modos de ruptura em estruturas com sistema PRF-Spike.	50
Figura 2.21 - Ancoragem HB-FRP em viga reforçada com PRFC (Wu <i>et al.</i> , 2016). ..	50
Figura 2.22 - Modos de ruptura em estruturas com ancoragem HB-PRF.	51
Figura 2.23 - Configurações de aplicação de PRFC utilizando a técnica EBR.	52
Figura 2.24 - Modos de ruptura predominantes na técnica EBR (Ivanova <i>et al.</i> , 2015).	53
Figura 2.25 - Ancoragem <i>Steel Plates</i> (Adaptado de Abdulrahman <i>et al.</i> , 2021).	54
Figura 2.26 - Modo de ruptura da ancoragem <i>Steel Plate</i> (Abdulrahman <i>et al.</i> , 2021).	54
Figura 2.27 - Ancoragem MF-EBR (Adaptado de Shadhan e Kadhim, 2015).	55
Figura 2.28 - Ruptura do método MF-EBR (Adaptado de Shadhan e Kadhim, 2015).	55
Figura 2.29 - Ancoragem U- <i>Jackets</i> em consolos reforçados com PRFC.	56
Figura 2.30 - Modo de ruptura do método U- <i>Jackets</i>	56
Figura 2.31 - Influência de técnicas de reforço no incremento de resistência.	57
Figura 2.32 - Influência dos métodos de ancoragem no incremento de resistência. ..	58
Figura 2.33 - Modos de ruptura de consolos com sistema de ancoragem no reforço.	59
Figura 2.34 - Recomendações para consolos (Adaptado de ACI 318-M, 2019).	61
Figura 2.35 - Deformações, tensões e forças em uma seção transversal de uma viga.	62
Figura 2.36 - Dimensionamento do reforço de PRFC em vigas (ACI 440 2R, 2017). ..	67
Figura 2.37 - Colapso por rasgamento (ABNT NBR 6118, 2023).....	71
Figura 2.38 - Rupturas de cisalhamento recorrentes em parafusos (ACI 318-M, 2019).	71

Figura 2.39 - Áreas de falha do concreto para conectores (ACI 318-M, 2019).	73
Figura 3.1 - Geometria do consolo	75
Figura 3.2 - Detalhamento das armaduras dos consolos longos.....	76
Figura 3.3 - Consolo reforçado pela técnica EBR e ancorado pelo método HB.....	77
Figura 3.4 - Consolo reforçado pela técnica EBR e ancorado pelo método FT.	77
Figura 3.5 - Consolo reforçado pela técnica EBR e ancorado pelo método FT'.....	78
Figura 3.6 - Sistema de ensaio (Medidas em mm).....	80
Figura 3.7 - Instrumentação dos consolos de referência.....	81
Figura 3.8 - Instrumentação do consolo CL-HB 0,18.	82
Figura 3.9 - Instrumentação do consolo CL-HB 0,47.	82
Figura 3.10 - Instrumentação dos consolos CL-FT.	83
Figura 3.11 - Aplicação dos extensômetros internos.....	84
Figura 3.12 - Fôrmas de madeira.	85
Figura 3.13 - <i>Slump test</i>	86
Figura 3.14 - Produção dos CP's.	86
Figura 3.15 - Concretagem dos consolos.....	87
Figura 3.16 - Armadura de aço dos consolos.....	88
Figura 3.17 - Gráfico de tensão e deformação das barras de aço.	88
Figura 3.18 - Características do corpo de prova.	89
Figura 3.19 - Caracterização do laminado de PRFC.....	90
Figura 3.20 - Resina epóxi utilizada.	91
Figura 3.21 - Sistema de ancoragem para os laminados de PRFC.	91
Figura 3.22 - Processo de preparação da superfície.....	93
Figura 3.23 - Limpeza e regularização da superfície.....	94
Figura 3.24 - Limpeza e aplicação da resina no laminado de PRFC.....	94
Figura 3.25 - Aplicação do laminado no consolo.....	95
Figura 3.26 - Aplicação da ancoragem HB.....	96
Figura 3.27 - Aplicação da ancoragem FT'.....	97
Figura 4.1 - Deslocamentos verticais dos consolos.	98
Figura 4.2 - Abertura de fissuras nos consolos.	100
Figura 4.3 - Deformações no concreto dos consolos com ρ_s igual a 0,18% (Parte 1).	101
Figura 4.4 - Deformações no concreto dos consolos com ρ_s igual a 0,18% (Parte 2).	

.....	102
Figura 4.5 - Deformações no concreto dos consolos com ρ_s igual a 0,47% (Parte 1).	102
.....	102
Figura 4.6 - Deformações no concreto dos consolos com ρ_s igual a 0,47% (Parte 2).	103
.....	103
Figura 4.7 - Deformações no laminado de PRFC nas regiões próximas a ancoragem.	104
.....	104
Figura 4.8 - Deformações no laminado de PRFC nas regiões próximas a ancoragem.	105
.....	105
Figura 4.9 - Escorregamento do laminado dos consolos com ρ_s igual a 0,18%.....	106
Figura 4.10 - Escorregamento do laminado dos consolos com ρ_s igual a 0,47%....	107
Figura 4.11 - Monitoramento do consolo de referência CR 0,18.....	109
Figura 4.12 - Monitoramento do consolo reforçado CL-HB 0,18 (Parte 1).	109
Figura 4.13 - Monitoramento do consolo reforçado CL-HB 0,18 (Parte 2).	110
Figura 4.14 - Monitoramento do consolo reforçado CL-FT 0,18.....	110
Figura 4.15 - Monitoramento do consolo de referência CR 0,47.....	111
Figura 4.16 - Monitoramento do consolo reforçado CL-HB 0,47 (Parte 1).	111
Figura 4.17 - Monitoramento do consolo reforçado CL-HB 0,47 (Parte 2).	112
Figura 4.18 - Monitoramento do consolo reforçado CL-FT' 0,47.....	112
Figura 4.19 - Consolo de referência CR 0,18.....	115
Figura 4.20 - Consolo de referência CR 0,47.....	115
Figura 4.21 - Consolo reforçado CL-HB 0,18.....	116
Figura 4.22 - Consolo reforçado CL-HB 0,47.....	117
Figura 4.23 - Consolo reforçado CL-FT 0,18.....	118
Figura 4.24 - Consolo reforçado CL-FT' 0,47.....	119
Figura 5.1 - Modelos de cálculo utilizados na previsão de resistência.....	120
Figura 5.2 - Verificações para a ancoragem do reforço.	122
Figura 5.3 - Avaliação dos resultados normativos.....	124
Figura 5.4 - Deformações dos materiais do consolo conforme a ACI 440.2R (2017).	125
.....	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Propriedades mecânicas dos PRF (<i>fib</i> Bulletin 90, 2019).	41
Tabela 2.2 - Propriedades de adesivos epóxi, concreto e aço (<i>fib</i> Bulletin 90, 2019).	42
Tabela 2.3 – Percentual de ocorrência dos modos de ruptura.	60
Tabela 2.4 - Fator de confinamento da biela (ACI 318-M, 2019).....	64
Tabela 2.5 - Fator de eficiência da biela (ACI 318-M, 2019).	64
Tabela 2.6 - Configuração da região nodal (ACI 318-M, 2019).	65
Tabela 2.7 - Taxa de armadura mínima das bielas (ACI 318-M, 2019).	65
Tabela 2.8 - Comprimento de ancoragem reto necessário (ACI 318-M, 2019).	66
Tabela 2.9 - Fatores de modificação para ancoragem de barras (ACI 318-M, 2019).	66
Tabela 2.10 - Dimensões máximas de furos para parafusos (ABNT NBR 8800, 2024).	70
Tabela 2.11 - Fatores de cálculo para a resistência ao arrancamento (ACI 318-M, 2019).	74
Tabela 2.12 - Requisitos de espaçamento e distância de borda (ACI 318-M, 2019).	74
Tabela 3.1 - Características dos consolos com e sem laminado.	79
Tabela 3.2 - Quantidade de material utilizado na pesquisa.	86
Tabela 3.3 - Propriedades mecânicas do concreto.	87
Tabela 3.4 - Propriedades mecânicas das barras de aço.	89
Tabela 3.5 - Propriedades mecânicas do laminado de PRFC.	90
Tabela 3.6 - Propriedades físicas e mecânicas da resina epóxi.	90
Tabela 3.7 - Propriedades mecânicas das chapas e parafusos.	92
Tabela 4.1 - Resultados de carga e incremento de resistência.	99
Tabela 4.2 - Valores máximos e últimos de deformação e carga.	113
Tabela 5.1 - Avaliação dos modelos de cálculo por teoria da flexão.	122
Tabela 5.2 - Avaliação dos modelos de cálculo por MBT.	123

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 - Modos de ruptura em consolos e possíveis causas (Shakir, 2023).....	34
Quadro 2.2 - Vantagens e desvantagens do PRF (<i>fib</i> Bulletin 90, 2019).	40
Quadro 2.3 - Natureza dos sistemas de reforço (Adaptado da ACI 440.2R, 2019)...	41
Quadro 4.1 - Modo de ruptura dos consolos ensaiados	114

LISTA DE SÍMBOLOS

- $\emptyset_{f,adot.}$ - Bitola da armadura adotada para a armadura principal
- a - Posicionamento do carregamento
- A_l - Área da seção transversal do laminado
- A_s - Área de aço da armadura principal
- A_{sh} - Área de aço da armadura secundária
- A_{sw} - Área de aço da armadura de cisalhamento
- b - Largura do consolo
- c - Comprimento do consolo
- d - Altura útil do consolo
- $E_{c,med.}$ - Modulo de elasticidade médio do concreto
- E_f - Modulo de elasticidade do laminado de fibra de carbono
- $E_{s,med.}$ - Modulo de elasticidade médio do aço
- $f_{c,med.}$ - Resistencia característica à compressão média do concreto
- f_{ck} - Resistencia característica à compressão do concreto
- $f_{ct,med.}$ - Resistencia a tração média do concreto
- f_{fu} - Tensão última do laminado de fibra de carbono
- $f_{ys,med.}$ - Tensão de escoamento do aço
- $f_{yu,med.}$ - Tensão de última do aço
- h - Altura do consolo
- h_{ext} - Altura externa do consolo
- $n_{\emptyset f}$ - Número de barras da armadura principal
- $P_{máx.}$ - Carga máxima resistente dos consolos
- P_u - Carga última resistente dos consolos
- P_w - Carga de início de fissuração dos consolos
- P_{ys} - Carga de escoamento da armadura principal dos consolos
- $\epsilon_{c,máx.}$ - Deformação na carga máxima de ensaio do concreto a compressão
- ϵ_{cu} - Deformação na carga última de ensaio do concreto a compressão
- $\epsilon_{f,máx.}$ - Deformação na carga máxima de ensaio do laminado de fibra de carbono
- $\epsilon_{f,u}$ - Deformação na carga última de ensaio do laminado de fibra de carbono

ε_{fd} - Deformação de descolamento do laminado de fibra de carbono

ε_{fu} - Deformação última do laminado de fibra de carbono

$\varepsilon_{s,máx}$ - Deformação na carga máxima de ensaio da armadura principal do consolo

$\varepsilon_{s,u}$ - Deformação na carga última de ensaio da armadura principal do consolo

$\varepsilon_{ys,med.}$ - Deformação média de escoamento do aço

$\varepsilon_{yu,med.}$ - Deformação média última do aço

ρ_l - Taxa de reforço

ρ_s - Taxa de aço da armadura principal

ρ_{sh} - Taxa de aço da armadura secundária

ρ_{sw} - Taxa de aço da armadura de cisalhamento

ρ_y - Taxa de aço da armadura principal

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
1.1. Motivação.....	27
1.2. Objetivos.....	28
1.2.1. Objetivo Geral.....	28
1.2.2. Objetivos Específicos	29
1.2.3. Estrutura do Trabalho	29
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
2.1. Consolos longos	31
2.1.1. Regiões de descontinuidades de tensões	31
2.1.2. Modos de ruptura.....	34
2.2. Método de bielas e tirantes	35
2.2.1. Regiões nodais	37
2.2.2. Tirantes.....	38
2.2.3. Bielas.....	39
2.3. Reforço Estrutural com PRFC.....	39
2.3.1. Técnicas de aplicação de PRF em vigas	43
2.3.2. Métodos de ancoragem de PRF em vigas.....	45
2.3.3. Técnicas de aplicação de reforços de PRFC em consolos.....	51
2.3.4. Métodos de ancoragem de reforços de PRFC em consolos	53
2.4. Desempenho Estrutural de Consolos Reforçados com PRFC.....	57
2.4.1. Técnica EBR sem sistemas de ancoragem	57
2.4.2. Técnica EBR com sistemas de ancoragem	58
2.4.3. Modos de ruptura.....	59
2.5. Prescrições normativas.....	60
2.5.1. Dimensionamento de consolos longos	60
2.5.2. Laminados de PRFC como reforço de estruturas em concreto armado	66
2.5.3. Chapas e conectores de aço	69
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	75
3.1. Modelo experimental.....	75
3.2. Sistema de ensaio.....	79
3.3. Instrumentação	80
3.4. Propriedades e características dos materiais	85
3.4.1. Fôrmas	85
3.4.2. Concreto	85

3.4.3. Aço	87
3.4.4. Laminado de Polímero Reforçado com Fibra de Carbono (PRFC).....	89
3.4.5. Resina epóxi	90
3.4.6. Chapas e parafusos de aço.....	91
3.5. Processo executivo do reforço dos consolos	92
3.5.1. Preparação da superfície.....	92
3.5.2. Aplicação do laminado de PRFC	94
3.5.3. Aplicação das ancoragens.....	95
4. RESULTADOS	98
4.1. Deslocamentos verticais	98
4.2. Abertura de fissuras	99
4.3. Bloco de compressão	101
4.4. Deformações nos laminados de PRFC	103
4.5. Escorregamento do laminado de PRFC	106
4.6. Deformação dos materiais e monitoramento de fissuras.....	108
4.7. Modos de ruptura	113
5. AVALIAÇÃO DAS RECOMENDAÇÕES NORMATIVAS	120
5.1. Previsão de resistência dos consolos reforçados.....	120
5.2. Deformação conforme o modelo por teoria de flexão	124
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	126
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	128

1. INTRODUÇÃO

Com o advento da utilização de estruturas pré-moldadas na construção civil, que se destacam pela praticidade, racionalidade, menor tempo de execução, maior padronização e melhor organização no canteiro de obras (Wagner *et al.*, 2015), os consolos tornam-se elementos estruturais presentes e fundamentais para o correto comportamento global de edificações. Esse elemento, por exemplo, é amplamente utilizado em construções industriais, edificações comerciais e residenciais, pontes e viadutos, infraestrutura urbana, além de armazéns e galpões (Figura 1.1). Sendo uma de suas principais funções a transferência de cargas de estruturas horizontais, como lajes e vigas, para o pilar.



a) Bobek *et al.* (2024)



b) Ivanova *et al.* (2016)



c) Bobek *et al.* (2024)



d) Ivanova *et al.* (2016)

Figura 1.1 - Empregabilidade dos consolos de concreto armado.

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), na norma ABNT NBR 6118 (2023), os consolos são classificados em três categorias conforme sua geometria, caracterizadas pela relação entre o posicionamento do carregamento (a) e a altura útil (d). Sendo divididos em consolos muito curtos, curtos e longos, a norma recomenda, além disso, modelos de cálculo específicos para cada consolo, sendo as recomendações mostradas na Figura 1.2.

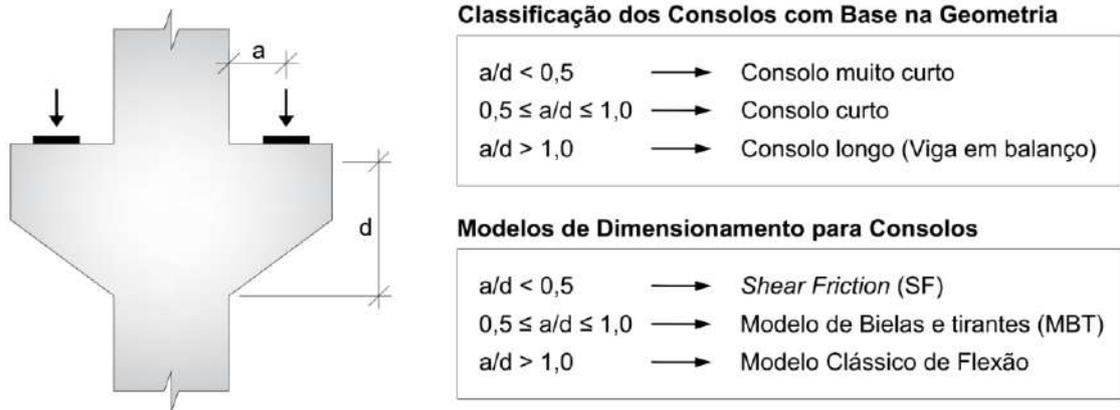


Figura 1.2 - Classificação dos consolos conforme a norma brasileira.

Ressalta-se que o *American Concrete Institute* (ACI), em sua norma para concreto estrutural, ACI 318-M (2019), recomenda o dimensionamento de consolos com a/d entre 1,0 e 2,0, utilizando o MBT. Essa abordagem apresenta certa divergência em relação à norma brasileira, refletindo a necessidade de estudos relacionados a consolos longos.

Pesquisas realizadas por Abdul-Razzaq e Dawood (2020), Wongtala *et al.* (2023) e Amani *et al.* (2024) investigaram a influência do a/d no comportamento estrutural dos consolos. Eles concluíram que para consolos longos os métodos baseados em cálculos de cisalhamento, como o SF, superestimam a resistência real desses elementos, enquanto os resultados do MBT estão mais próximos dos resultados experimentais, descrevendo o modo de ruptura com mais precisão (Considerando o esmagamento diagonal, fendilhamento e o tirante). Analisando esses fatores, observa-se na Figura 1.3 que o dimensionamento por MBT é o mais conservador, considerando apenas a variação do a/d .

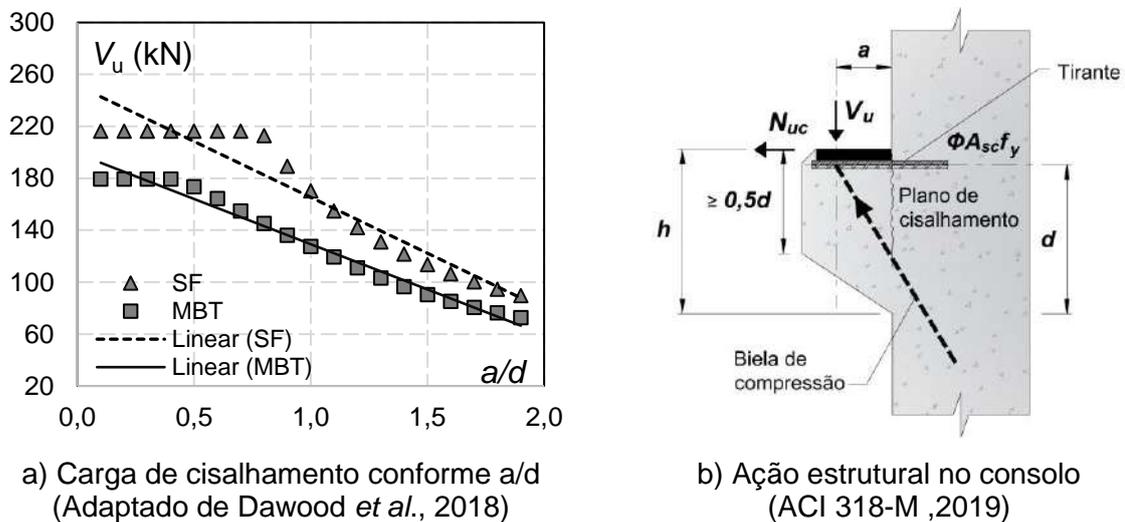


Figura 1.3 - Comportamento estrutural conforme modelos de cálculo SF e MBT.

Devido à ampla utilização de consolos, principalmente em edificações industriais e comerciais, onde as cargas de utilização são relativamente altas devido à presença de estruturas e equipamentos pesados, a possibilidade de colapsos globais ou locais não pode ser descartada. Isso ocorre porque tais elementos estruturais podem se deteriorar devido à degradação, mudança de carga de utilização, sobrecarga estrutural e esquemas inadequados de manutenção e inspeção (Dalton *et al.*, 2013). Ressalta-se que consolos são elementos complexos, uma vez que todos apresentam comportamentos estruturais que não se enquadram nas hipóteses de Euler-Bernoulli. Esses elementos são considerados especiais (ABNT NBR 6118, 2023), pois apresentam regiões de descontinuidade (regiões D), o que resulta em uma distribuição não linear de deformações ao longo de sua altura útil, mesmo no estágio elástico linear.

Considerando que alguns consolos estão localizados na região de transição para vigas em balanço, torna-se necessário investigar acidentes que envolvam tanto consolos quanto vigas, uma vez que problemas relacionados à flexão dessas estruturas também podem ocorrer. Em consolos curtos ou muito curtos, são mais frequentes os casos relacionados ao cisalhamento, fendilhamento e rupturas localizadas próximas à região dos apoios.

Na cidade brasileira de Maringá, situada no norte do estado do Paraná, um dos consolos presentes na estrutura que suporta uma caldeira industrial de biomassa apresentou uma manifestação patológica na região próxima ao apoio. Esse problema está frequentemente associado a erros de dimensionamento e execução que são agravadas pela complexibilidade desse elemento. Observa-se na Figura 1.4 o sistema de suporte do consolo e seu respectivo modo de ruptura.



a) Consolo de concreto armado projetado para suportar viga metálica de perfil W enrijecido



b) Ruptura localizada devido à posição inadequada do apoio

Figura 1.4 - Caso de ruptura localizada em consolo (Souza *et al.*, 2019).

Outro caso de rompimento, desta vez por cisalhamento, ocorreu em Barueri-SP. Um laudo do Instituto de Criminalística constatou irregularidades no projeto e na execução dos pré-moldados utilizados. Fotos presentes no estudo realizado pelos peritos mostram que os consolos se soltaram e a viga, que estava entre eles, caiu, assim como as placas pré-moldadas que serviriam como paredes (Galvão e Giacomoni, 2020). A Figura 1.5 mostra uma das regiões onde a ruptura aconteceu.



a) Pilares sem os consolos



b) Local de desprendimento

Figura 1.5 – Caso de ruptura de cisalhamento em consolo (Galvão e Giacomoni, 2020).

Casos de colapsos parciais ou totais de estruturas devido ao rompimento de vigas também são ocorrências registradas. Em Santa Catarina, conforme matéria do G1 publicada em 2025, um edifício foi evacuado após o rompimento de uma viga (Caldas e Fernandes, 2025). Outra ocorrência, noticiada pelo jornal O Globo (2021), foi o desabamento de um edifício em Surfside, nos Estados Unidos. Segundo um perito, três anos antes do colapso já haviam sido identificadas evidências de rachaduras e desmoronamento em pilares e vigas do estacionamento localizado sob o prédio de doze andares. Com isso, tornou-se necessário o estudo sobre a recuperação e reparo dessas estruturas.

Em relação ao estudo do reforço de consolos, Bobek *et al.* (2024) destacam que muitas edificações construídas com peças pré-moldadas foram erguidas há décadas, o que torna o estudo de consolos essencial nessa área da engenharia. Para o reparo e reforço dessas estruturas, buscam-se, geralmente, soluções que prolonguem a vida útil dos consolos, aumentem sua capacidade de carga, reduzam deformações e limitem a propagação de fissuras. Alguns métodos já eram empregados no passado, sendo quatro deles mostrados na Figura 1.6.

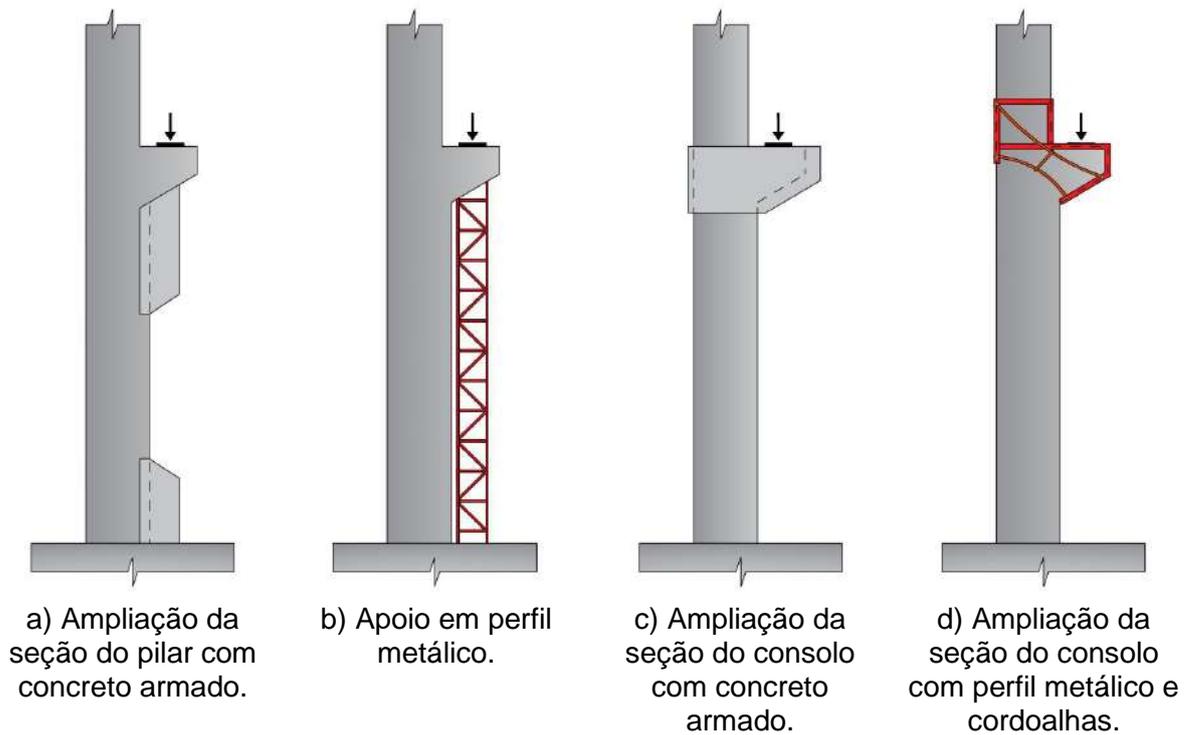


Figura 1.6 - Métodos tradicionais de reforço para consolos (Adaptado de Vaněk, 1985).

Os consolos são estruturas localizadas em regiões inadequadas para certos tipos de intervenções de reforço, como nas proximidades de alvenarias de vedação e elementos hidrossanitários, o que dificulta o acesso às partes laterais das mísulas. Atualmente, várias técnicas de reforço são opções viáveis para consolos, como chapas metálicas, protensão e Polímeros Reforçados com Fibras (PRF), especialmente com fibras de carbono (PRFC), em forma de mantas ou laminados (Figura 1.7). Segundo Yang *et al.* (2019), algumas dessas técnicas apresentam custos mais elevados em comparação ao PRFC, devido à maior mobilização de materiais. Além disso, a aplicação externa desse material se mostra uma boa alternativa para o reforço dessas estruturas (Ivanova e Assih, 2016).



a) Chapa de aço
(Techniques, 2025)

b) Protensão
(Voumard, 2011)

b) PRFC
(Romanichen e Sousa, 2019)

Figura 1.7 - Métodos atuais de reforço para consolos.

Romanichen e Souza (2019) afirmam que uma das principais técnicas de recuperação e reforço de estruturas é a aplicação externa de PRF, da qual destaca-se a fibra de carbono, que é encontrada no mercado em configurações de mantas, laminados e barras. Conforme Bobek *et al.* (2024) em consolos a aplicação do PRFC é realizada nas direções diagonal, vertical e horizontal (Figura 1.8), sendo vistas aplicações híbridas em algumas bibliografias, sendo um exemplo os estudos de Sayhood *et al.* (2016).

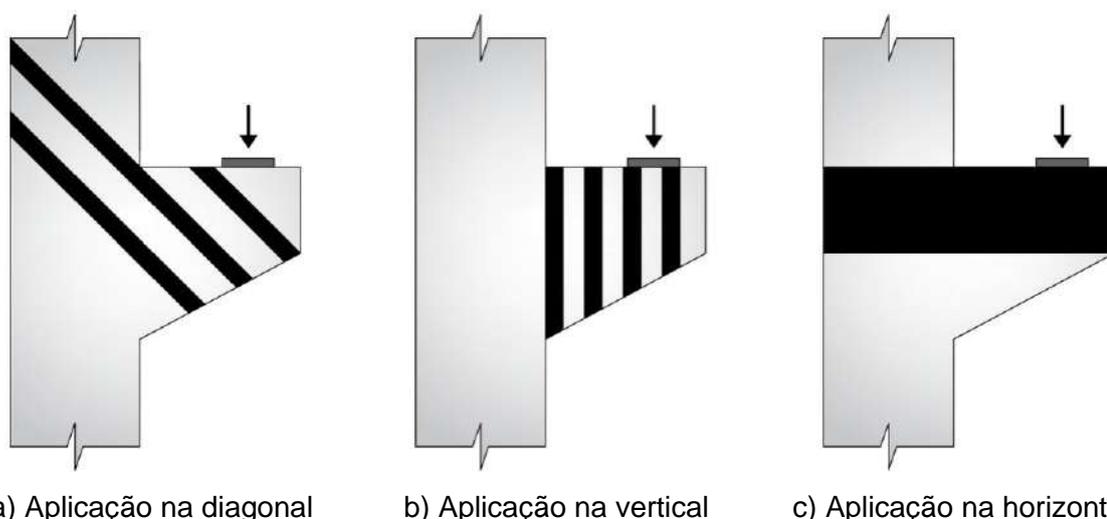


Figura 1.8 - Aplicação de PRFC em consolos de concreto armado (Bobek *et al.*, 2024).

Souza e Ripper (2009) destacam que as técnicas de reforço utilizando PRFC representam um avanço significativo na engenharia, sendo descritas como soluções simples, resistentes e duráveis. Os autores comparam o compósito com outras metodologias, como o aumento das seções mediante a aplicação de concreto projetado e/ou argamassas modificadas, e o reforço com chapas de aço coladas ao concreto, ressaltando as vantagens superiores do PRFC.

Um estudo de revisão conduzido por Siddika *et al.* (2019) evidenciou a eficácia dos PRFC em estruturas e identificou que a técnica de aplicação mais utilizada na pesquisa, especialmente em vigas, é o *Externally Bonded Reinforcement* (EBR), sendo um exemplo de aplicação mostrado na Figura 1.9. Ressalta-se que, em consolos curtos, essa técnica também é predominantemente utilizada, sendo vista em consolos utilizando o PRFC, como observado nos trabalhos experimentais de Mohamad-Ali e Attiya (2012), Ivanova *et al.* (2015), Abdulrahman *et al.* (2021), Shadhan e Kadhim (2015), Al-Kamaki *et al.* (2018) e Abdulkader *et al.* (2018).

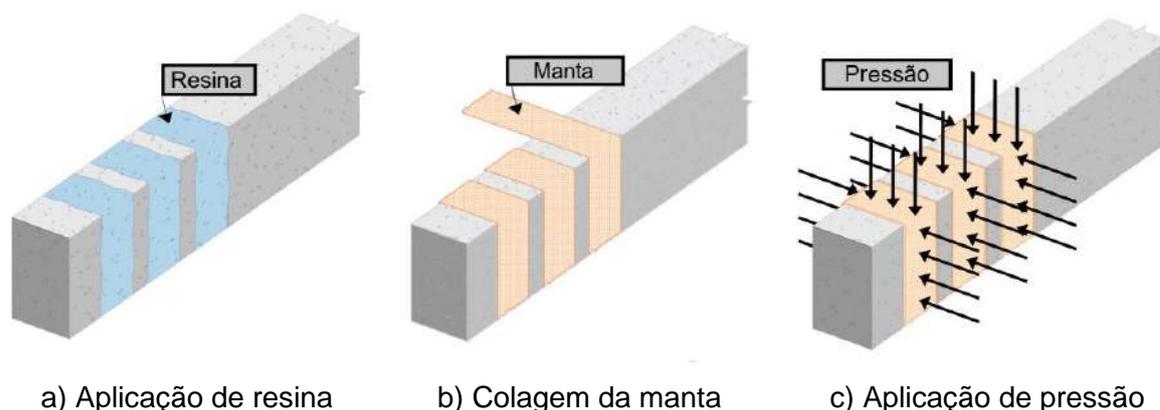


Figura 1.9 - Aplicação de reforço pela técnica EBR (Adaptado de Maciel *et al.*, 2024).

As limitações intrínsecas dos consolos tornam a aplicação externa de reforços, cuja técnica mais utilizada é o EBR, uma tarefa complexa e suscetível a falhas, o que compromete o desempenho máximo dos laminados ou mantas utilizados como reforço. Além disso, rupturas prematuras, como o descolamento, foram observadas por Neupane e Nagai (2017), Siddika *et al.* (2019) e outros autores.

Para assegurar uma integração eficaz entre o consolo e o reforço, bem como um comportamento adequado do material, autores como Shadhan e Kadhim (2015) recomendam o uso de métodos de ancoragem. Tais metodologias agem como suportes para atenuar o incremento de resistência proporcionado pelo reforço, além de proporcionar maior segurança no comportamento estrutural do consolo reforçado. O estado da arte a respeito de consolos reforçados com PRFC, sendo o material limitado a fibra de carbono devido ao objetivo desta pesquisa, concentra seus estudos em elementos cuja relação a/d está no intervalo entre 0,4 e 1,0 (Figura 1.10), conforme observado nos estudos de Neupane e Nagai (2017), Ivanova *et al.* (2015), Abdulrahman *et al.* (2021), Al-Kamaki *et al.* (2018), Souza *et al.* (2019), Albegmpri (2023), El-Maaddawy e Sherif (2014), Shakir *et al.* (2023), Shadhan e Kadhim (2015), Sayhood *et al.* (2016), Mohamad-Ali e Attiya (2012), Elgwady *et al.* (2005), Ibrahim *et al.* (2024), Abdulqader *et al.* (2018) e Campione *et al.* (2005). Esse intervalo de valores se limita ainda mais quando é empregada a ancoragem do reforço, sendo perceptível uma lacuna de estudos sobre a utilização conjunta de reforços e sistemas de ancoragem em consolos com a/d maior que um e menor ou igual a dois.

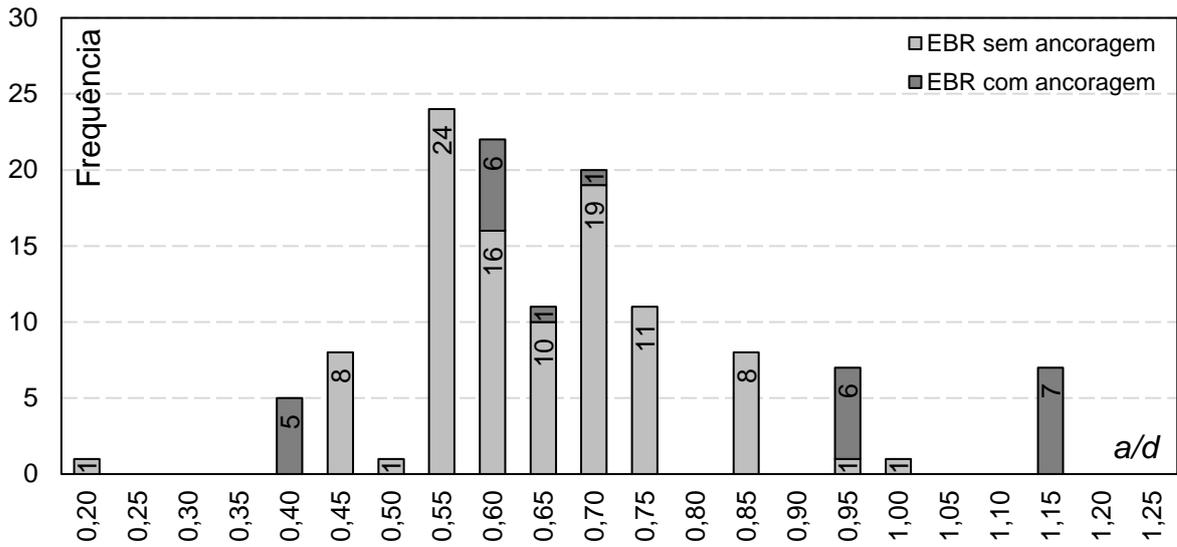


Figura 1.10 - Investigação de consolos reforçados com PRFC em função do a/d .

Métodos de ancoragem demonstram desempenho promissor em consolos reforçados com PRFC. No entanto, há uma escassez de estudos sobre sua aplicação, sendo observadas falhas por descolamento em alguns testes envolvendo ancoragem (Shadhan e Kadhim, 2015; El-Maaddawy e Sherif, 2014). Dentre as abordagens inovadoras, destaca-se o método *Hybrid Bonded* (HB), ainda não aplicado a consolos. Segundo Wu *et al.* (2010), essa técnica combina de forma integrada mecanismos como adesão química, atrito e travamento mecânico na interface de ancoragem entre o reforço e o concreto. A Figura 1.11 mostra uma representação esquemática dessa aplicação em consolos.

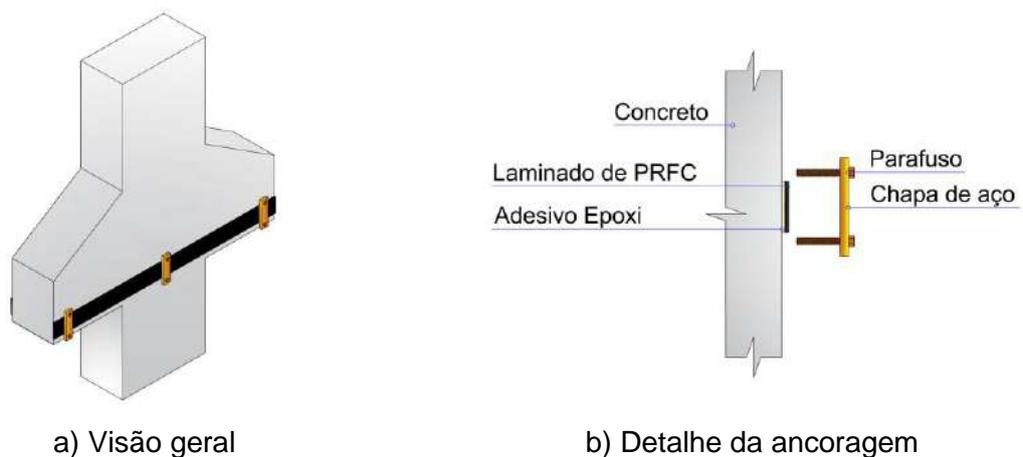


Figura 1.11 - Método de ancoragem HB-PRFC em consolos reforçados.

Outra abordagem pouco explorada em consolos é a utilização de laminados de PRF sobrepostos e aplicados com resina epóxi sobre o material de reforço. Abrantes *et al.* (2025) investigaram dois tipos de sobreposição em ensaios localizados na região de

reforço (Figura 1.12), determinando, por meio de experimentos, que a configuração de colagem mais eficiente consiste na aplicação de dois laminados laterais, dois laminados sobrepostos aos dois anteriores e ao reforço principal, além de um laminado perpendicular às cinco lâminas anteriores, denominado configuração de colagem FT.

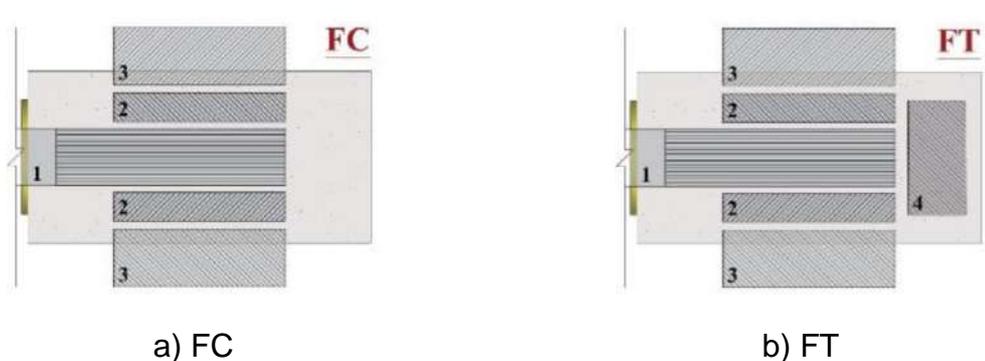


Figura 1.12 - Configurações de colagem dos laminados (Abrantes *et al.*, 2024).

Ressalta-se que, embora os métodos de ancoragem possam evitar falhas prematuras, os mesmos também podem introduzir novos modos de ruptura. Em estruturas reforçadas com a ancoragem HB-PRF, por exemplo, essas falhas podem ocorrer no concreto, por ruptura do tipo *concrete pryout*, nos conectores e na chapa, por escoamento, e no PRF por rasgamento causado pelos conectores. Sendo necessário o dimensionamento dos componentes do método, para assim evitar a má utilização do reforço e da ancoragem.

A Federação Internacional do Concreto (*Fédération Internationale du Béton - FIB*) no seu relatório técnico *fib Bulletin 90* (2019), fornece diretrizes para o projeto e construção de estruturas em concreto armado reforçadas com PRF. Além disso, a ACI 440.2R (2017) e o Eurocode 2 (2023), este último regido pelo *Comité Européen de Normalisation* (CEN), apresentam recomendações sobre o uso e aplicação desses materiais, conferindo credibilidade à metodologia de reforço estrutural com PRF.

1.1. Motivação

Uma falha comum no reforço de vigas utilizando a técnica EBR é o descolamento, não sendo uma ruptura desejável, já que a resistência proporcionada pode não ser totalmente desenvolvida (Siddika *et al.*, 2019). Soluções que podem retardar, ou até prevenir as rupturas prematuras são os métodos de ancoragem. Em consolos curtos esse problema é intensificado devido às limitações de geometria (Alabdulhady e Sneed,

2019) e descontinuidade de tensões ocasionadas por significativas tensões de cisalhamento e geometria (ABNT NBR 6118, 2023), entretanto consolos com a/d entre 1 e 2, denominados longos, tendem a ser um meio termo entre consolos curtos e uma viga em balanço, e a ausência de resultados nessa faixa de a/d (AbdulRazzaq e Dawood, 2020) não permite que saibamos como o reforço e a ancoragem vai se comportar nessa região de transição.

Foi analisada na bibliografia a utilização de consolos reforçados com PRFC na horizontal, com variação da taxa de armadura de flexão entre 0,31% e 2,1%, observando-se uma tendência de queda no incremento de resistência à medida que as taxas aumentavam. Os únicos espécimes que não seguiram esse comportamento foram os consolos com concreto de alta resistência, indicando que a eficácia do reforço pode ser reduzida em seções excessivamente armadas, tornando o estudo desse parâmetro importante.

Além disso, existe uma distinção nas recomendações de cálculo de consolos longos oferecidas pela ACI 318-M (2019) e pela ABNT NBR 6118 (2023). A primeira aborda seu dimensionamento por meio do MBT, enquanto a segunda utiliza as equações de flexão. Com isso, esta pesquisa discute a aplicação das duas metodologias, aliadas às recomendações de cálculo da ACI 440.2R (2017). A proposta é realizar uma análise comparativa entre ambas as abordagens, buscando uma melhor compreensão do comportamento e do reforço dessas estruturas.

Portanto, esta pesquisa inclui um programa experimental que aborda variações de estudos fundamentais para o entendimento da técnica de reforço à flexão com o uso de PRF e sistemas de ancoragem em consolos longos. Vale ressaltar que as informações coletadas a partir desse trabalho, poderá influenciar novas pesquisas em consolos longos com outros a/d e em vigas em balanço, sendo uma solução para a problemática envolvendo a pequena quantidade de pesquisas sobre o assunto.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Geral

Esta pesquisa tem como objetivo analisar experimentalmente o comportamento e o desempenho de laminados de polímeros reforçados com fibra de carbono, ancorados nas extremidades pelos métodos *Hybrid Bonded* e FT em ambas as faces, como reforço à flexão de consolos longos em concreto armado.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Comparar a eficiência estrutural dos métodos de ancoragem HB e FT na maximização da resistência à flexão de consolos longos reforçados com PRFC.;
- Investigar como variações na taxa de armadura longitudinal afetam o ganho de resistência proporcionado pelo reforço com laminados de PRFC;
- Avaliar a capacidade preditiva dos modelos normativos (Modelo de Bielas e Tirantes - ACI 318 e teoria da Flexão - ACI 440.2R) em estimar a resistência à flexão observada experimentalmente nos consolos reforçados com PRFC;
- Documentar os modos de ruptura observados nos ensaios, com ênfase na interação entre a armadura, o reforço com PRFC e os sistemas de ancoragem;

1.2.3. Estrutura do Trabalho

Esta dissertação é composta por seis capítulos, além das Referências Bibliográficas, conforme descrito sucintamente a seguir.

O Capítulo 1 apresenta a introdução do trabalho, oferecendo uma contextualização e a justificativa do tema proposto. Este capítulo está subdividido nas seguintes seções: Introdução, Objetivos e, por fim, a Descrição da Estrutura do Trabalho.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre o reforço de consolos em concreto armado. São abordados diversos aspectos, incluindo a definição de consolos conforme as normas, os mecanismos de aplicação dos reforços, os sistemas de ancoragem utilizados, além de uma análise de pesquisas focadas no reforço de consolos e seus respectivos resultados. Ao final, são apresentadas as recomendações normativas e documentos técnicos para o dimensionamento e previsão de resistência.

O Capítulo 3 descreve o programa experimental, no qual são apresentados o modelo da pesquisa, a metodologia de aplicação dos extensômetros nas armaduras, no reforço e no concreto, bem como os procedimentos de ensaio dos corpos de prova. Além disso, discute-se uma série de aspectos fundamentais para a execução da pesquisa.

O Capítulo 4 apresenta os resultados dos experimentos realizados. Dentre os resultados estão os deslocamentos verticais, a abertura de fissuras, as deformações de compressão, as deformações nos laminados de PRFC, o escorregamento dos

laminados, as deformações nas armaduras e os modos de ruptura observados.

O Capítulo 5 traz uma avaliação das recomendações normativas para o dimensionamento de estruturas reforçadas com PRFC. São analisados aspectos como a deformação de descolamento dos laminados, as previsões de resistência dos consolos reforçados utilizando a teoria da flexão e o MBT, além dos modos de ruptura.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões da dissertação e sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, são apresentados os principais estudos e pesquisas relacionados ao reforço de consolos de concreto armado utilizando PRFC, com enfoque nos sistemas de ancoragem empregados. Ressalta-se que, nas figuras em que não há indicação explícita do sentido da força cortante aplicada, os consolos estão representados em posição invertida em relação à sua configuração real. Além disso, são discutidas todas as prescrições normativas relevantes para o objetivo desta dissertação, abrangendo desde o dimensionamento e detalhamento de consolos até o dimensionamento do reforço, bem como o dimensionamento do sistema de ancoragem, utilizando tanto a norma nacional quanto normas internacionais.

2.1. Consolos longos

Um estudo conduzido por Canha *et al.* (2014) evidenciou que os consolos curtos são estruturas caracterizadas por um amplo número de parâmetros que influenciam seu comportamento estrutural. Entre esses parâmetros, destacam-se a relação a/d e a proporção de distribuição das armaduras secundárias, expressa como $2d/3$. Para consolos longos, é possível utilizar os mesmos parâmetros, os quais são mostrados na Figura 2.1.

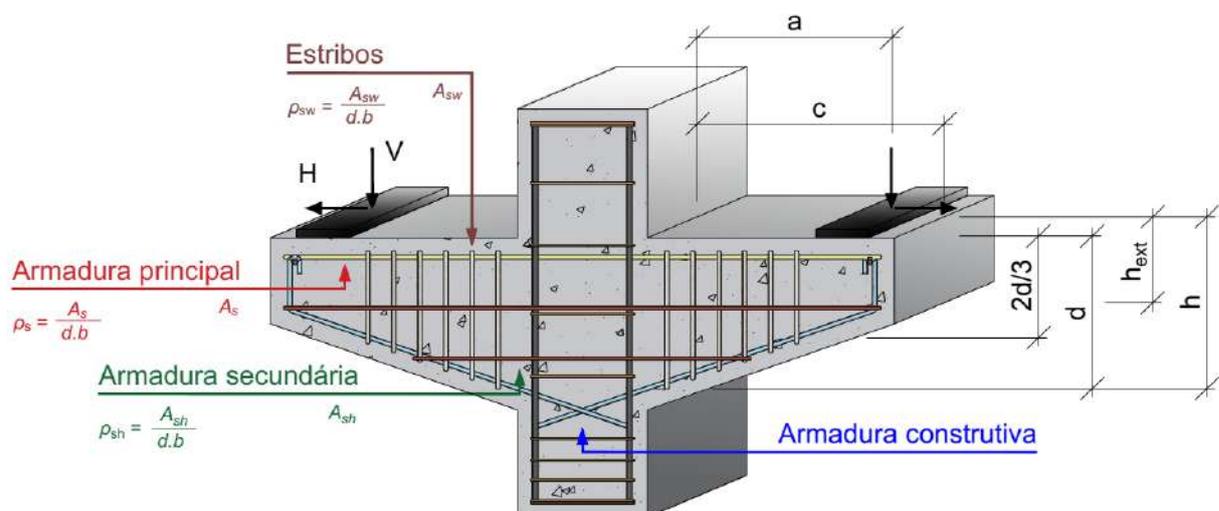


Figura 2.1 - Dimensões de consolos longos (Adaptado de Canha *et al.*, 2014).

2.1.1. Regiões de descontinuidades de tensões

No âmbito da construção civil, no que se refere ao dimensionamento de estruturas em

concreto armado, a padronização de equações e rotinas de cálculo é um mecanismo que oferece praticidade ao profissional que as utiliza. No entanto, é crucial enfatizar que determinados elementos estruturais demandam uma atenção mais aprofundada, verificando se as regras padrões funcionam nesses elementos.

Consolos longos, além dos curtos e muito curtos, são elementos que justificam a ideia de que certas hipóteses de cálculo não funcionam em sua totalidade. A teoria de Euler-Bernoulli, por exemplo, descarta a descontinuidade na distribuição de tensões que ocorrem em consolos. Além disso, outros fatores preponderantes para o cálculo são descartados.

Em consolos as deformações de distorção podem ser ocasionadas por interações não consideradas no cálculo, sendo estas causadas, por exemplo, pela força cortante. Com isso, normas como a ABNT NBR 6118 (2023) e a ACI 318-M (2019) subdividiram as estruturas por regiões, onde em algumas as hipóteses de Euler-Bernoulli são válidas, enquanto em outras partes não o são. Essas regiões são denominadas como regiões B (referentes a Bernoulli) e regiões D (de descontinuidade).

O Princípio de Saint-Venant postula que as tensões resultantes da força axial e da flexão induzem deformações não lineares, cujo estado de linearidade deformacional é restabelecido a uma determinada distância do ponto de aplicação da carga (Sato, 2015). A Figura 2.2 mostra a distribuição de tensões em uma placa sujeita a uma força concentrada, onde percebe-se que a zona de descontinuidades de tensões se limita ao comprimento da base do elemento onde essa força está sendo aplicada.

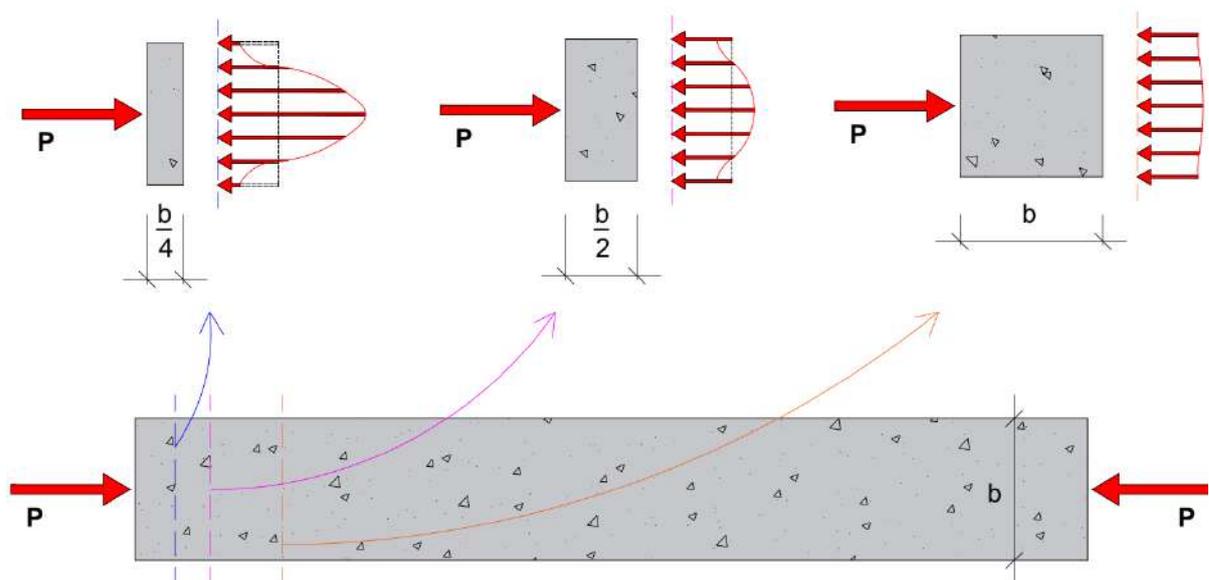


Figura 2.2 - Princípio de Saint-Venant (Adaptado de Beer *et al.*, 2015).

Conforme a ABNT NBR 6118 (2023), e com base no princípio de Saint-Venant, a distribuição de deformações não lineares pode ocorrer devido à descontinuidade geométrica (a), descontinuidade estática (b) e em regiões onde ocorrem as duas descontinuidades (c). Observa-se na Figura 2.3 que consolos, por sua geometria e estado de aplicação de carga, são elementos que se enquadram na categoria em que há as duas causas para a ocorrência de deformações não lineares.

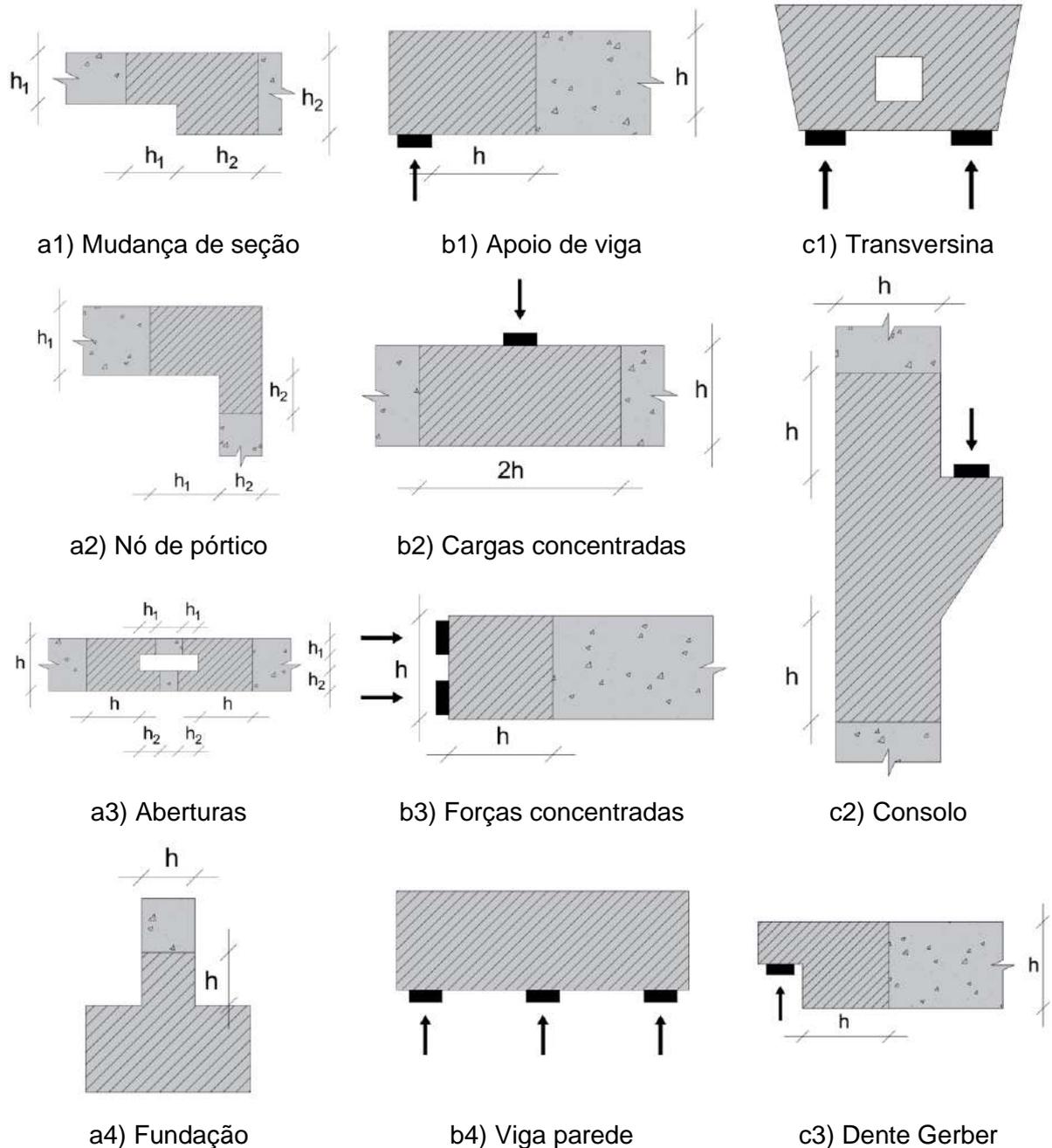


Figura 2.3 - Situações típicas de regiões *D* (Adaptado da ABNT NBR 6118, 2023).

A Figura 2.4 mostra uma visão geral das disposições de tensões de tração e

compressão em consolos curtos e longos, respectivamente. É perceptível que, em ambas as imagens, o comportamento é similar nos pontos críticos que geram a descontinuidade de tensões, sendo um diferencial o ângulo de inclinação da biela de compressão. Ressalta-se a importância da utilização do chanfro, uma vez que as tensões de compressão partem do apoio até a região do pilar de forma inclinada, tornando desnecessária a geometria do consolo sem essa técnica.

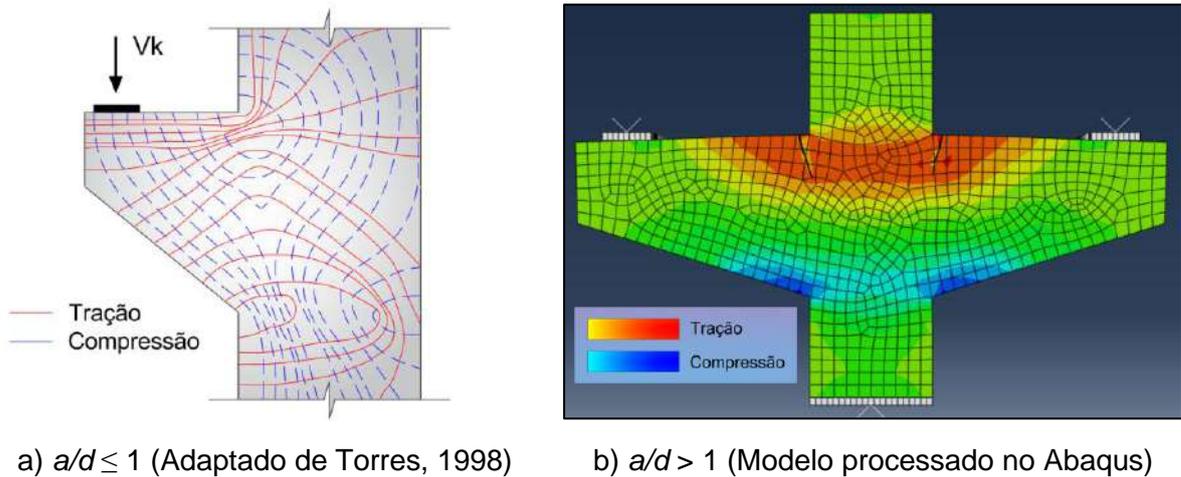


Figura 2.4 - Análise elástico linear em consolos.

2.1.2. Modos de ruptura

Em sua pesquisa sobre consolos, Araújo *et al.* (2017) argumentam que os modos de ruptura dos consolos são cruciais para o processo de dimensionamento, sendo importante que a caracterização da falha do elemento e seu subsequente dimensionamento se baseiem no modo que exija a menor quantidade de energia. Com isso, é observado na Tabela 2.1 as causas dos modos de ruptura e, também, na Figura 2.5 são mostradas as manifestações patológicas ao longo dos consolos.

Quadro 2.1 - Modos de ruptura em consolos e possíveis causas (Shakir, 2023).

Modo de ruptura	Causas
Flexão	Taxa de armadura principal escassa. $a/d > 1$.
Fendilhamento	Baixa resistência a compressão com alta taxa de armadura principal. Pequena quantidade de aço atravessando a escora.
Cisalhamento	Pequena taxa de armadura transversal. $a/d < 1$.
Falha de ancoragem	Perda de ancoragem. Deficiência no detalhamento do comprimento embutido de aço.
Ação horizontal	Consolo com pequena espessura. Alto valor de carga horizontal.
Esmagamento no apoio	Mal posicionamento da base de sustentação da carga.

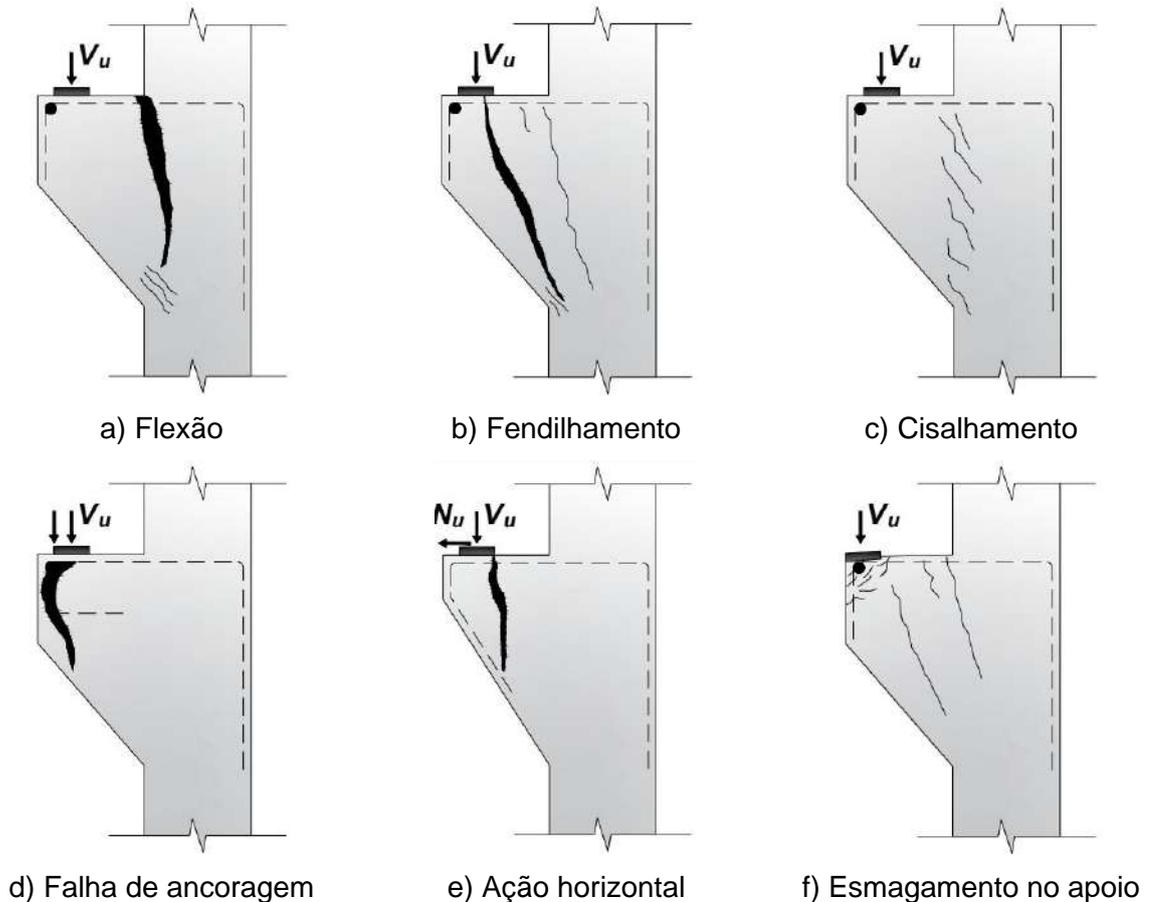


Figura 2.5 - Representação dos modos de ruptura (Adaptado de Shakir, 2023).

2.2. Método de bielas e tirantes

No final do século XIX, observou-se durante o desenvolvimento de procedimentos de cálculo para estruturas de concreto armado, que as teorias de flexão eram inadequadas em estruturas sujeitas a significativas tensões de cisalhamento (Su e Chandler, 2001). Com isso, Ritter (1899) desenvolveu um modelo que destaca o papel das armaduras diagonais na melhoria da capacidade da resistência ao cisalhamento, formando assim uma analogia de treliça plana (Abbood, 2023). Além disso, em 1902, Mörsch refinou o modelo de Ritter (Figura 2.6). Onde, demonstrou que as forças diagonais discretas no modelo de Ritter podem ser idealmente apresentadas como um campo contínuo de compressão diagonal (Brown, 2005).

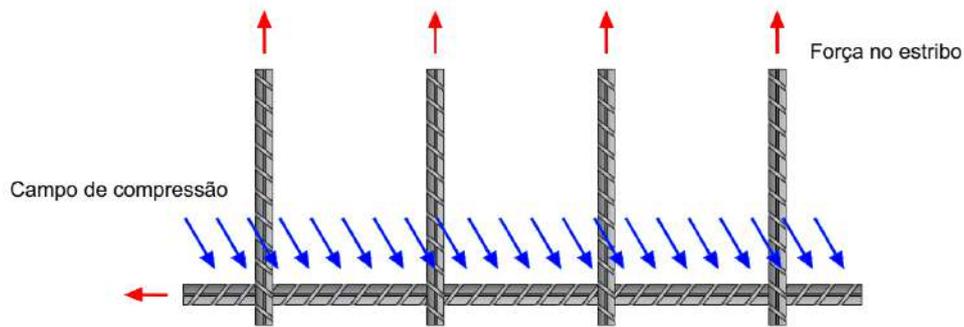


Figura 2.6 - Adaptação do modelo de Ritter (Adaptado de Brown, 2005).

Conforme Abbood (2023) o *Strut and Tie Model* (STM), em português Modelo de Bielas e Tirantes (MBT), é um procedimento de cálculo utilizado em estruturas complexas de concreto armado e protendido, que simplifica as trajetórias das tensões visualizando as mesmas em um modelo de treliças. No MBT a treliça é idealizada em duas ou três dimensões e a mesma é estruturada em nós (transmissão das forças entre as bielas e os tirantes), tirantes (tensões de tração) e bielas (tensões de compressão). Observa-se na Figura 2.7 os componentes do modelo são identificados e a posição foi idealizada conforme o seu carregamento e o tipo de estrutura.

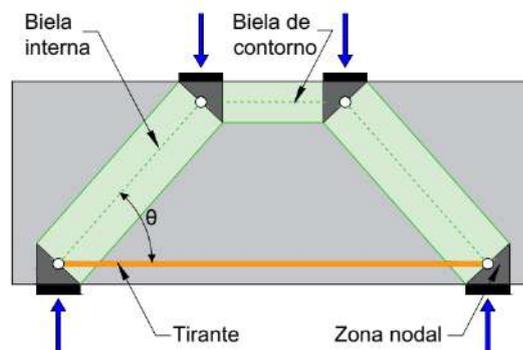


Figura 2.7 - Descrição do MBT (ACI 318-M, 2019).

A treliça idealizada é isostática, onde os nós concentram as forças externas aplicadas ao elemento estrutural, assim como as reações de apoio, resultando em um sistema auto equilibrado. Essas reações de apoio são determinadas por meio de uma análise, que pode ser linear ou não linear, realizada previamente (ABNT NBR 6118, 2023).

A norma ABNT NBR 6118 (2023) recomenda que o ângulo de inclinação das bielas seja tal que a tangente esteja compreendida entre 0,57 e 2 em relação ao eixo da armadura longitudinal do elemento estrutural. Ou seja, para que o dimensionamento seja mais econômico e realístico os ângulos precisão estar compreendidos entre 29,68° e 63,44°. Conforme a ACI 318-M (2019) o processo de cálculo do MBT é composto por quatro passos, sendo eles:

- Isolar a região D do restante da estrutura, considerando as forças externas e internas que atuam nessa área específica;
- Calcular as forças resultantes em cada limite da região D ;
- Adotar o modelo e calcular as forças nas bielas e tirantes para transferir as forças resultantes através da região D ;
- Projetar as bielas, tirantes e zonas nodais para que tenham resistência suficiente.

2.2.1. Regiões nodais

Para a ABNT NBR 6118 (2023) em torno dos nós existe um volume de concreto, designado como zona nodal, onde é verificada a resistência necessária para a transmissão das forças entre as bielas e os tirantes. Schlaich *et al.* (1987) classificam os nós em singulares e contínuos. Os nós singulares equilibram rapidamente as forças dos tirantes e bielas em uma área pequena ao redor do ponto nodal teórico, geralmente devido a cargas concentradas e descontinuidades geométricas. Em contraste, os nós contínuos dispersam as forças ao longo de uma área mais extensa, sendo menos críticos para a verificação das tensões no concreto. No entanto, para nós contínuos como o CCT, é essencial verificar as tensões de tração no campo de tensão do concreto para assegurar uma ancoragem segura das armaduras.

As recomendações normativas categorizam os nós de acordo com a quantidade de bielas e tirantes que se cruzam neles, utilizando "C" para compressão e "T" para tração (Figura 2.8). Quando a biela não está sujeita a tensões transversais de tração, o nó é denominado CCC. Quando surgem tensões transversais de tração, a nomenclatura varia dependendo do número de tirantes que cruzam a biela, sendo que um tirante resulta em um nó CCT, dois tirantes resultam em um nó CTT, e três tirantes resultam em um nó TTT, sendo o último nó evitado em modelos devido algumas particularidades que possam dificultar seu cálculo em dimensionamento e previsões.

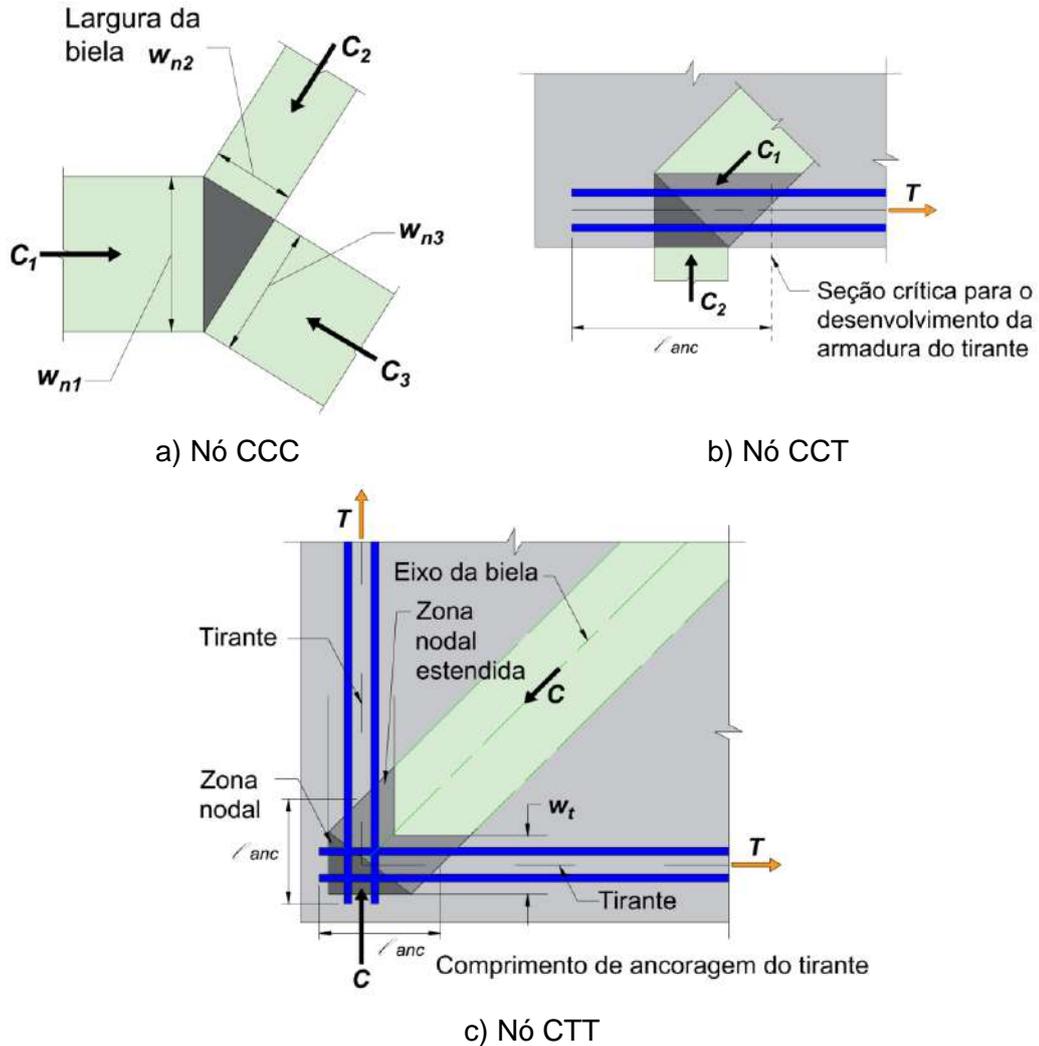


Figura 2.8 - Representações típicas de geometrias nodais (ACI 318-M, 2019).

Para os nós tipo TTT, Mutoni e Ruiz (2006) recomendam uma análise mais detalhada na zona de ancoragem das barras. Alternativas como o uso de barras dobradas geralmente asseguram um bom desempenho do nó. No entanto, nesses casos, pode ser necessário garantir o confinamento adequado, devido ao estado de tensões presentes nessas regiões.

2.2.2. Tirantes

Os tirantes referem-se às zonas tensionadas, ou seja, às armaduras presentes na região tracionada, e são geralmente representados por linhas contínuas nos modelos. A tensão nos tirantes é limitada pela resistência à tração do aço. As armaduras devem ser dimensionadas de modo que a resistência do aço seja superior à força de tração no tirante. Deve-se dar atenção à ancoragem das armaduras nas zonas nodais para desenvolver toda a resistência das barras (Abra, 2017).

2.2.3. Bielias

Como observado anteriormente, as bielias são os elementos da treliça projetados para suportar as tensões de compressão e podem assumir três configurações diferentes, conforme mostrado na Figura 2.9. Para a ABNT NBR 6118 (2023) os eixos das bielias devem ser escolhidos de maneira a se aproximar o máximo possível das tensões principais de compressão e dos tirantes, dos eixos das armaduras a serem efetivamente detalhadas.

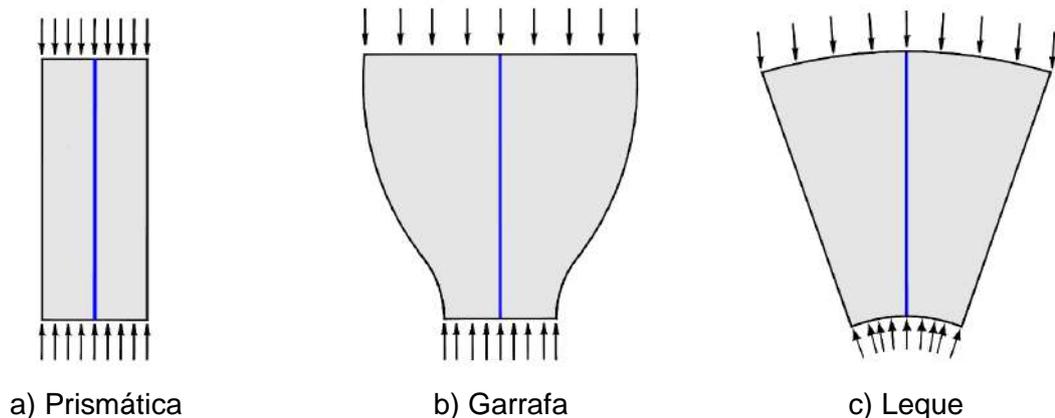


Figura 2.9 - Tipos de bielias (Adaptado de Bavaresco, 2016).

Os campos de tensão em leque e prismáticos não desenvolvem tensões transversais, sendo assim, aplica-se a resistência uniaxial do concreto. Se houver tensões transversais, fissuras ou barras de tração cruzando o estruturante, a resistência pode ser calculada com base nos valores fornecidos por Schlaich *et al.* (1987). O campo de tensão de compressão em forma de garrafa se aplica ao caso frequente de forças compressivas sendo introduzidas no concreto que não é reforçado na direção transversal. A dispersão das forças causa compressão biaxial ou triaxial sob a carga e tensões transversais mais distantes (Schlaich *et al.*, 1987).

2.3. Reforço Estrutural com PRFC

Na indústria da construção civil, um dos métodos de reforço mais utilizados é a aplicação de PRF em elementos estruturais. Esses compósitos podem ser encontrados de várias formas, incluindo laminados, mantas flexíveis com orientação de fibra em uma ou duas direções, e barras (*fib Bulletin 90*, 2019). Cada configuração é escolhida com base nos requisitos específicos de desempenho estrutural e no tipo de aplicação, proporcionando alta resistência, durabilidade e flexibilidade.

A frequente utilização intensiva de um determinado material em construções está geralmente relacionada ao seu custo-benefício. Segundo o *fib Bulletin 90* (2019), diversos fatores contribuem para o aumento da aplicação de PRF na indústria da construção civil, conforme apresentado na Quadro 2.2. No entanto, o relatório também aponta algumas desvantagens desses compósitos, enfatizando que o material deve ser utilizado com cuidado e não devem ser considerados como substituto direto do aço em aplicações de intervenção estrutural.

Quadro 2.2 - Vantagens e desvantagens do PRF (*fib Bulletin 90*, 2019).

Vantagens	Desvantagens
Imunidade a corrosão	Elásticos lineares até a ruptura (sem qualquer escoamento significativo ou deformação plástica, levando à redução da ductilidade)
Baixo peso (cerca de 1/4 do aço)	Custo várias vezes superior ao do aço
Aplicação em espaços confinados facilitada;	Alguns materiais FRP, por exemplo carbono e aramida, possuem coeficientes de expansão térmica diferentes do concreto;
Resistência a tração elevada;	Exposição a altas temperaturas pode causar degradação prematura e colapso.
Adaptação da rigidez conforme os requisitos de projeto;	
Alta capacidade de deformação;	
Aplicação fácil e rápida;	
Reduz perturbações de ocupação;	
Grande quantidade de geométricas e dimensões.	
Redução do custo de mão de obra.	

O PRF é encontrado no mercado em diferentes composições, pois possui em sua estrutura diversos tipos de fibras, tanto sintéticas quanto naturais, sendo algumas delas mostradas na Figura 2.10. Com isso, observa-se no gráfico que o PRFC é um material capaz de suportar tensões mais altas que os demais compósitos, além de ser mais rígido (Gudonis *et al.*, 2014).

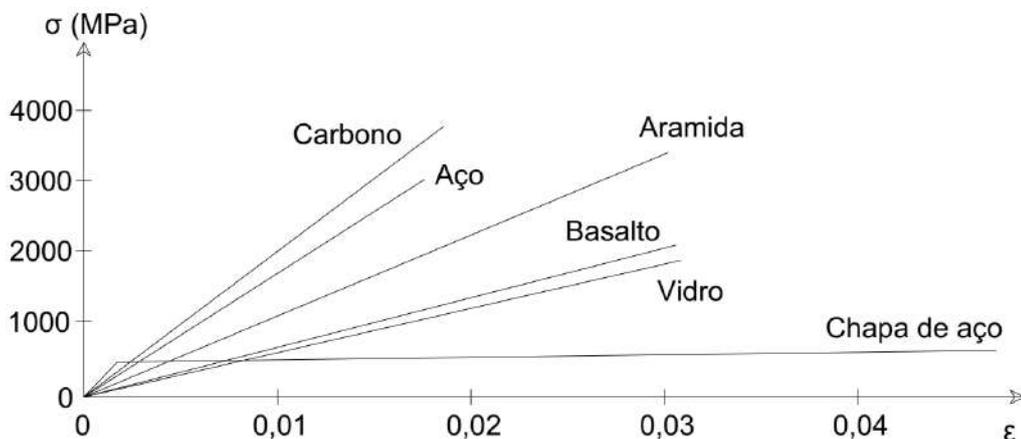


Figura 2.10 - Diagrama de tensão-deformação de PRF (*fib Bulletin 90*, 2019).

Na engenharia de recuperação e reforço de estruturas, são utilizadas frequentemente quatro tipos de fibras, nomeadamente fibras de carbono, vidro, aramida e basalto (*fib Bulletin 90*, 2019). As propriedades mecânicas básicas das fibras comumente utilizadas em sistemas de reforço são apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Propriedades mecânicas dos PRF (*fib Bulletin 90*, 2019).

Material		Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência a tração (MPa)	Tensão de tração final (%)
Carbono	Alta resistência	215 - 235	3500 - 4800	1,4 - 2,0
	Ultra resistência	215 - 236	4800 - 6000	2,0 - 2,3
	Alto módulo	350 - 500	2500 - 3100	0,5 - 0,9
	Módulo ultra alto	500 - 700	2100 - 2400	0,2 - 0,4
Vidro	E	70	1900 - 3000	3,0 - 4,5
	S	85 - 90	3500 - 4800	4,5 - 5,5
Aramida	Baixo módulo	70 - 80	3500 - 4100	4,3 - 5,0
	Alto módulo	115 - 130	3500 - 4000	2,5 - 3,5
Basalto		89 - 90	2500 - 3200	3,0 - 3,5
Aço		185	3070	1,7
Fibras naturais	Cânhamo	30 - 70	500 - 700	2,0 - 4,0
	Linho	30 - 40	500 - 1500	2,5 - 3,5
	Juta de java	30 - 50	500 - 900	1,5 - 2,0

Conforme a ACI 440.2R (2019) os diferentes tipos de PRF podem ser selecionados para o uso de acordo com as condições de uso da estrutura em análise. A norma americana informa que a seleção de um sistema PRF deve ser realizada com base no comportamento conhecido do material, além disso o profissional responsável deve observar informações fornecidas pelo fabricante. No Quadro 2.3 são apresentados os comportamentos conhecidos desse sistema.

Quadro 2.3 - Natureza dos sistemas de reforço (Adaptado da ACI 440.2R, 2019).

Sistema	Maior eficiência	Menor eficiência
Tolerância ao impacto	PRFA ¹ e PRFV ²	PRFC
Fluência e Fadiga	PRFC	PRFV

¹Polímero Reforçado com Fibra de Aramida; ²Polímero Reforçado com Fibra de Vidro.

As fibras de carbono são geralmente fabricadas em piche ou PAN. As fibras de piche, feitas de petróleo refinado ou piche de carvão, têm diâmetros de 9-18 µm e são estabilizadas por aquecimento. As fibras PAN, derivadas de poliácridonitrila, têm diâmetros de 5-8 µm. A estrutura dessas fibras varia conforme a orientação dos cristais, além disso, uma maior carbonização resulta em maior orientação e rigidez. Fibras de piche oferecem materiais de uso geral e alta resistência/módulo, enquanto as de PAN produzem materiais de alta resistência e alto módulo (*fib Bulletin 90*, 2019).

Para o uso do PRF no reforço de estruturas, é necessário um agente que forneça um caminho para a carga presente entre o substrato do concreto e o compósito. Conforme a *fib* Bulletin 90 (2019) o agente mais comum em estruturas de concreto é o adesivo epóxi. Para sua aplicação ser bem sucedida, é necessária uma especificação adequada sobre os materiais envolvidos, temperaturas e técnicas de aplicação, temperatura de cura, técnicas de preparação de superfície, expansão térmica e técnicas de fluência.

As propriedades típicas de adesivos epóxi usados em aplicações na área da engenharia civil são dadas na Tabela 2.2. Ressalta-se que a tabela fornece informações para o concreto e o aço, por uma questão de comparação.

Tabela 2.2 - Propriedades de adesivos epóxi, concreto e aço (*fib* Bulletin 90, 2019).

Propriedades (a 20°C)	Adesivo epóxi de cura a frio	Concreto	Aço
Densidade (kg/m ³)	1100 - 1700	2350	7800
Módulo de elasticidade (GPa)	0,5 - 20	20 - 50	205
Módulo de cisalhamento (GPa)	0,2 - 8	8 - 21	80
Coefficiente de Poisson	0,3 - 0,4	0,2	0,3
Resistência à tração (MPa)	9 - 30	1 - 4	200 - 600
Resistência ao cisalhamento (MPa)	10 - 30	2 - 5	200 - 600
Resistencia a compressão (MPa)	55 - 110	25 - 150	200 - 600
Deformação de tração final (%)	0,5 - 5	0,015	25
Energia de fratura (Jm ³)	200 - 1000	100	10 ⁵ - 10 ⁶
Coefficiente de expansão térmica (10°C)	25 - 100	11 - 13	10 - 15
Absorção de água: 7 dias 25°C (% p/p)	0,1 - 3	5	0
Temperatura de transição vítrea (°C)	50 - 80	-	-

Com isso, a tenacidade proporcionada pelo PRF em estruturas reforçadas motivou diversos estudos sobre sua aplicação. Na literatura, são observadas técnicas de aplicação em vigas, lajes, consolos e outras estruturas, principalmente em concreto armado. Além disso, também foram vistos métodos de ancoragem para garantir a eficiência do reforço. Ao longo deste capítulo, serão apresentadas as técnicas de aplicação e os métodos de ancoragem mais utilizados em vigas, técnicas amplamente estudadas, e em consolos, com destaque para os consolos reforçados com mantas/laminados de PRFC com orientação de aplicação na horizontal.

2.3.1. Técnicas de aplicação de PRF em vigas

2.3.1.1. *Externally Bonded Reinforcement* (EBR)

O EBR ou, em português, reforço colado externamente, é uma técnica de reforço estrutural bem difundido na construção civil. A colagem de compósitos com fibra em regiões tracionadas e de corte em estruturas de concreto armado é reconhecida como uma técnica eficaz e eficiente para aumentar a resistência e rigidez.

Estudos sobre essa técnica aplicada em elementos de concreto armado foram realizados ao longo dos anos. Pan e Wu (2014) estudaram sobre um modelo de aderência - deslizamento com o propósito de investigar o comportamento de PRF em conjunto com o concreto. Outros autores como Sayed-Ahmed *et al.* (2009) e Moghaddas e Mostofinejad (2019) também contribuíram com pesquisas utilizando compósitos de PRF colados.

Gribniak *et al.* (2017) estudaram sobre a colagem de PRF em vigas de concreto armado. Onde foram desenvolvidas quatro vigas reforçadas externamente por folhas de PRFC, aplicando-se na interface reforço e concreto, o adesivo epóxi. Em relação aos resultados, as rupturas das vigas foram frágeis como consequência do descolamento repentino do compósito.

Conforme a Figura 2.11 o reforço colado externamente introduz modos de falha adicionais em estruturas de concreto armado. Gribniak *et al.* (2017) demonstraram seis tipos de modos de falha, possuindo os dois primeiros uma morfologia idêntica, sendo a diferença o comportamento das zonas de tensões, sendo o primeiro causado por fissuras de cisalhamento ou flexão e o segundo causado pela fratura de cisalhamento em regiões limítrofes do reforço. Foram vistos em literaturas que o deslocamento do concreto junto ao reforço, também é nomeado de delaminação ou descolamento.

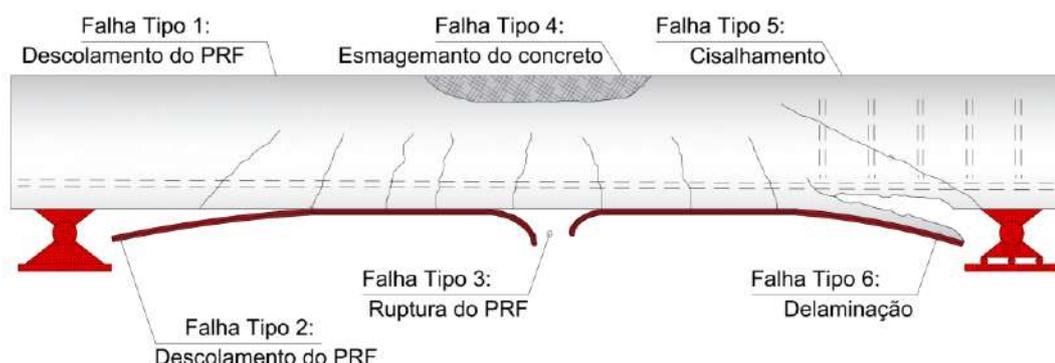


Figura 2.11 - Modos de ruptura em vigas com EBR (Adaptado de Gribniak *et al.*, 2017).

Arduini *et al.* (1997), Meier (1995), Buyukozturk e Hearing (1998) também atestaram em seus estudos os modos de falha pelo esmagamento do concreto (ocorrendo sem ou com o escoamento do aço), podendo ser resultados de uma boa trabalhabilidade do reforço, e também, pela ruptura e pelo descolamento do PRF (ocorrendo com o cobrimento do concreto ou sem).

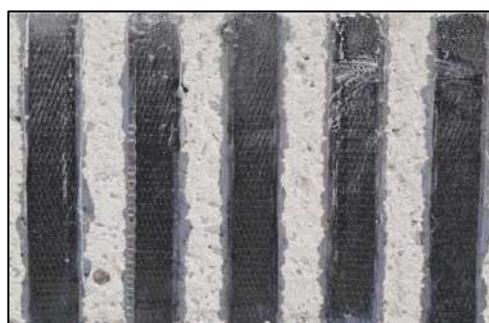
2.3.1.2. *Near-Surface Mounted* (NSM)

Conforme a ACI 440.2R (2017) e a *fib* Bulletin 90 (2019), os sistemas NSM envolvem a instalação de barras PRF, que podem ser retangulares ou circulares, em ranhuras cortadas na superfície do concreto, possuindo uma profundidade inferior à cobertura do concreto, e fixadas no lugar utilizando um adesivo. A norma americana também fornece diretrizes detalhadas para a aplicação dessa técnica.

Alwash *et al.* (2021) investigaram o reforço ao cisalhamento de vigas de concreto armado, variando componentes como o tipo de adesivo e material de PRFC, mostrados na Figura 2.12. Os resultados indicaram que a técnica utilizando uma camada de mantas de PRFC obteve um significativo incremento de resistência de 101% com o adesivo epóxi, enquanto a preparação com adesivo *Cement-Based Adhesives* (CBA) alcançou um incremento próximo, de 97%. No caso de aplicações utilizando laminados, o adesivo epóxi demonstrou ser o mais eficaz, proporcionando um aumento de resistência de 108%, enquanto o adesivo CBA alcançou 70%. Em relação aos modos de falha observados nos reforços estudados, foi constatada a ruptura do PRFC nos espécimes com adesivo CBA.



a) Laminados de PRFC

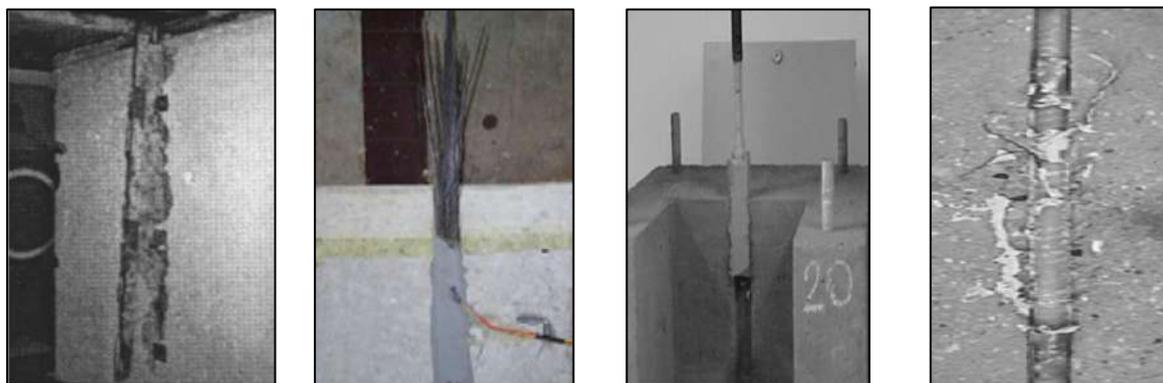


b) Mantas de PRFC

Figura 2.12 - Técnica NSM em vigas (Alwash *et al.*, 2021).

Outras pesquisas científicas foram conduzidas utilizando a técnica NSM, destacando-se estudos realizados por Mostofinejad *et al.* (2019) e Al-Saadi *et al.* (2019). O primeiro realizou ensaios experimentais e análises numéricas para investigar o comportamento

de estruturas reforçadas com laminados de PRFC. O segundo realizou uma revisão abrangente do estado da arte, abordando, entre outros aspectos, os modos de ruptura, mostrados na Figura 2.13, e os fatores que influenciam a técnica.



a) Descolamento

b) Ruptura do PRF

c) Arrancamento

d) Divisão adesivo

Figura 2.13 - Modos de ruptura de estruturas com a técnica NSM (Al-Saadi *et al.*, 2019).

2.3.2. Métodos de ancoragem de PRF em vigas

Falhas no compósito de reforço, como os do tipo descolamento, são indesejáveis já que a tenacidade proporcionada pelo reforço à estrutura não é totalmente aproveitada. Alabdulhady e Sneed (2019) afirmam que esses tipos de falha podem ser resultado de um comprimento de sobreposição inadequado nas configurações de aplicação de reforços, sendo alternativas para melhorar a utilização do PRF métodos de ancoragem.

2.3.2.1. *Mechanically Fastened (MF)*

Sena-Cruz *et al.* (2012) afirmam que o método MF, em português fixação mecânica, foi introduzida para fortalecer estruturas de concreto armado através de pinos de fixação bem espaçados e, se necessário, conectores nas extremidades das tiras para evitar um modo de falha prematura da união reforço e estrutura, sendo a configuração dessa técnica mostrada pela Figura 2.14. Sendo um conceito inovador e com um número significativo de pesquisas sobre sua aplicação estrutural, esse método foi abordado e explorado inicialmente na Universidade de Wisconsin sob a supervisão de Lawrence Bank em 1998 (Bank, 2004).

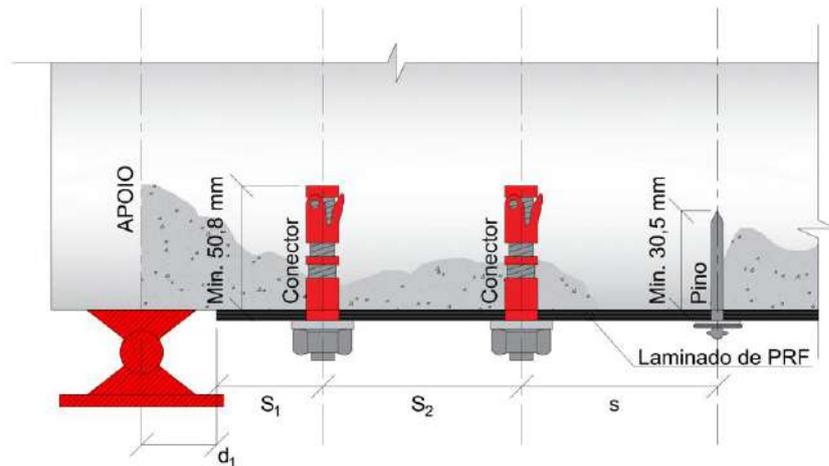


Figura 2.14 - Técnica MF em viga (Adaptado de Bank e Arora, 2007).

Utilizando compósitos com fibras de carbono e vidro, Bank e Arora (2007) investigaram o método MF para reforço a flexão de vigas. O estudo avaliou a resistência do compósito de reforço e o comportamento de dois tipos de fixadores. As vigas reforçadas com o método, em comparação com as vigas de referência, apresentaram maior capacidade de carga e ductilidade, demonstrando a efetividade da técnica. Em relação a utilização de fixadores de aço inoxidável com alta resistência à corrosão, o método foi validado, ampliando as áreas de aplicação do método para ambientes agressivos.

É visto também na literatura o método MF-EBR, que combina os fixadores da técnica MF com as propriedades de colagem externa da técnica EBR, conforme é mostrado na Figura 2.15. Wu e Huang (2008) e Mostafa *et al.* (2013) estudaram a aplicação desse método em vigas sujeitas a flexão, obtendo resultados importantes.

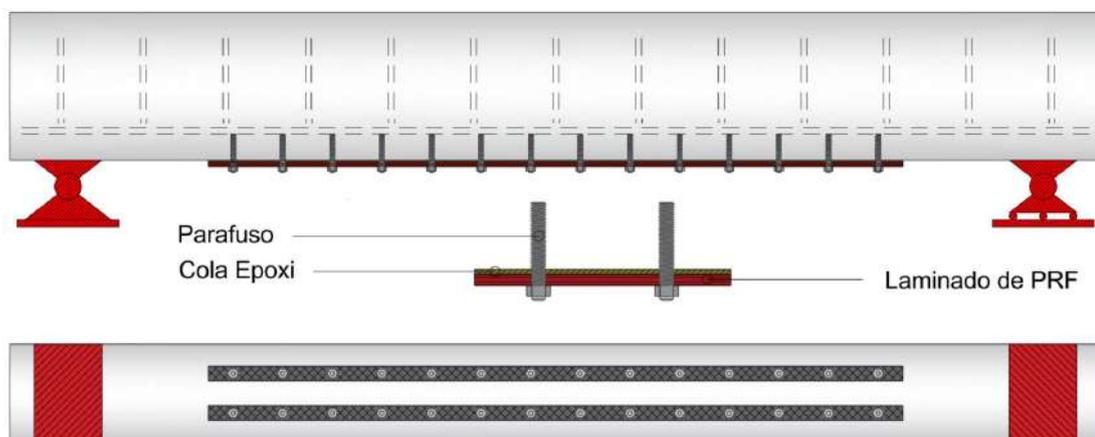


Figura 2.15 - Método MF-EBR em viga (Adaptado de Sena-Cruz *et al.*, 2012).

Outros resultados encontrados na literatura sobre vigas reforçadas com PRF são os estudos de Sena-Cruz *et al.* (2012). Para este caso, o estudo envolveu através de análises comparativas as técnicas EBR, NSM e o MF-EBR. Além do incremento de carga última, o sistema MF-EBR proposto para a viga foi o mais eficiente, pois o PRF teve mais trabalhabilidade que os demais métodos, falhando por esmagamento do concreto.

Para a técnica MF e o método MF-EBR outros modos de ruptura, além dos já catalogados para o EBR, foram introduzidos e apresentados por Bank e Arora (2007), Lamanna *et al.* (2004), Wu e Huang (2008), Wu *et al.* (2011) e Chen (2019). A Figura 2.16 mostra os modos de ruptura que foram encontrados pelos pesquisadores. Sendo eles a perda de aderência do fixador devido a abertura de fissuras no concreto e o rasgamento do laminado/manta de PRF em consequência da influência da interação entre o parafuso e o reforço.

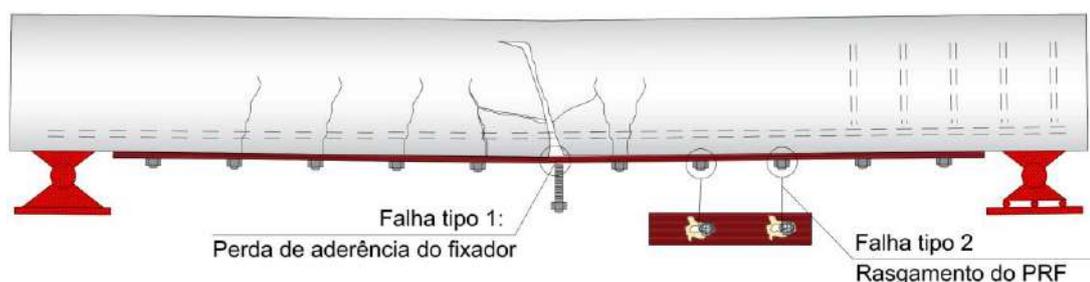


Figura 2.16 - Modos de ruptura em vigas com MF (Adaptado de Sena-Cruz *et al.*, 2012).

2.3.2.2. U-Jackets

Zaki *et al.* (2024) buscou analisar o desempenho a flexão desse método de ancoragem em vigas de concreto armado leve, pois foi empregado areia perlita. O uso da ancoragem melhorou o desempenho de flexão das vigas ensaiadas, atrasando progressivamente a desvinculação prematura das mantas de PRFC em função do número de envoltórias em “U” utilizadas ao longo do vão de cisalhamento. Em relação aos modos de ruptura observados, todos os espécimes falharam por descolamento. O método U-Jackets, consiste na colagem vertical ou inclinada de PRF em formato de “U” ao longo do comprimento de estruturas já reforçadas com compósitos colados externamente. Na Figura 2.17 é visto algumas configurações empregadas desse sistema em vigas de concreto armado.

a) Hasnat *et al.* (2016)b) Yalim *et al.* (2008)**Figura 2.17 - U-Jackets como ancoragem em vigas.**

Autores como Fu *et al.* (2018), Hasnat *et al.* (2016), Yalim *et al.* (2008) e Lee *et al.* (2016) também estudaram essa abordagem em vigas. Nesses estudos os modos de ruptura predominantes foram o por descolamento do compósito de reforço e, também, pela ruptura do compósito de reforço, conforme é mostrado na Figura 2.18.

a) Descolamento da ancoragem e do reforço
(Fu *et al.*, 2018)b) Delaminação do PRF
(Hasnat *et al.*, 2016)c) Ruptura do FRP
(Yalim *et al.*, 2008)d) Descolamento da ancoragem de PRF
(Lee *et al.*, 2016)**Figura 2.18 - Modos de ruptura em estruturas com a ancoragem U-Jacket.**

2.3.2.3. PRF-Spike

Segundo Dong *et al.* (2023), o método PRF-Spike envolve o uso de conectores que podem ser moldadas com o mesmo material de reforço. Neste método, uma extremidade do conector de PRF (pino de ancoragem) é inserida na estrutura reforçada utilizando epóxi, enquanto a outra extremidade (leque de ancoragem) é dobrada em um ângulo de 90 graus e fixada na superfície do reforço. Os autores destacam que, comparado à ancoragem híbrida, o conector de PRF pode proporcionar uma ação de pino mais eficaz.

Esse sistema de ancoragem geralmente é utilizado nas extremidades de reforços em estruturas, como observa-se na Figura 2.19, em vigas de concreto armado. São frequentemente utilizados para ancorar estruturas reforçadas ao cisalhamento através do método *U-Jackets*, sendo um exemplo os estudos realizados por Llaurado *et al.* (2017). Já para estruturas reforçadas à flexão, sua aplicação é realizada nas extremidades do reforço, como é visto nos estudos realizados por Al-Atta *et al.* (2022).

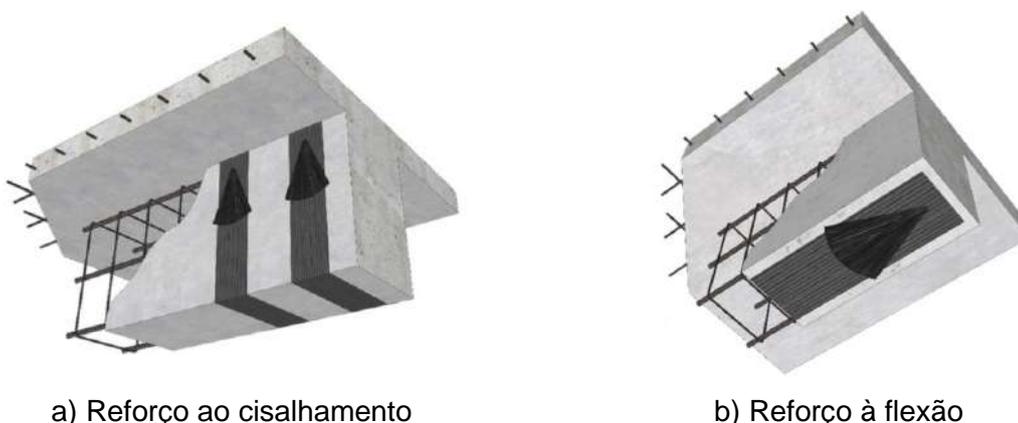


Figura 2.19 - Reforço de viga com métodos de ancoragem PRF-Spike (Alotaibi, 2024).

Alotaibi (2024) propõe em seus estudos sobre o sistema de ancoragem PRF-Spike uma análise comparativa das disposições de ancoragem em estruturas. Foram realizados experimentos em estruturas com ancoragem convencional, onde a faixa de PRF se estende além do furo do conector, e em um sistema simplificado onde a faixa de PRF termina antes do furo do conector. O autor destaca que este sistema simplificado elimina a necessidade de detectar os furos de ancoragem por trás da faixa. Autores como Alotaibi (2024) e Dong *et al.* (2023), em suas investigações, identificaram alguns modos de ruptura (Figura 2.20).

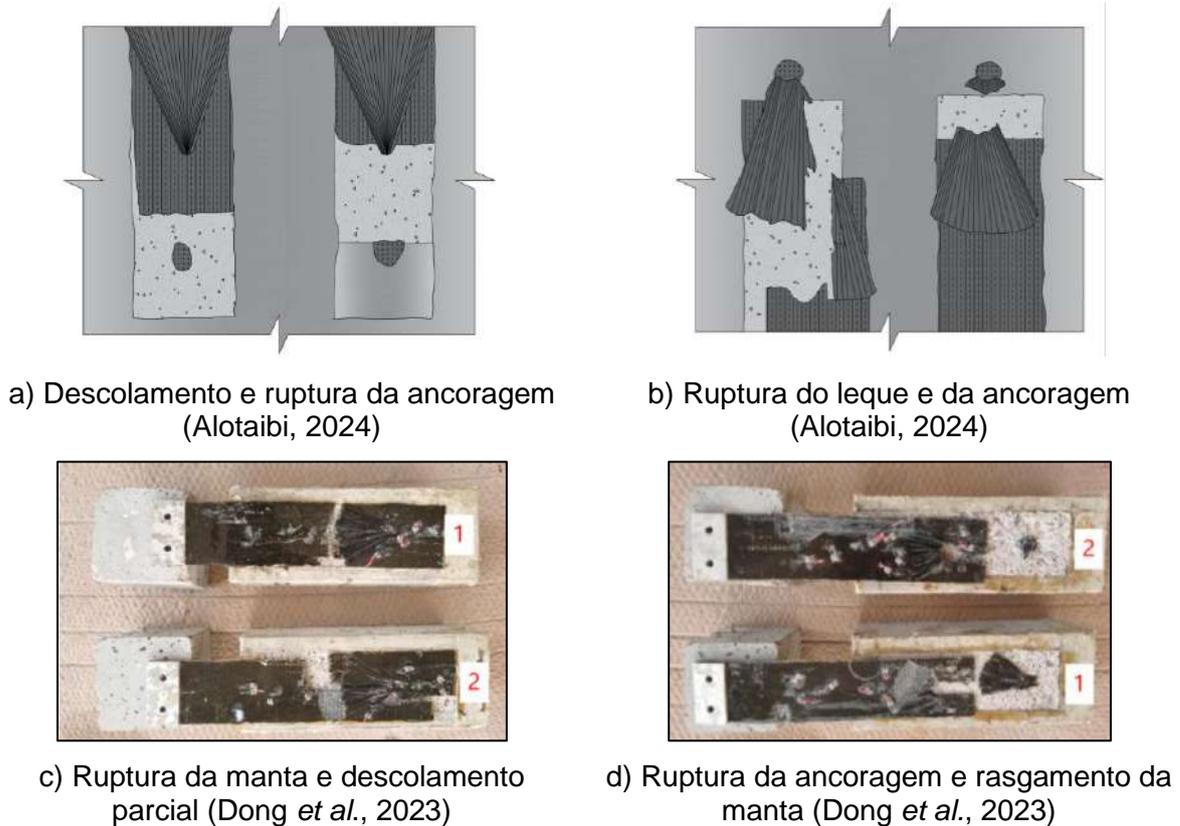


Figura 2.20 - Modos de ruptura em estruturas com sistema PRF-Spike.

2.3.2.4. HB-PRF

Wu *et al.* (2016) e Gao *et al.* (2022) apontam que muitos métodos de ancoragem com PRF não demonstram eficiência adequada devido à ausência de três mecanismos essenciais. O sistema HB-PRF, conforme afirmado por Wu *et al.* (2010), incorpora de maneira potencial todos esses mecanismos, sendo eles a ligação adesiva, atrito e efeito de passagem na junta do sistema de ancoragem. No sistema HB-PRF, o conector pode cortar facilmente o laminado/manta de PRF, o que compromete sua eficácia como transmissor de carga (Wu *et al.*, 2016). Para evitar danos por corte, os conectores são instalados ao lado do compósito de reforço (Figura 2.21).

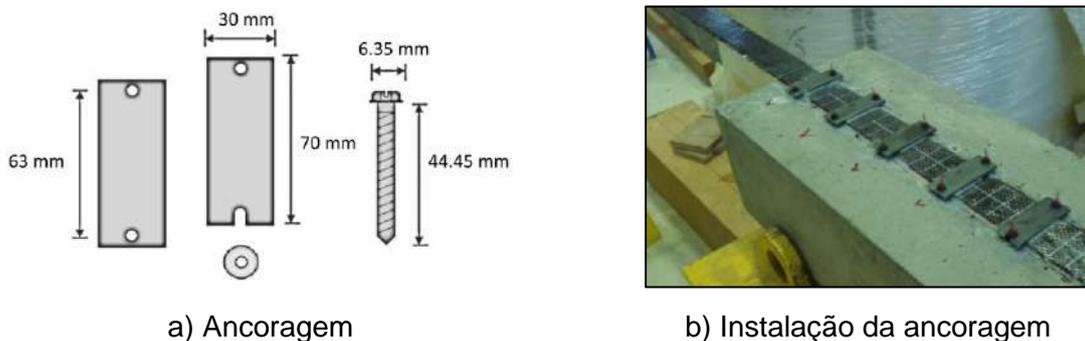
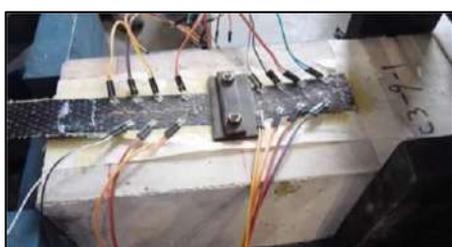


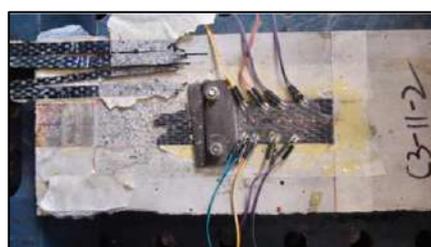
Figura 2.21 - Ancoragem HB-FRP em viga reforçada com PRFC (Wu *et al.*, 2016).

Zhou *et al.* (2018) investigaram esse método variando o torque dos fixadores para estudar o impacto do dispositivo de ancoragem no desempenho da ligação interfacial do concreto com o PRF. Foi observado que ao alterar o torque a taxa de utilização do compósito, que está ligada aos modos de ruptura, pode ser aumentada, variando entre 36,1% e 91,7%.

Chen *et al.* (2019) investigaram o impacto da espessura dos laminados de PRF e do efeito de confinamento no desempenho à flexão, destacando que esses parâmetros podem ser ajustados pelo torque aplicado nos parafusos de aço. Os resultados indicaram que o aumento na espessura do PRF aumenta a rigidez dentro da faixa elástica, alterando o modo de ruptura do compósito para desprendimento do parafuso. Além disso, um aumento no efeito de confinamento resultou em uma maior capacidade de carga, mudando o modo de ruptura de descolamento para ruptura do PRF. Os modos de ruptura específicos deste sistema são mostrados na Figura 2.22.



a) Descolamento do PRF
(Alotaibi, 2024)



b) Ruptura do PRF
(Alotaibi, 2024)



c) Descolamento da âncora
(Dong et al., 2023)



d) Ruptura do FRP
(Dong et al., 2023)

Figura 2.22 - Modos de ruptura em estruturas com ancoragem HB-PRF.

2.3.3. Técnicas de aplicação de reforços de PRFC em consolos

Nos consolos, as técnicas de reforço predominantes, conforme indicam as pesquisas realizadas, é a EBR. Este capítulo abordará as principais disposições horizontais de laminados e mantas de PRFC aplicadas em consolos. Vale ressaltar que essas aplicações em consolos devem ser minuciosas, como afirma a ACI 440.2R (2017), já que o elemento estrutural possui regiões de descontinuidades de tensões (regiões *D*).

2.3.3.1. Técnica EBR

A aplicação de reforços de PRFC usando o EBR, foi investigado por Neupani e Nagai (2017), Ivanova *et al.* (2015), Abdulrahman *et al.* (2021), Al-Kamaki *et al.* (2018), Souza *et al.* (2019), Albegmprli (2023), Shadhan e Kadhim (2015), Sayhood *et al.* (2016), Mohamad-Ali e Attiya (2012), Elgwady *et al.* (2005), Ibrahim *et al.* (2024), Abdulkader *et al.* (2018) e Campione *et al.* (2005). É perceptível em alguns consolos a utilização do compósito de reforço os envolvendo, denominado *Full Wrap*, sendo o material utilizado para tal técnica de aplicação a manta, devido a facilidade de sua dobra. São mostrados na Figura 2.23 as disposições de aplicação, conforme a bibliografia citada.

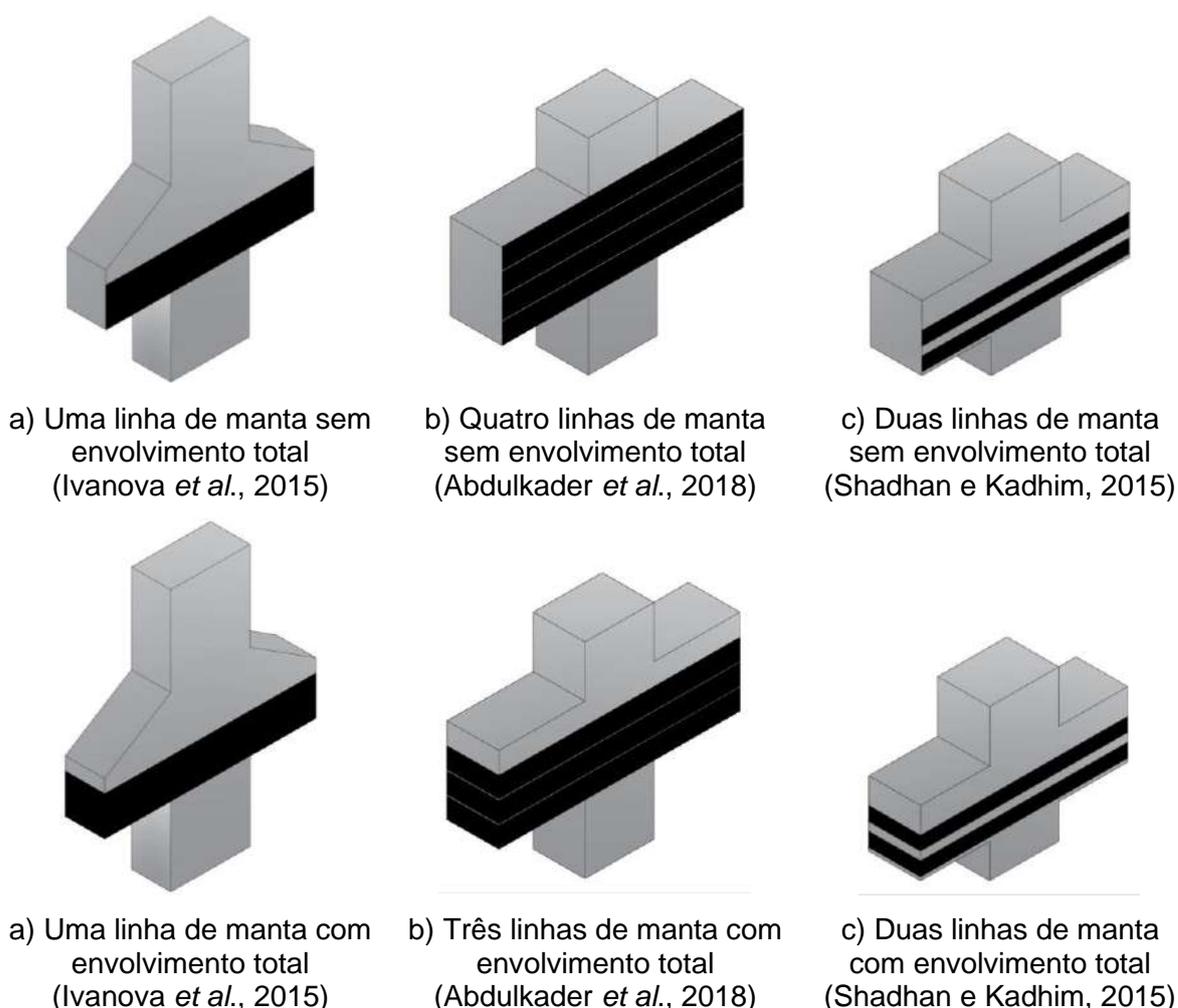


Figura 2.23 - Configurações de aplicação de PRFC utilizando a técnica EBR.

Entre os cinquenta e uma espécimes testados presentes na bibliografia, trinta e quatro foram reforçados usando a configuração *Full Wrap* e o restante reforçados através da aplicação convencional, *Partial Wrap*. Ressaltasse que a falha prematura foi

predominante nos consolos onde a aplicação do reforço não foi totalmente envolvida, representando 64,71% dos casos. Outros casos de ruptura observados foram o fendilhamento, cisalhamento, flexão, esmagamento e rompimento do PRFC. A Figura 2.24 mostra os dois tipos de ruptura frequentes.



a) Ruptura do PRFC



b) Fendilhamento e descolamento do PRFC

Figura 2.24 - Modos de ruptura predominantes na técnica EBR (Ivanova *et al.*, 2015).

Outras técnicas de aplicação de reforço com PRFC são presentes na bibliografia, como a técnica NSM, estudada por Qasim e AlShamaa (2018). Entretanto esses estudos não serão expostos nesta pesquisa, uma vez o objetivo principal deste estudo é a utilização da técnica EBR em consolos. Além disso, técnicas como a NSM e o MF já foram discutidas, sendo discutido no tópico de métodos de ancoragem em consolos o MF-EBR.

2.3.4. Métodos de ancoragem de reforços de PRFC em consolos

Na busca por melhorar a eficácia do reforço e, conseqüentemente, evitar o descolamento ou a delaminação, os métodos de ancoragem de reforços de PRFC em consolos encontrados na bibliografia se limitam aos métodos MF-EBR, *U-Jackets* e *Steel Plates*.

2.3.4.1. *Steel Plates*

Esse sistema de ancoragem foi proposto por Abdulrahman *et al.* (2021). Ele consiste na colagem de placas de aço nas extremidades do reforço aplicado na estrutura. Os materiais utilizados incluem o laminado Sika CarboDur S512 para o reforço do

consolo, e o Sikadur-30LP, que é um adesivo específico para laminado. Não foi especificado no trabalho se foi utilizado um adesivo epóxi ou o Sikadur-30LP para a colagem das chapas de aço. A Figura 2.25 mostra a configuração deste método de ancoragem.

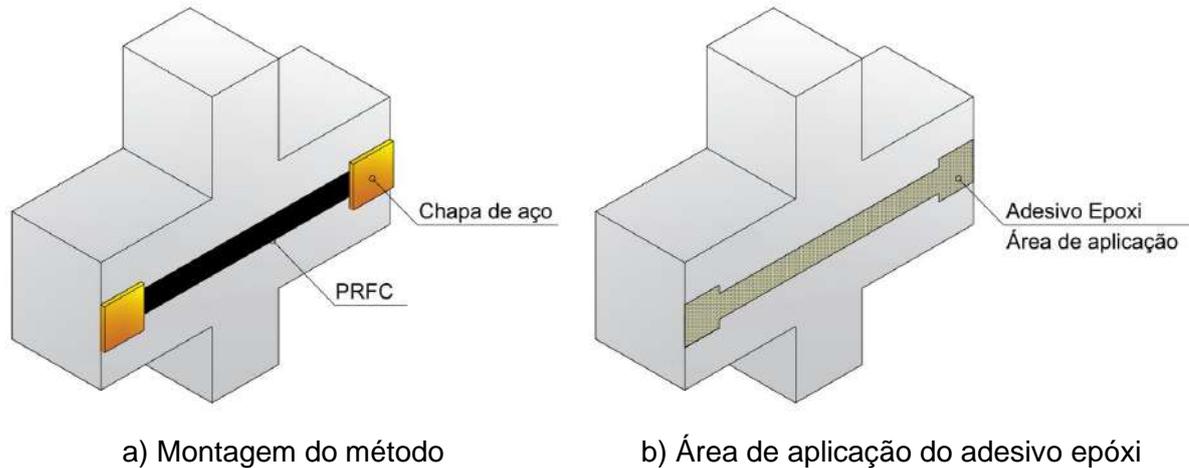


Figura 2.25 - Ancoragem *Steel Plates* (Adaptado de Abdulrahman *et al.*, 2021).

O modo de ruptura observado foi o descolamento do PRFC com a camada de concreto responsável pelo cobertura da armadura em uma das extremidades. Abdulrahman *et al.* (2021) afirmam que essa ruptura ocorreu devido à proximidade de regiões de concentração de tensões e fissuras de cisalhamento, respectivamente. A Figura 2.26 mostra o modo de ruptura investigado.

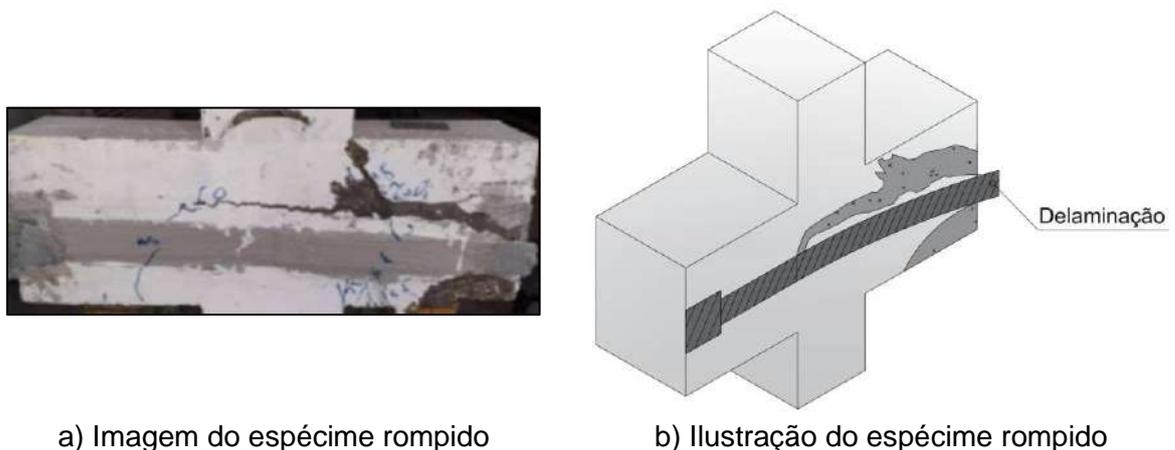


Figura 2.26 - Modo de ruptura da ancoragem *Steel Plate* (Abdulrahman *et al.*, 2021).

2.3.4.2. MF-EBR

Shadhan e Kadhim (2015) investigaram uma amostra em que duas faixas horizontais de reforço foram coladas em ambos os lados do consolo juntamente com conectores.

O objetivo do estudo era melhorar o comportamento ao cisalhamento, justificando sua aplicação no centro das mísulas. Esta amostra demonstrou uma melhoria na resistência ao cisalhamento. As ancoragens foram aplicadas após a moldagem e cura das amostras (Figura 2.27).

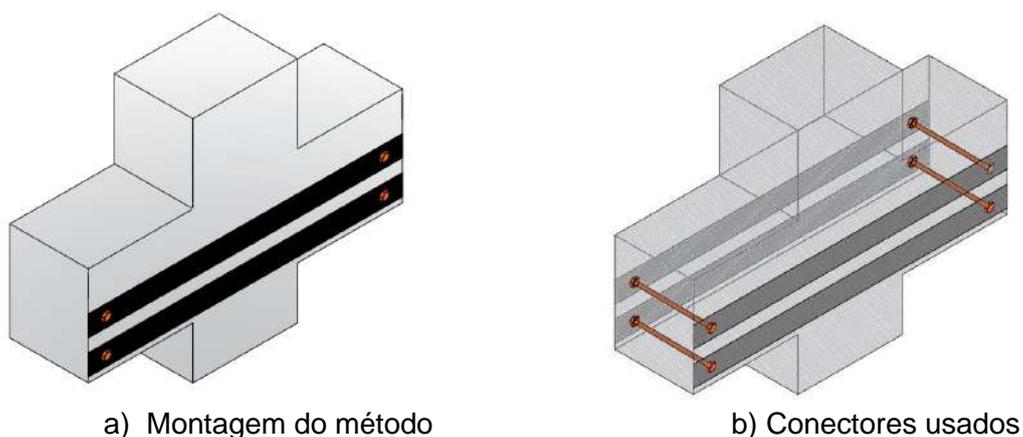


Figura 2.27 - Ancoragem MF-EBR (Adaptado de Shadhan e Kadhim, 2015).

Shadhan e Kadhim (2015) testaram consolos reforçados pela técnica EBR, com e sem métodos de ancoragem. Observou-se que a ancoragem com conectores nas extremidades não foi eficaz contra a falha prematura, conforme é mostrado na Figura 2.28. Ressalta-se que os autores testaram apenas um espécime com essa metodologia, sendo necessários mais testes para uma melhor conclusão sobre sua aplicação em consolos.

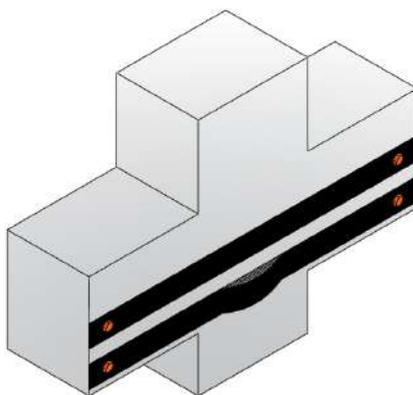


Figura 2.28 - Ruptura do método MF-EBR (Adaptado de Shadhan e Kadhim, 2015).

2.3.4.3. U-Jackets

Shadhan e Kadhim (2015) e Abdulkader *et al.* (2018) estudaram esse método aplicada a consolos. No primeiro estudo, os PRFC foram dispostos em forma de caixa na vertical para reforçar três tiras horizontais de mantas do mesmo material. No segundo

estudo, os autores combinaram o reforço usando três faixas inclinadas em forma de U, espelhadas em cada lado, com três faixas horizontais em forma de caixa em todos os lados. Os pesquisadores mencionados optaram por deixar os reforços na configuração *Full Wrap*, assim os modelos idealizados por eles, em teoria, poderiam ser mais eficazes, uma vez que ambos os consolos possuem um reforço duplamente ancorado. A Figura 2.29 mostra como foram aplicados os reforços e os métodos de ancoragem.

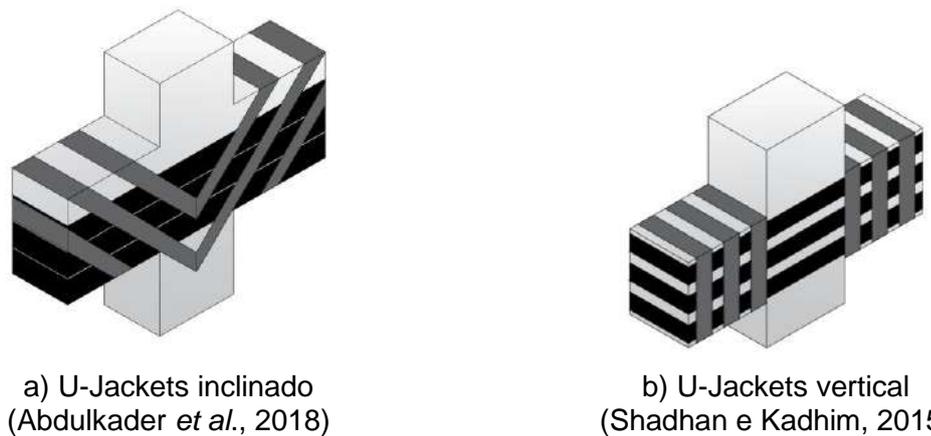


Figura 2.29 - Ancoragem U-Jackets em consolos reforçados com PRFC.

Segundo Abdulkader *et al.* (2018), a distribuição, direção, localização, tipo de ligação e quantidade de tiras de PRFC desempenham papéis cruciais na melhoria da rigidez, resistência à fissuração e na capacidade de suportar cargas finais. Os resultados indicam que reforçar consolos com tiras de PRFC tanto inclinadas quanto horizontais proporciona desempenho superior em comparação com reforços aplicados em apenas uma direção. Entretanto, um espécime de Abdulkader *et al.* (2018) com a ancoragem descolou e um espécime dos consolos testados por Shadhan e Kadhim (2015) sofreu ruptura no reforço (Figura 2.30).

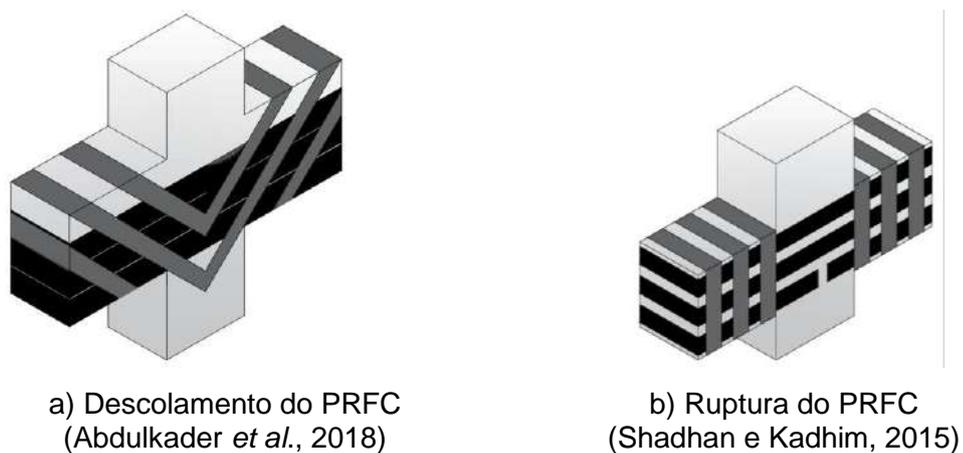


Figura 2.30 - Modo de ruptura do método U-Jackets.

2.4. Desempenho Estrutural de Consolos Reforçados com PRFC

O incremento de resistência proporcionado pelo reforço é um valor obtido através da razão entre a carga última do consolo reforçado e do consolo sem reforço. Com isso, por meio do estado da arte sobre consolos reforçados com PRFC, em sua maioria mantas, foram desenvolvidos gráficos que relacionam as variáveis taxa de reforço (ρ_f), taxa de armadura principal (ρ_y), a/d e os métodos de ancoragem aplicados, além de percentuais de ocorrência para cada modo de ruptura catalogado nas pesquisas. Os valores de resistência à compressão do concreto para os espécimes reforçados pela técnica EBR são convencionais, com média de aproximadamente 33 MPa, sendo esse também o valor médio para os espécimes com ancoragem do reforço, com duas exceções que serão mencionadas ao longo deste capítulo.

2.4.1. Técnica EBR sem sistemas de ancoragem

Analisando a Figura 2.31, percebe-se inicialmente que a configuração de aplicação *Full Wrap* apresenta os maiores valores de incremento de resistência, sendo esses os espécimes com menor taxa de armadura principal. Nota-se que, para os espécimes reforçados com a configuração *Partial Wrap*, o comportamento é o mesmo, com os espécimes menos armados sendo mais eficientes que os mais armados, independentemente do valor de a/d . Ressaltasse que o incremento de resistência, além de ser influenciado pela armadura principal, também é afetado pela quantidade de PRFC aplicado, pois os espécimes pouco reforçados apresentam comportamentos semelhantes, independentemente da taxa de armadura e do valor de a/d .

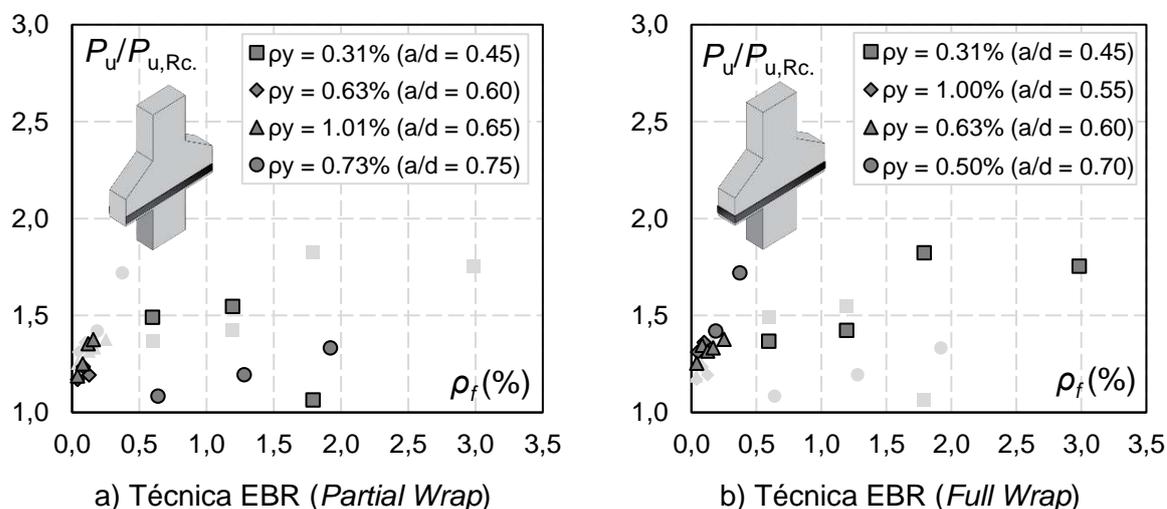


Figura 2.31 - Influência de técnicas de reforço no incremento de resistência.

2.4.2. Técnica EBR com sistemas de ancoragem

Para os espécimes com ancoragem, a configuração de aplicação *Full Wrap* e *Partial Wrap* não exerce influência significativa no incremento de resistência, pois o confinamento gerado pelas ancoragens tem um impacto mais relevante. Dentre os espécimes com sistema de ancoragem e elaborados com concreto convencional, o método *U-Jackets* 3U apresentou o maior incremento de resistência em comparação aos demais (Figura 2.32). Além disso, é perceptível que, para os espécimes com a mesma taxa de reforço e de aço, o comportamento do consolo é influenciado pela razão a/d , sendo observado que os espécimes mais rígidos apresentaram maior ganho de resistência.

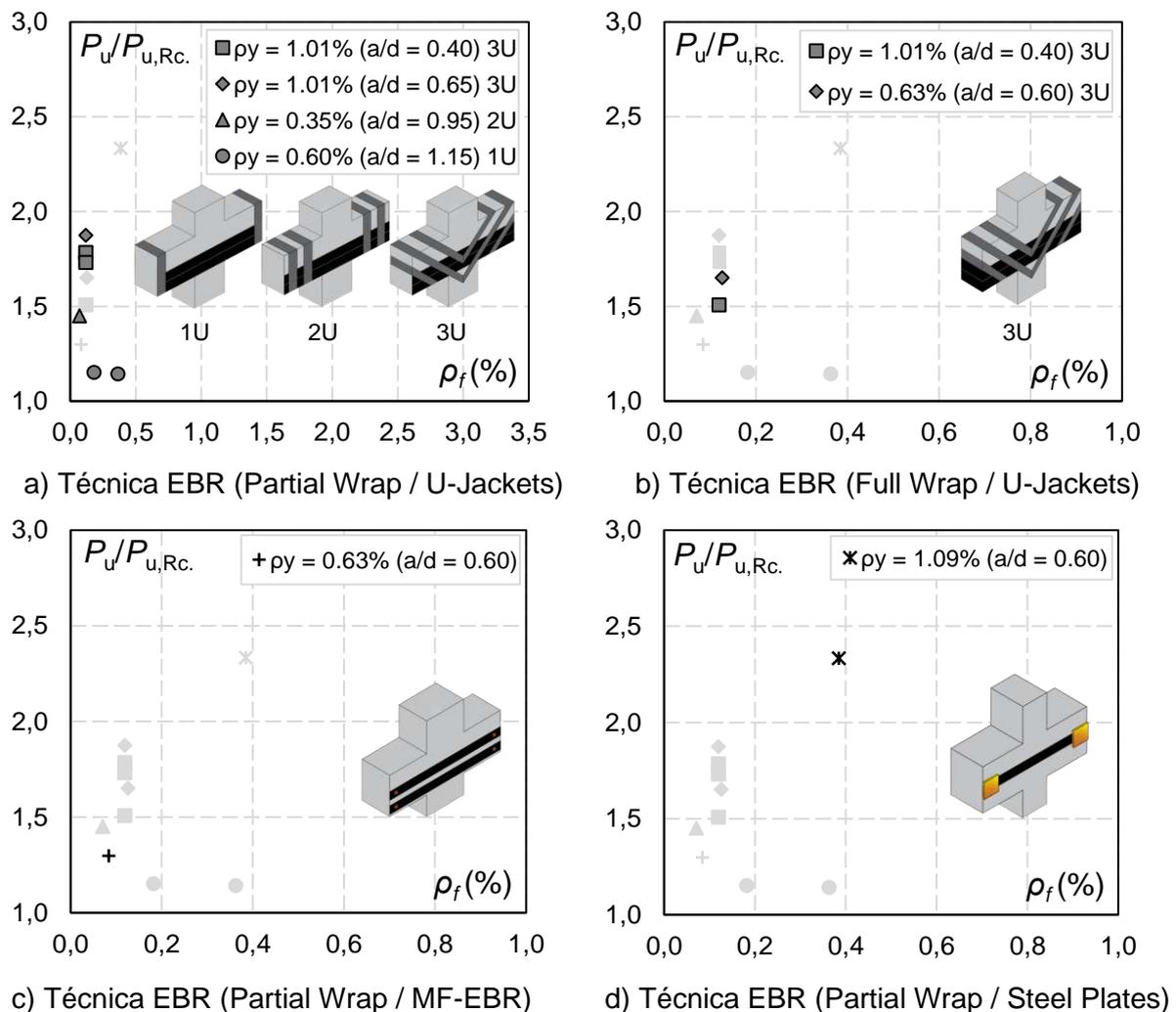


Figura 2.32 - Influência dos métodos de ancoragem no incremento de resistência.

É importante mencionar que, considerando os espécimes com concreto de alto desempenho, o sistema de ancoragem mais eficiente foi o *Steel Plates* (CP). Outro

espécime com o mesmo tipo de concreto foi o consolo com ancoragem *U-Jackets* 2U, apresentando uma resistência a compressão de 65 MPa, enquanto o espécime com a ancoragem com chapas de aço coladas apresentou uma resistência de 72,59 MPa. Observa-se que, apesar de possuir uma taxa de armadura menor, o consolo apresentou resultados inferiores, justamente por ter uma maior taxa de reforço e um maior valor de a/d em comparação ao espécime com ancoragem SP.

2.4.3. Modos de ruptura

Para esta análise, foram considerados 17 consolos com *Partial Wrap* e 33 com *Full Wrap*, ambos utilizando a técnica EBR. Para os sistemas de ancoragem, com PRFC aplicado por adesivo epóxi, foram avaliados 12 espécimes para *U-Jackets* e apenas um para os métodos MF e SP. Ressalta-se que os espécimes estudados por El-Maaddawy e Sherif (2014) e Shakir *et al.* (2023) foram incluídos no grupo de consolos ancorados com *U-Jackets*. Com isso, é visto na Figura 2.33 e na Tabela 2.3 os modos de ruptura e os seus percentuais de ocorrência.

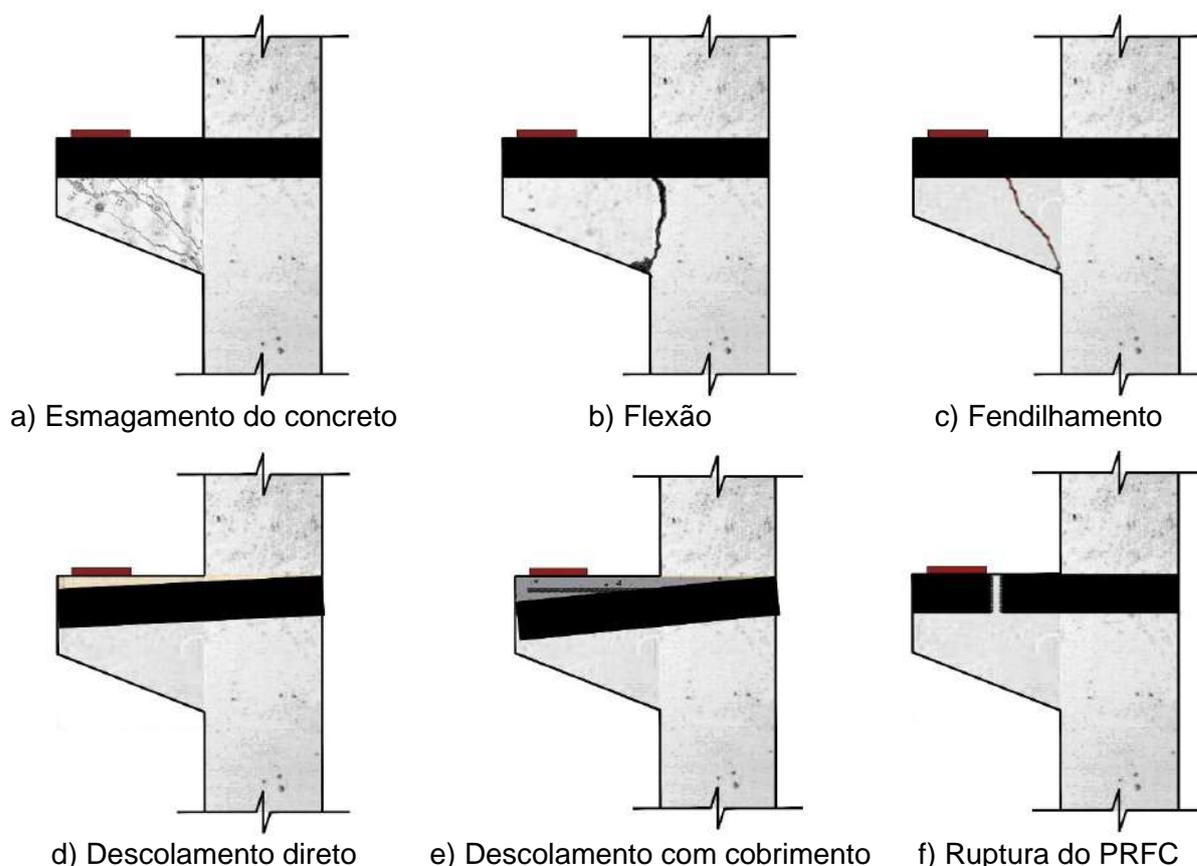


Figura 2.33 - Modos de ruptura de consolos com sistema de ancoragem no reforço.

Tabela 2.3 – Percentual de ocorrência dos modos de ruptura.

Modo de ruptura	Técnica EBR				
	<i>Partial Wrap</i>	<i>Full Wrap</i>	<i>U-Jackets</i>	MF	SP
Esmagamento do concreto	11,76%	12,12%	8,33%	0,00%	0,00%
Flexão	0,00%	3,03%	0,00%	0,00%	0,00%
Fendilhamento	0,00%	9,09%	0,00%	0,00%	0,00%
Descolamento direto	35,29%	33,33%	25,00%	100,00%	0,00%
Descolamento com cobrimento	29,41%	12,12%	0,00%	0,00%	100,00%
Ruptura do PRFC	23,53%	33,00%	66,67%	0,00%	0,00%

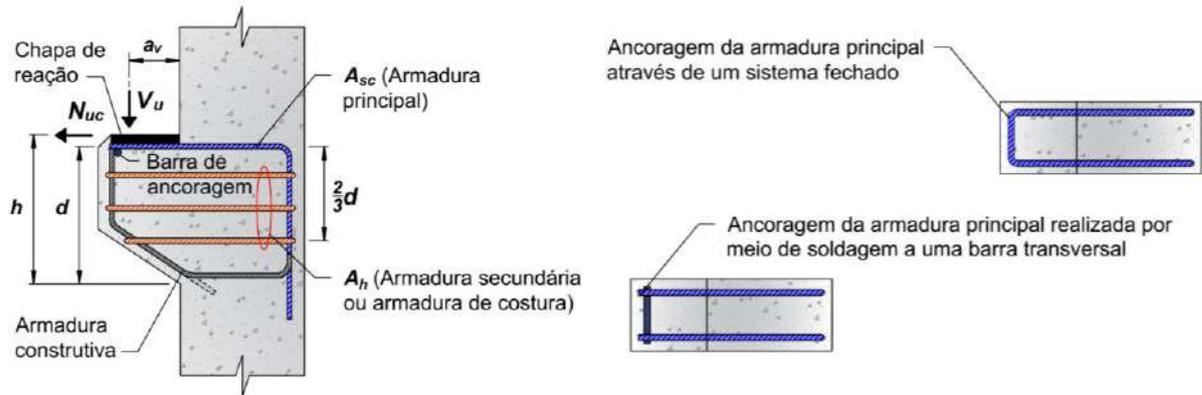
2.5. Prescrições normativas

Neste capítulo, serão abordadas as normas e regulamentos relevantes que se aplicam ao tema em estudo. Serão discutidas as normas técnicas nacionais e internacionais aplicáveis para elementos em concreto armado e reforçados com PRFC, bem como as especificações técnicas e os critérios de dimensionamento que orientam a aplicação da ancoragem do reforço.

2.5.1. Dimensionamento de consolos longos

Para os consolos longos, os métodos de cálculo presentes nas normas são o MBT, conforme a ACI 318-M (2019), e o modelo clássico de flexão, como prescreve a ABNT NBR 6118 (2023). As duas normas oferecem recomendações para o detalhamento da armadura do tirante, aparelho de apoio, armadura de costura e armadura construtiva, não se distinguindo significativamente em relação às recomendações de cálculo. Para ambas metodologias de cálculo, as normas indicam algumas diretrizes para a confecção dos consolos:

- A altura total da borda externa deve ser no mínimo 50% da altura útil do consolo;
- Os consolos curtos devem ter armadura de costura mínima igual a 40 % da armadura do tirante, distribuída na forma de estribos horizontais em uma altura igual a $2/3d$ (Figura 2.34a);
- A armadura principal do consolo deve ser ancorada por uma solda, dobra em *loop* ou outros meios devidamente comprovados (Figura 2.34b).



a) Detalhamento das armaduras

b) Tipos de ancoragem da armadura principal

Figura 2.34 - Recomendações para consolos (Adaptado de ACI 318-M, 2019).

2.5.1.1. ABNT NBR 6118 (2023)

No item 17.2.2 da norma, são detalhadas as premissas adotadas para o cálculo da resistência das seções de vigas sob flexão. Entre essas premissas incluem-se a suposição de que as seções transversais permanecem planas após a deformação, as tensões de tração no concreto no Estado Limite Último (ELU) são desprezadas, a distribuição de tensões no concreto é idealizada conforme diagrama curvo e retangular (podendo ser apenas retangular), e a determinação das tensões nas armaduras é baseada nos diagramas tensão-deformação.

A distribuição de tensões no concreto é feita de acordo com o diagrama idealizado curvo e retangular, especificado no item 8.2.10.1 da norma, com tensão de pico calculada conforme a Equação 2.1. O diagrama pode ser substituído por um retângulo de profundidade $y = \lambda x$, onde o valor do parâmetro é visto na legenda

$$\sigma_{cp} = 0,85 \eta_c f_{cd} \quad (2.1)$$

Onde:

σ_{cp} é a tensão de compressão de pico;

$\eta_c = 1,0$ para um $f_{ck} \leq 40 \text{ MPa}$;

$\eta_c = \left(\frac{40}{f_{ck}}\right)^{1/3}$ para um $f_{ck} > 40 \text{ MPa}$;

$\eta_c = 2,0$ para um $f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$;

$\eta_c = 1,4 + 23,4 [(90 - f_{ck})/100]^4$ para um $f_{ck} > 50 \text{ MPa}$

f_{cd} é a resistência a compressão de cálculo, determinada por $f_{ck}/1,4$;

$\lambda = 0,8$ para um $f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$;

$\lambda = 0,8 - (f_{ck} - 50)/400$ para um $f_{ck} > 50 \text{ MPa}$.

O cálculo da tensão constante distribuída na profundidade y é abordado pela norma (Equação 2.2), entretanto ela só difere da tensão de pico caso seja utilizado concreto de alta resistência. Ressalta-se que a equação apresentada só funciona no caso da largura da seção, medida paralelamente à linha neutra, não diminuir a partir desta para a borda comprimida. Para situações contrárias utilizar a Equação 2.3.

$$\sigma_c = a_c \eta_c f_{cd} \quad (2.2)$$

$$\sigma_c = 0,9 a_c \eta_c f_{cd} \quad (2.3)$$

Onde:

σ_c é a tensão de compressão constante;

$a_c = 0,85$ para concretos com $f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$;

$a_c = 0,85 [1,0 - (f_{ck} - 50)/200]$ para concretos com $f_{ck} > 50 \text{ MPa}$.

As diferenças de resultados obtidos com os diagramas, tanto o retangular quanto o curvo e retangular, são pequenas e aceitáveis, sem necessidade de coeficiente de correção adicional. Na Figura 2.35 observa-se a distribuição de deformações, tensões e forças numa seção transversal de consolo longo (viga em balanço) com armadura simples, considerando o diagrama retangular do concreto.

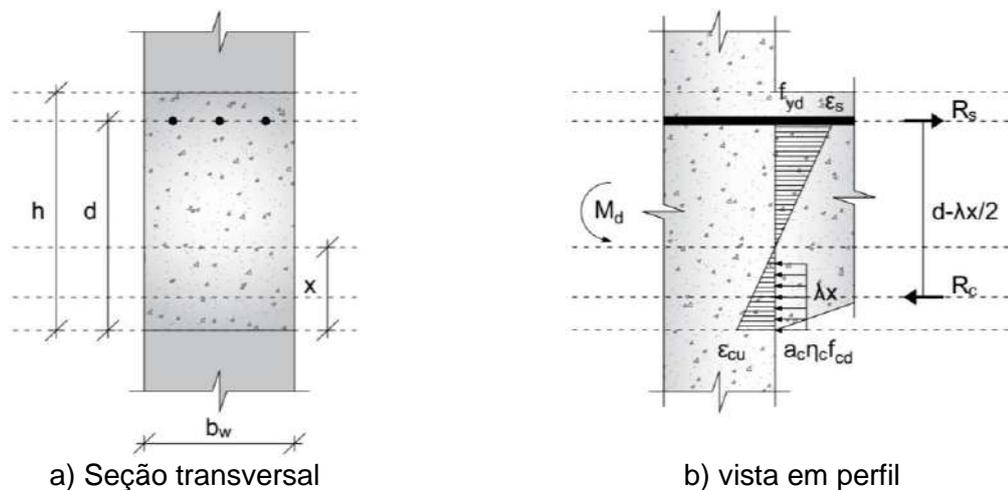


Figura 2.35 - Deformações, tensões e forças em uma seção transversal de uma viga.

As forças internas resistentes do concreto (R_c) e do aço (R_s) são dadas então pelas equações 2.4 e 2.5, respectivamente:

$$R_c = a_c \eta_c f_{cd} b \lambda x \quad (2.4)$$

$$R_s = f_{yd} A_s \quad (2.5)$$

Onde:

R_c é a força interna resistente do concreto;

R_s é a força interna resistente do aço;

b é a base da estrutura em concreto;

f_{yd} é a tensão de escoamento de cálculo do aço, determinada por $f_{yk}/1,15$;

A_s é a área de aço da estrutura em concreto.

As forças resistentes da seção, seja R_c ou R_s , multiplicadas pela distância entre elas (braço de alavanca), resultam em um binário cujo módulo é igual ao momento resistente de cálculo (M_{Rd}) da peça naquela seção. Com isso, para o dimensionamento de vigas em balanço à flexão, deve-se satisfazer a condição $M_{Rd} \geq M_{Sd}$, sendo M_{Sd} o momento solicitante de cálculo (Equações 2.6 e 2.7).

$$R_c \left(d - \frac{\lambda x}{2} \right) \geq M_{Sd} \quad (2.6)$$

$$R_s \left(d - \frac{\lambda x}{2} \right) \geq M_{Sd} \quad (2.7)$$

A partir da primeira equação de equilíbrio, é possível determinar a posição da linha neutra (x), estimando também um valor para d (Equação 2.8). Esta altura útil é determinada considerando a espessura do cobrimento de concreto, a bitola dos estribos e a bitola das armaduras de flexão. A segunda equação de equilíbrio é fundamental para determinar a quantidade de aço necessária para a estrutura (Equação 2.9).

$$a_c \eta_c f_{cd} b \lambda x \left(d - \frac{\lambda x}{2} \right) \geq M_{Sd} \quad (2.8)$$

$$f_{yd} A_s \left(d - \frac{\lambda x}{2} \right) \geq M_{Sd} \quad (2.9)$$

Nas vigas em balanço é necessário garantir boas condições de ductilidade respeitando os limites da posição da linha neutra (x/d), sendo adotada, se necessário, armadura de compressão. Para proporcionar o adequado comportamento dúctil em vigas e lajes, a posição da linha neutra no ELU deve obedecer aos seguintes limites:

- $x/d \leq 0,45$, para concretos com $f_{ck} \leq 50$ MPa;
- $x/d \leq 0,35$, para concretos com 50 MPa $< f_{ck} \leq 90$ MPa.

2.5.1.2. ACI 318-M (2019)

A norma americana permite a análise de segurança no estado-limite último de um console longo, por meio de uma treliça idealizada composta por bielas, tirantes e nós. Para a estimativa de resistência da biela e em regiões nodais, são definidos, respectivamente, nas Equações 2.10 e 2.11, os seguintes parâmetros:

$$f_{ce} = 0,85 \beta_c \beta_s f_c' \quad (2.10)$$

$$f_{ce} = 0,85 \beta_c \beta_n f_c' \quad (2.11)$$

Onde:

f_{ce} é a resistência efetiva a compressão do concreto em uma biela ou região nodal;

β_c é o fator de modificação de confinamento de bielas e nós;

β_s é o fator de eficiência da biela;

β_n é o fator para a configuração da região nodal;

f_c' é a resistência a compressão do concreto.

Para o cálculo da resistência efetiva das bielas e regiões nodais, os valores β_c , β_s e β_n são vistos nas tabelas 2.4, 2.5 e 2.6.

Tabela 2.4 - Fator de confinamento da biela (ACI 318-M, 2019).

Localização	β_c	
<ul style="list-style-type: none"> • Extremidade de uma biela conectada à um nó que inclua uma superfície de contato; • Nó que inclui uma superfície de contato. 	$\sqrt{A1/A2}$, onde A1 é definido pela face carregada do aparelho de apoio	(a)
O menor entre:	2,0	(b)
Outros casos	1,0	(c)

Tabela 2.5 - Fator de eficiência da biela (ACI 318-M, 2019).

Local da Biela	Tipo da Biela	Critério	β_s	
Elementos tracionados	Qualquer biela	Todos os casos	0,4	(a)
	Bielas de contorno	Todos os casos	1,0	(b)
Todos os outros casos	Bielas Internas	Com armadura em acordo com (a) e (b) da Tabela 23.5.1 da norma	0,75	(c)
		Localizadas em regiões que satisfazem o item 23.4.4 da norma	0,75	(d)
		Ligação viga-pila	0,75	(e)
		Todos os demais casos	0,4	(f)

Tabela 2.6 - Configuração da região nodal (ACI 318-M, 2019).

Configuração da região nodal	β_n	
Nós cercados de bielas ou área de contato	1,0	(a)
Nós ancorando um tirante em uma direção	0,8	(b)
Nós ancorando tirantes em mais de uma direção	0,6	(c)

Em relação às bielas internas, as verificações mencionadas no item c da Tabela 2.4, que correspondem à taxa mínima de armadura recomendada pela norma, são especificadas na Tabela 2.7, enquanto o item d é calculado usando a Equação 2.12.

Tabela 2.7 - Taxa de armadura mínima das bielas (ACI 318-M, 2019).

Contenção lateral da biela	Arranjo das armaduras	Taxa distribuída mínima	
Sem contenção	Malha ortogonal	0,0025 em cada direção	(a)
	Armadura unidirecional cortando a biela a um ângulo α	$\frac{0,0025}{\sin^2 \alpha}$	(b)
Com contenção	Não necessariamente distribuída		(c)

$$V_u = \phi 5 \tan \phi \lambda \lambda_s \sqrt{f_c'} b_w d \quad (2.12)$$

Onde:

ϕ é o fator de redução de força;

λ o fator de modificação das propriedades mecânicas em relação ao peso do concreto;

λ_s o efeito de modificação do efeito de tamanho, sendo considerado 1 quando atende

aos requisitos da Tabela 2.21, caso contrário é calculado por $\lambda_s = \sqrt{\frac{2}{1+0,004 d}} < 1$;

A Equação 2.13 oferece a área de aço a ser aplicada em cada tirante.

$$F_{nt} = A_{ts} f_y + A_{tp} \Delta f_p \quad (2.13)$$

Onde:

F_{nt} é a força nominal de tração no tirante;

A_{ts} é a área de aço necessária;

f_y é a resistência ao escoamento do aço;

A_{tp} é a área de aço protendida necessária;

Δf_p é o fator dependente da característica da pretensão.

Na verificação da ancoragem, o comprimento de ancoragem necessário é determinado pelo maior valor entre o obtido na Tabela 2.8 ou 300 mm, onde d_b é o diâmetro da barra e ψ_t , ψ_e , ψ_g e λ são os fatores de modificação, onde suas definições são observadas na Tabela 2.9.

Tabela 2.8 - Comprimento de ancoragem reto necessário (ACI 318-M, 2019).

Espaçamento e comprimento	$\theta \leq 20,0$ mm	$\theta > 20,0$ mm
Distância livre entre as armaduras sendo ancoradas ou emendas não menores que d_b , cobrimento de no mínimo d_b , e estribos ou barras transversais ao longo de l_b em quantidade não menor que a mínima normativa ou Espaçamento livre das barras sendo ancoradas ou emendas ao menos de $2d_b$ e cobrimento mínimo de d_b .	$\frac{f_y \psi_t \psi_e \psi_g}{25 \lambda \sqrt{f_c'}} d_b$	$\frac{f_y \psi_t \psi_e \psi_g}{20 \lambda \sqrt{f_c'}} d_b$
Outros casos	$\frac{3f_y \psi_t \psi_e \psi_g}{50 \lambda \sqrt{f_c'}} d_b$	$\frac{3f_y \psi_t \psi_e \psi_g}{40 \lambda \sqrt{f_c'}} d_b$

Tabela 2.9 - Fatores de modificação para ancoragem de barras (ACI 318-M, 2019).

Fator de modificação	Condição	Valor do fator
Peso λ	Concreto leve	0,75
	Concreto de peso norma	1,00
Grau de reforço ψ_g	Grau de 40 ou grau de 60	1,00
	Grau de 80	1,15
	Grau de 100	1,30
Epóxi ψ_e	Reforço revestido com epóxi ou zinco-epóxi com revestimento duplo com tampa transparente menor que $3d_b$ ou espaçamento claro menor que $6d_b$	1,50
	Revestimento com epóxi ou zinco-epóxi reforçado duplamente para todas as outras condições	1,20
	Não revestido ou revestido de zinco (galvanizado) reforçado	1,00
Tamanho ψ_s	Barras N° 7 ou maiores	1,00
	Barras N° 6 ou menores	0,80
Posição de fundição ψ_t	Mais de 12 polegadas (30 mm) de concreto fresco abaixo do reforço horizontal	1,30
	Outros	1,00

Para ancoragem por barra transversal soldada no tirante, o método de cálculo segue o mesmo princípio utilizado para ancoragem reta. Em casos de ancoragem com gancho, é necessário verificar os itens 25.4.3.1 e 25.4.3.2 presentes na norma correspondente.

2.5.2. Laminados de PRFC como reforço de estruturas em concreto armado

A resistência à flexão da seção de um elemento reforçado externamente com PRF pode ser determinada levando em conta a compatibilidade das deformações, o

equilíbrio das forças internas e o controle do modo de falha. A norma ACI 440.2R (2017) que trata sobre o dimensionamento de estruturas de concreto armado reforçadas com fibra ilustra, conforme a Figura 2.36, a distribuição de deformações e de tensões utilizada pela norma americana para o cálculo do momento resistente na verificação aos estados limites últimos.

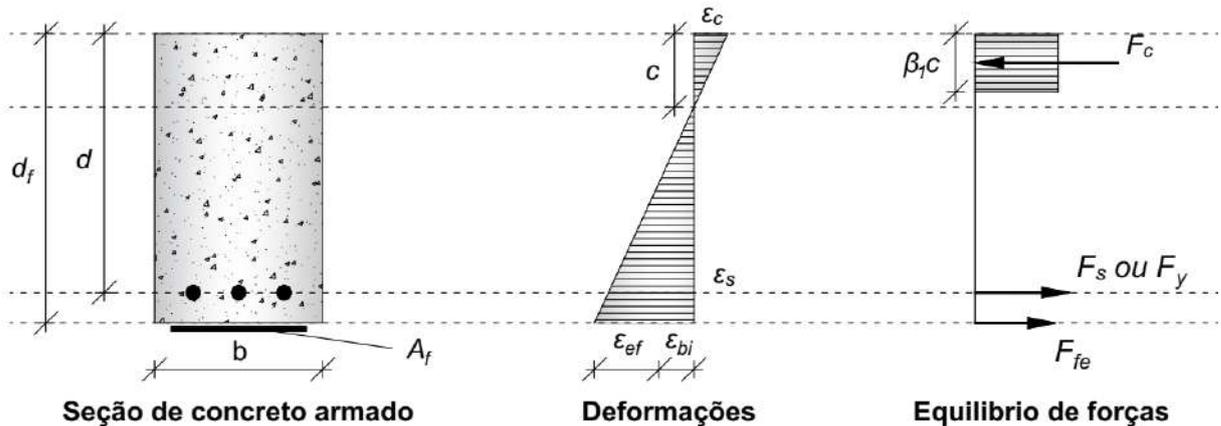


Figura 2.36 - Dimensionamento do reforço de PRFC em vigas (ACI 440 2R, 2017).

De acordo com a norma, o momento fletor resistente da seção, ao verificar o ELU, pode ser calculado utilizando a Equação 2.14.

$$M_n = A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \psi_f A_f f_{fe} \left(d_f - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad (2.14)$$

Onde:

A_s é a área da armadura convencional de tração existente na seção;

f_s é a tensão de tração no aço;

d é a altura útil da seção;

d_f é a altura total da seção;

β_1 é o fator de transformação do diagrama de tensões, podendo-se assumir 0,8;

c é a posição da linha neutra;

ψ_f é o coeficiente de minoração da resistência do PRF. Na flexão assume-se 0.85;

A_f é a área da seção de PRF;

f_{fe} é a tensão de tração efetiva no PRF.

Com a finalidade de evitar modos de falhas prematuros no reforço, sendo citado pela norma o descolamento induzido por rachaduras, a deformação efetiva no reforço deve ser limitada, conforme a Equação 2.15.

$$\varepsilon_{fd} = 0,41 \sqrt{\frac{f'_c}{n E_f t_f}} \leq 0,9 \varepsilon_{fu} \quad (2.15)$$

Onde:

f'_c é a resistência a compressão específica do concreto;

n é o número de camadas de PRF;

E_f é o módulo de elasticidade do PRF;

t_f é a espessura nominal de uma camada do reforço de PRF;

ε_{fu} é a deformação de ruptura de projeto do PRF.

Como os materiais são elásticos até a falha, a deformação máxima que pode ser alcançada no reforço será governada pela deformação desenvolvida no ponto em que o concreto esmaga, em que rompe o reforço e em que o reforço descola do substrato. Para essa deformação efetiva a norma limita o resultado conforme a Equação 2.16.

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \left(\frac{d_f - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd} \quad (2.16)$$

Onde:

ε_{cu} é a deformação máxima do concreto;

ε_{bi} é a deformação do substrato do concreto no momento da instalação do PRF.

O nível máximo de tensão que pode ser desenvolvido pelo reforço antes da falha por flexão da seção é dado pela Equação 2.17.

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} \quad (2.17)$$

Para que haja o equilíbrio interno das forças, a Equação 2.18 deve ser atendida conforme a norma.

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

Onde:

$$\beta_1 = \left(\frac{4 \varepsilon'_c - \varepsilon_c}{6 \varepsilon'_c - 2 \varepsilon_c} \right) - 0,05;$$

$$a_1 = \frac{3 \varepsilon'_c \varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3 \beta_1 \varepsilon'^2_c};$$

ε_c é a deformação no concreto;
 $\varepsilon'_c = 0,002$.

2.5.3. Chapas e conectores de aço

2.5.3.1. ABNT NBR 8800 (2024)

A força de tração resistente de cálculo de elementos de ligação (chapas) tracionados com furos deve ser o menor valor obtido entre as Equações 2.24 (Para o estado-limite último de escoamento) e 2.25 (Para o estado limite-último de ruptura). O cálculo da área líquida efetiva de uma chapa de aço é determinado pela Equação 2.26.

$$N_{t,Rd} = \frac{f_y A_g}{\gamma_{a1}} \quad (2.24)$$

$$N_{t,Rd} = \frac{f_u A_e}{\gamma_{a2}} \quad (2.25)$$

$$A_e = C_t A_n \quad (2.26)$$

Onde:

A_g é a área bruta da chapa;

A_e é a área líquida efetiva (chapas de emendas parafusadas, $A_e = A_n \leq 0,85 A_g$);

A_n é a área líquida da chapa;

$C_t = 1,0$ é o coeficiente de redução da área líquida quando a força de tração for transmitida diretamente para cada um dos elementos da seção transversal da barra, por soldas ou parafusos;

f_y é a resistência ao escoamento do material do parafuso;

f_u é a resistência à ruptura do material do parafuso;

$\gamma_{a2} = 1,35$ é o coeficiente de ponderação das resistências na ruptura por combinações normais e especiais;

$\gamma_{a2} = 1,15$ é o coeficiente de ponderação das resistências na ruptura por combinações excepcionais;

$\gamma_{a1} = 1,10$ é o coeficiente de ponderação das resistências no escoamento, flambagem e instabilidade por combinações normais e especiais;

$\gamma_{a1} = 1,00$ é o coeficiente de ponderação das resistências no escoamento, flambagem e instabilidade por combinações excepcionais.

As dimensões máximas de furos-padrão devem obedecer ao indicado na Tabela 2.10.

Tabela 2.10 - Dimensões máximas de furos para parafusos (ABNT NBR 8800, 2024).

Diâmetro do parafuso (d_b)	Diâmetro do furo-padrão	Diâmetro do furo alargado
16	18	20
20	22	24
22	24	28
24	27	30
27	30	35
30	33	38
≥ 36	d_b+3	d_b+8

Para o espaçamento mínimo entre furos, a distância entre centros de furos-padrão não pode ser inferior a $2,7d_b$, de preferência $3d_b$. Além desse requisito, a distância livre entre as bordas de dois furos consecutivos não pode ser inferior a d_b .

Em relação ao espaçamento máximo entre parafusos que conectam uma chapa a um perfil ou a outra chapa, em contato contínuo, em elementos pintados ou não sujeitos à corrosão, é importante observar que o espaçamento não deve exceder 24 vezes a espessura da parte ligada menos espessa, nem 300 mm.

Para o estado-limite de colapso por rasgamento, a força resistente é determinada pela soma das forças resistentes ao cisalhamento de uma ou mais linhas de falha e à tração em um segmento perpendicular. A força resistente de cálculo ao colapso por rasgamento é dada pela Equação 2.27.

$$F_{r,Rd} = \frac{1}{\gamma_{a2}} (0,60 f_u A_{nv} + C_{ts} f_u A_{nt}) \leq \frac{1}{\gamma_{a2}} (0,60 f_y A_{gv} + C_{ts} f_u A_{nt}) \quad (2.27)$$

Onde:

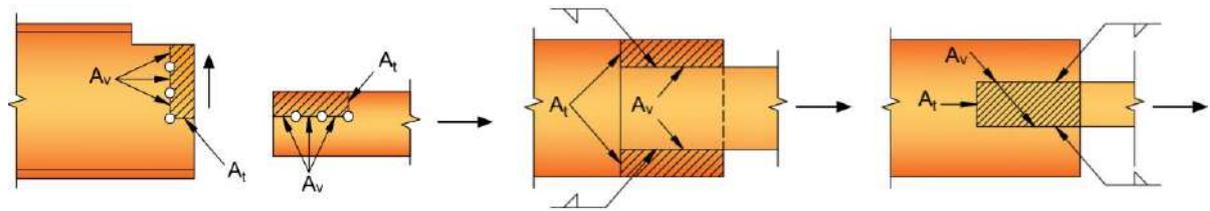
A_{gv} é a área bruta sujeita a cisalhamento;

A_{nv} é a área líquida sujeita a cisalhamento;

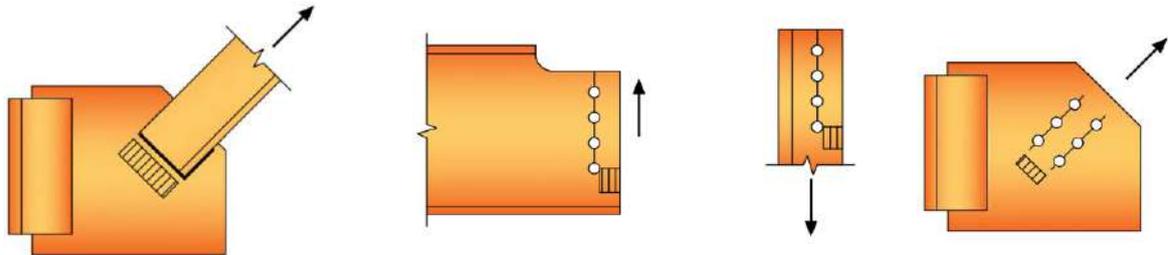
A_{nt} é a área líquida sujeita à tração;

C_{ts} é igual a 1,0 quando a tensão de tração na área líquida for uniforme, e igual a 0,5 quando for não-uniforme.

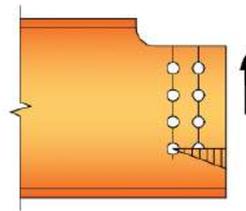
Algumas situações típicas do rasgamento em chapas são demonstradas pela norma (Figura 2.37a), sendo ressaltado situações para tensões uniformes (Figura 2.37b) e não uniformes (Figura 2.37c) na área líquida sujeita ao cisalhamento e a tração.



a) Situações típicas nas quais deve ser verificado o estado-limite



b) Situações típicas nas quais $C_{ts} = 1,0$

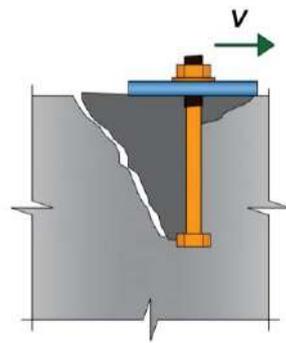


c) Situações típicas nas quais $C_{ts} = 0,5$

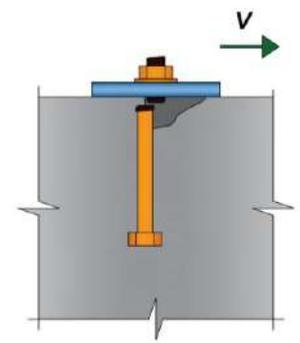
Figura 2.37 - Colapso por rasgamento (ABNT NBR 6118, 2023).

2.5.3.2. ACI 318-M (2019)

A resistência nominal para um conector ou grupos de conectores deve ser baseada em modelos de projeto que resultem em previsões de resistência em concordância com os resultados de testes normativos. Para consolos de concreto armado com reforço sujeito a esforços de cisalhamento, a resistência dos conectores deve considerar tanto a resistência do aço ao cisalhamento quanto a resistência ao arrancamento do concreto (Figura 2.38).



a) Desprendimento do concreto



b) Ruptura do conector

Figura 2.38 - Rupturas de cisalhamento recorrentes em parafusos (ACI 318-M, 2019).

A resistência nominal ao arrancamento (V_{cpg}) de um grupo de conectores não deve exceder os valores estabelecidos pela Equação 2.28. Para o segundo modo de ruptura, que é a ruptura do parafuso (V_{sa}) conforme a Equação 2.29, a norma também impõe limites de resistência.

$$V_{cpg} = k_{cp} N_{cpg} \quad (2.28)$$

$$V_{sa} = 0,6 A_{se,v} f_{uta} \quad (2.29)$$

Onde:

$k_{cp} = 1,0$ quando a altura do conector é menor que 65 mm;

$k_{cp} = 2,0$ quando a altura do conector é maior ou igual a 65 mm;

N_{cpg} é a resistência ao arrancamento do concreto de um grupo de conectores;

$A_{se,v}$ é a área efetiva da seção transversal do conector ao cisalhamento;

f_{uta} é a resistência especificada à tração do aço do conector, limitada por um valor $\leq 1,9f_{ya}$ ou em 860 MPa;

f_{ya} é a resistência especificada de escoamento do aço do conector.

Para o cálculo de conectores embutidas ou pós concretados, N_{cpg} deve ser considerado como N_{cbg} (Equação 2.30).

$$N_{cpg} = \frac{A_{Nc}}{A_{Nco}} \psi_{ec,N} \psi_{ed,N} \psi_{c,N} \psi_{cp,N} N_b \quad (2.30)$$

Onde:

A_{Nc} é a área projetada de falha do concreto de um único conector ou grupo de conectores, para cálculo da resistência à tração (Figura 2.39a e Figura 2.39c);

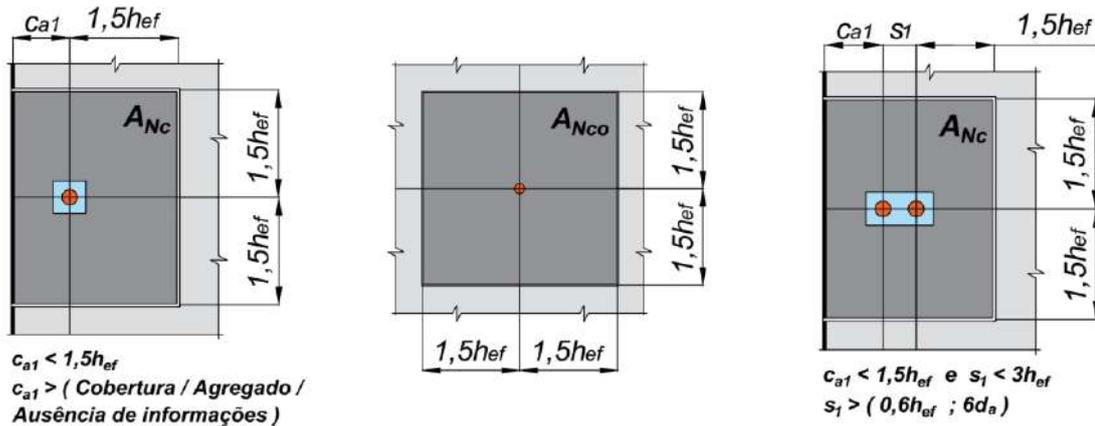
A_{Nco} é a área projetada de falha do concreto de um único conector, para cálculo da resistência à tração caso não limitada pela distância da borda (Figura 2.39b);

$\psi_{ec,N}$ é o fator de excentricidade de arrancamento usado para modificar a resistência à tração dos conectores com base na excentricidade das cargas aplicadas;

$\psi_{ed,N}$ é o fator de efeito de borda de arrancamento usado para modificar a resistência à tração dos conectores com base na proximidade das bordas do elemento de concreto;

$\psi_{c,N}$ é o fator de fissuração de arrancamento usado para modificar a resistência à tração dos conectores com base na influência de fissuras no concreto;

$\psi_{cp,N}$ é o fator de divisão de arrancamento usado para modificar a resistência à tração de conectores instaladas após a concretagem, destinadas ao uso em concreto não fissurado sem reforço suplementar, para considerar as tensões de tração por divisão; N_b é a resistência básica ao arrancamento do concreto em tração de um único conector em concreto fissurado.



- a) Área para um conector b) Área para um conector^a c) Área para dois conectores

^a Caso não limitado pela distância da borda ou espaçamento.

Figura 2.39 - Áreas de falha do concreto para conectores (ACI 318-M, 2019).

É visto na Tabela 2.11 as condições de uso e os fatores de cálculo presentes na equação anterior. Segundo a norma, a resistência básica ao arrancamento do concreto em tração de um único conector em concreto fissurado é determinada pela Equação 2.31.

$$N_b = k_c \lambda_a \sqrt{f'_c} h_{ef}^{1,5} \quad (2.31)$$

Onde:

$k_c = 10$ para conectores embutidas;

$k_c = 7,0$ para conectores pós instaladas;

$\lambda_a = 1,0$ λ é o fator de modificação para ruptura de conectores embutidas;

$\lambda_a = 0,8$ λ é o fator de modificação para ruptura de conectores pós instaladas;

$\lambda_a = 0,6$ λ é o fator de modificação para ruptura de conectores adesivos;

$\lambda = 1,0$ é o fator de modificação para o concreto de peso normal;

f'_c é a resistência à compressão especificada do concreto;

h_{ef} é a altura efetiva do conector.

Tabela 2.11 - Fatores de cálculo para a resistência ao arrancamento (ACI 318-M, 2019).

	Equações	Condição	Legendas
$\psi_{ec,N}$	$\frac{1}{\left(1 + \frac{2 e'_N}{3 h_{ef}}\right)} \leq 1,0$	Agrupamento de âncoras	e'_N é a excentricidade entre âncoras. h_{ef} é a profundidade da âncora.
$\psi_{ed,N}$	1	Quando $c_{a,min} \geq 1,5 h_{ef}$	$c_{a,min}$ é a distância mínima do centro do eixo da âncora até a borda do concreto.
	$0,7 + 0,3 \frac{c_{a,min}}{1,5 h_{ef}}$	Quando $c_{a,min} < 1,5 h_{ef}$	
$\psi_{c,N}$	1,25	Para âncoras embutidas	-
	1,4	Para âncoras pós instaladas	-
	1,0	Específica para fissurações	-
$\psi_{cp,N}$	1,0	Quando $c_{a,min} \geq c_{ac}$	c_{ac} é a distância crítica da borda necessária para desenvolver a resistência básica controlada pelo arrancamento do concreto ou pela aderência de uma âncora pós-instalada sob tensão em concreto não fissurado sem reforço suplementar para controlar o cisalhamento
	$\frac{c_{a,min}}{c_{ac}} \geq \frac{1,5 h_{ef}}{c_{ac}}$	Quando $c_{a,min} < c_{ac}$	-

Os espaçamentos mínimos, as distâncias das bordas e as espessuras dependem das características da âncora. As forças e torques de instalação em âncoras pós-instaladas podem causar fissuração do concreto circundante. Com isso, para evitar essa falha a norma estabelece parâmetros apresentados na Tabela 2.12.

Tabela 2.12 - Requisitos de espaçamento e distância de borda (ACI 318-M, 2019).

Parâmetro de espaçamento	Tipo de âncora			
	Âncoras embutidas		Âncoras de expansão e com base alargada	Parafusos pós instalados
	Sem torque	Com torque		
Espaçamento mínimo entre âncoras	$4 d_a$	$6 d_a$	$6 d_a$	Maior valor entre $0,6 h_{ef}$ e $6 d_a$
Espaçamento mínimo da ancora até a borda	Requisitos de cobertura especificados para o reforço conforme o item 20.5.1.3 da norma		$6 d_a$	Maior valor de (a), (b) e (c): (a) Requisitos de cobertura conforme o item 20.5.1.3 da norma (b) O dobro do tamanho máximo do agregado (c) distância mínima da borda na ausência de informações sobre o produto

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

A literatura científica sobre o comportamento de consolos longos reforçados à flexão com PRFC e métodos de ancoragem ainda é pouco explorada, especialmente no uso de laminados. Para contribuir com esse tema, foram confeccionados seis consolos de concreto armado com relação a/d superior a 1,0. Dois deles foram ensaiados com laminados de PRFC ancorados pelo método HB; outros dois foram ensaiados com ancoragens coladas de PRFC; e os dois restantes foram testados sem reforço. Todos os consolos apresentavam a mesma geometria, e o programa experimental foi conduzido em dois setores da Universidade Federal do Pará, campus Tucuruí. Uma parte no Laboratório de Engenharia Civil (LEC) e a outra no Laboratório de Análise Computacional e Experimental de Estruturas e Materiais (LACEEM).

3.1. Modelo experimental

Todos os ensaios foram realizados em modelos de consolos de concreto armado, simétricos e embutidos em um pilar. O pilar possui dimensões de (250x300x950) mm, enquanto os consolos são chanfrados, com 250 mm de largura, altura de engastamento de 400 mm, altura na face externa de 200 mm e comprimento em balanço de 570 mm, para ambos os lados (Figura 3.1).

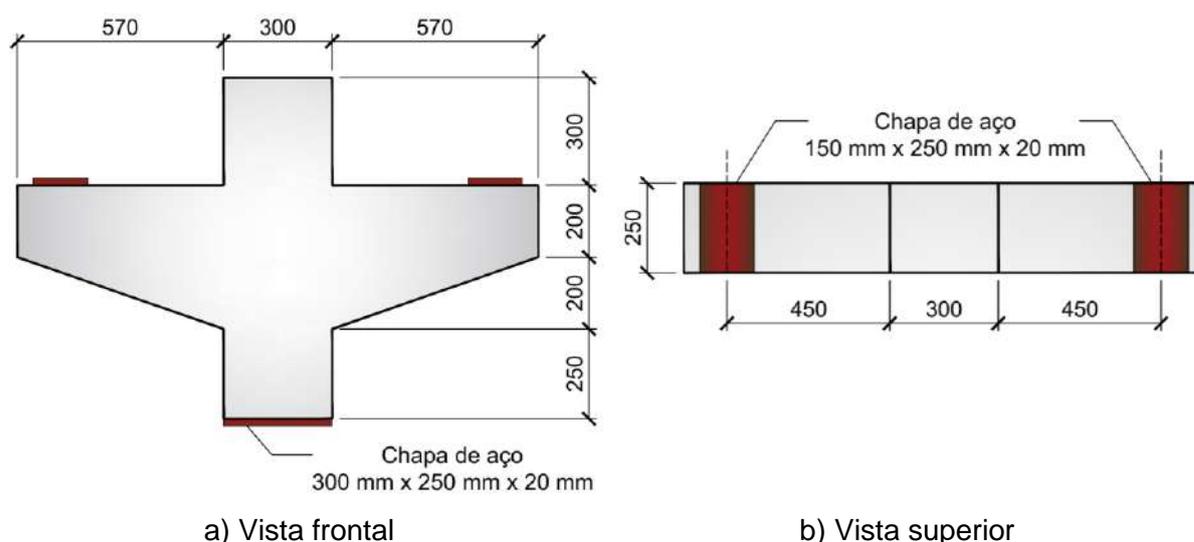
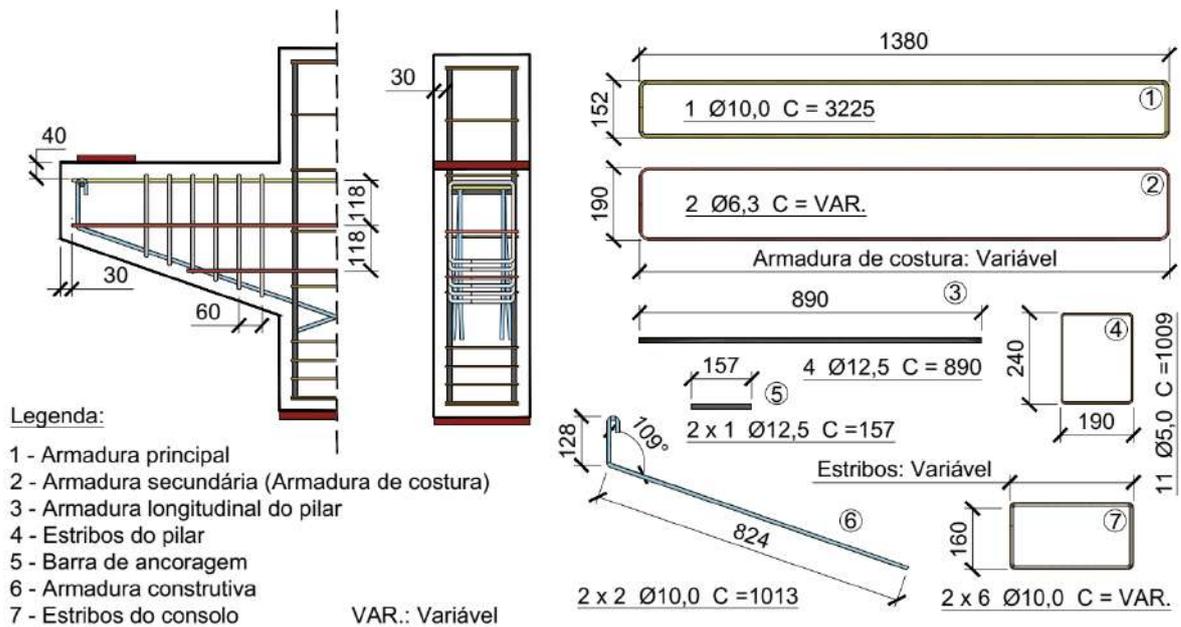


Figura 3.1 - Geometria do consolo

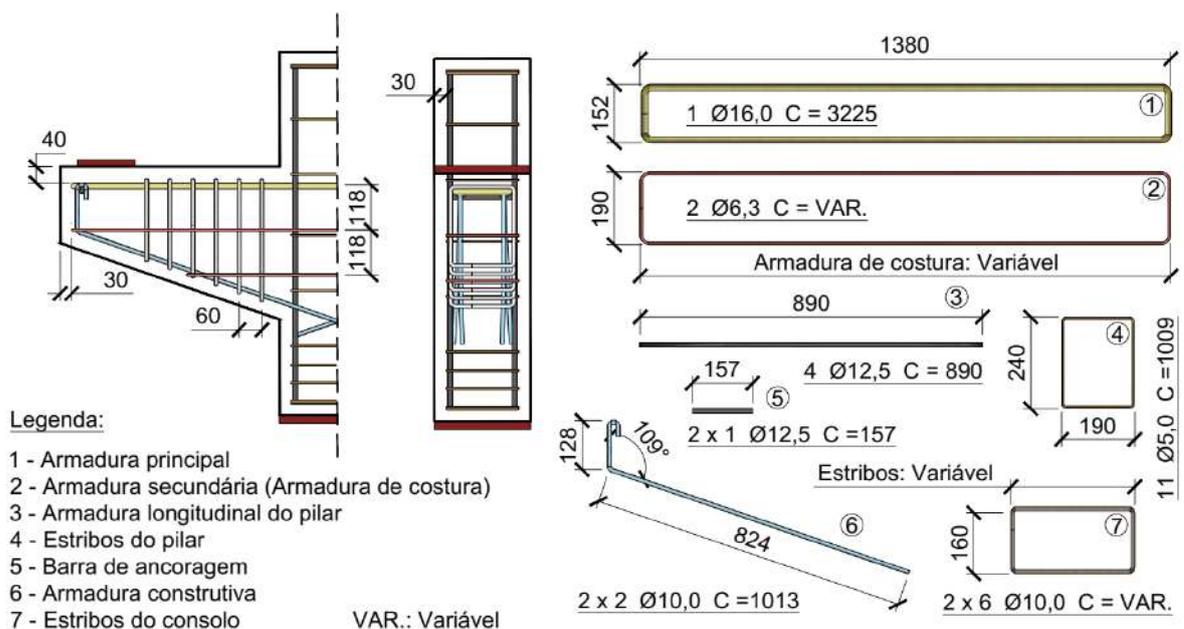
A disposição das armaduras visa investigar a resistência máxima à flexão de consolos longos. As armaduras principais foram dimensionadas para que os consolos alcancem a ruptura por flexão, sendo escolhidas duas áreas de aço em decorrência de sua

influência em estruturas reforçadas com PRFC. A primeira configuração corresponde à armadura mínima exigida pelas normas técnicas, enquanto a segunda apresenta uma taxa equivalente a três vezes esse valor mínimo.

A Figura 3.2 mostra o detalhamento completo das armaduras principais, de costura e estribos dos consolos, sendo também detalhadas as armaduras dos pilares. Ressalta-se que o cobrimento idealizado para as armaduras principais foi de 40 mm, com pequenas alterações devido ao processo construtivo, o que acarretou em pequenas variações no a/d dos consolos, sem comprometer o estudo.



a) Detalhamento dos espécimes com armadura principal de 10 mm de diâmetro



b) Detalhamento dos espécimes com armadura principal de 16 mm de diâmetro

Figura 3.2 - Detalhamento das armaduras dos consolos longos.

Com o objetivo de aproveitar ao máximo a resistência proporcionada pela inclusão do laminado de PRFC no consolo e, assim, evitar modos de ruptura prematuros, foram adicionadas chapas de aço fixadas com quatro parafusos em cada extremidade do consolo. Além disso, em outro grupo de espécimes, foram aplicadas camadas adicionais de laminados do mesmo material do reforço, também posicionadas nas extremidades dos consolos.

Na Figura 3.3 e 3.4, são mostradas as informações referentes a cada sistema de ancoragem e reforço utilizado, sendo o primeiro método denominado HB-PRFC e o segundo, conforme Abrantes *et al.* (2024), FT-PRFC, nomenclatura que remete a colagem de laminados na transversal, além dos laminados colados na longitudinal.

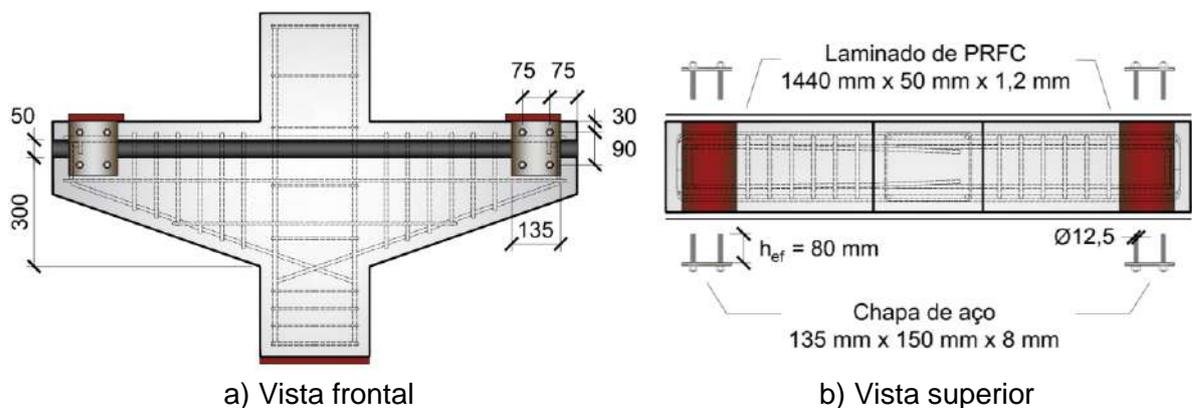


Figura 3.3 - Consolo reforçado pela técnica EBR e ancorado pelo método HB.

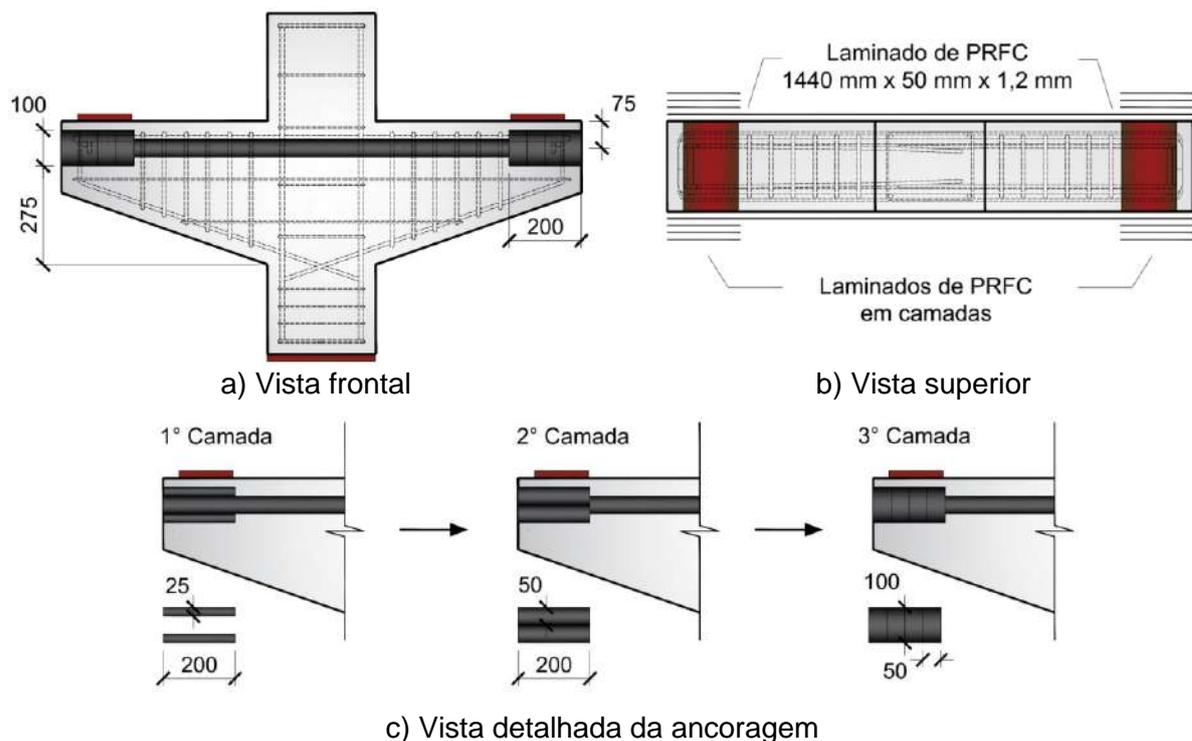


Figura 3.4 - Consolo reforçado pela técnica EBR e ancorado pelo método FT.

Além dessas configurações de reforço e ancoragem, foi testada no consolo com armadura principal de 16 mm a ancoragem FT-PRFC, utilizando toda a área de ancoragem disponível no consolo. No consolo com armadura principal de 10 mm, essa configuração não foi testada, pois, por questões de execução, estimou-se uma área mínima de ancoragem para permitir maior liberdade no posicionamento do reforço. Na Figura 3.5 é visto o detalhamento da aplicação do reforço e da ancoragem, sendo esta aplicação denominada FT'-PRFC. Em comparação ao método FT utilizado no consolo com armadura principal de 10 mm, esse modo de aplicação de ancoragem cobriria uma área de 0,03 m², sendo 1,5 vezes maior que o FT. Ressaltasse que o modo de aplicação continua sendo o mesmo, variando o posicionamento apenas na última camada de aplicação dos laminados.

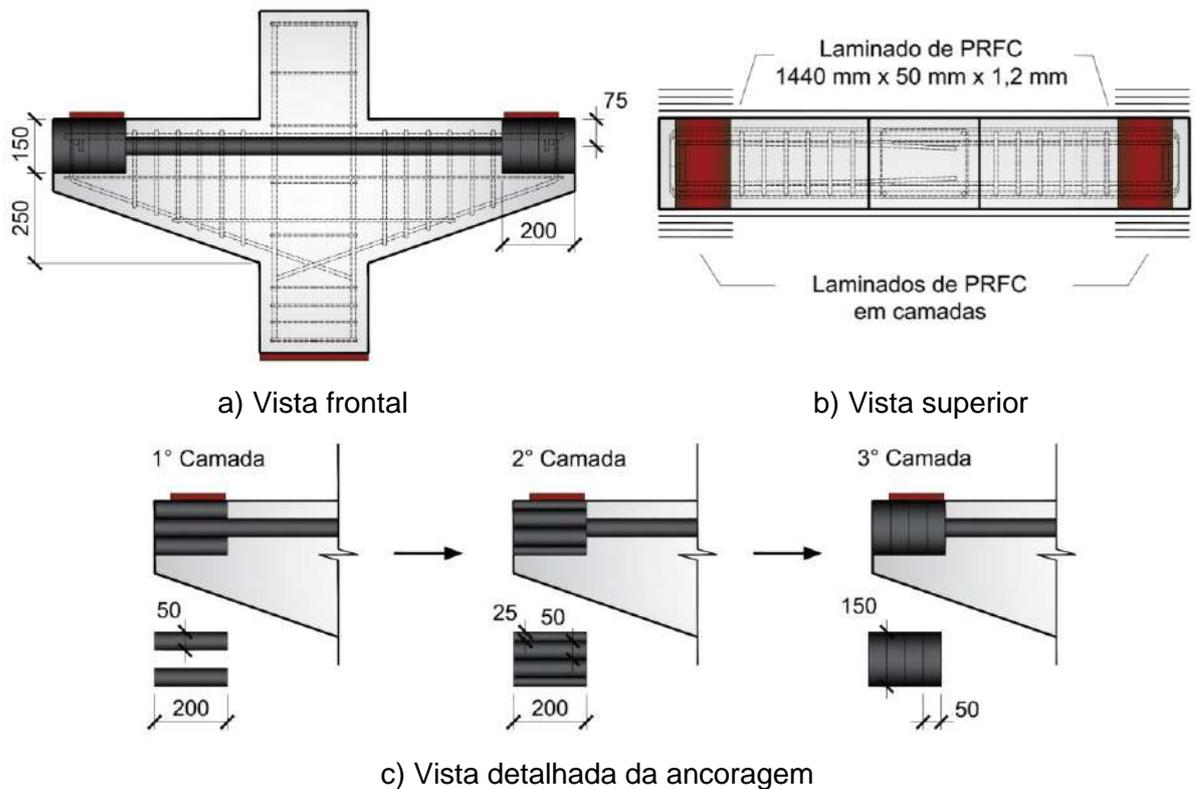


Figura 3.5 - Consolo reforçado pela técnica EBR e ancorado pelo método FT'.

A nomenclatura atribuída aos consolos está diretamente ligada às suas características únicas, sendo dividida em três grupos: os Consolos de Referência (CR), os Consolos reforçados com Laminados de PRFC e ancorados pelo método HB (CL-HB) e os Consolos reforçados com Laminados e ancorados pelo método FT (CL-FT). Os exemplares fabricados são distinguíveis pelos números que precedem as letras, que representam o parâmetro de estudo relacionado as armaduras principais de flexão.

A Tabela 3.1 apresenta informações sobre a geometria, a armadura principal e os laminados utilizados. Para as armaduras principais de flexão, são indicadas as bitolas adotadas ($\phi_{f,adot.}$), o número de barras ($n_{\phi f}$), a área de aço correspondente e a taxa de aço utilizada conforme a altura útil do consolo (ρ_{sf}). Em relação aos laminados de PRFC, são indicadas a área da seção transversal do laminado (A_l) e a taxa de reforço conforme a altura útil do consolo (ρ_l).

Tabela 3.1 - Características dos consolos com e sem laminado.

Consolos	Geometria			Armadura principal de flexão				Laminado de PRFC	
	a	d	a/d	$\phi_{f,adot.}$	$n_{\phi f}$	A_{sf}	ρ_{sf}	A_l	ρ_l
	mm	mm		mm	Adot.	mm ²	%	mm ²	%
CR 0,18		358	1,26	10		157,08	0,176	-	-
CR 0,47		340	1,32	16		402,12	0,473	-	-
CL-HB 0,18	450	363	1,24	10	2	157,08	0,173	120	0,132
CL-HB 0,47		348	1,29	16		402,12	0,462		0,138
CL-FT 0,18 ¹		355	1,27	10		157,08	0,177		0,135
CL-FT' 0,47 ²		343	1,31	16		402,12	0,469		0,140

¹ Ancoragem com área de colagem de 0,02 m²

² Ancoragem com área de colagem de 0,03 m²

3.2. Sistema de ensaio

O esquema experimental para os ensaios dos consolos adotará uma configuração de três pontos. O carregamento será aplicado por uma prensa, com incrementos de carga de 5 kN, no ponto central da face superior do pilar dos consolos. Os dois outros pontos correspondem a apoios, sendo um de primeiro gênero e outro de segundo gênero, ambos equidistantes do eixo da chapa de carregamento.

Devido à limitação do comprimento da mesa da prensa, que não permite o posicionamento adequado dos consolos, será utilizado uma chapa de aço com seção transversal de (380x90) mm e 1700 mm de comprimento. A chapa será reforçada em seu núcleo por quatro perfis de aço soldado, com seção em *I*. Essa chapa será posicionada sobre o centro da mesa, funcionando como perfil de reação. Além disso, serão posicionadas 15 chapas de aço de 20 mm de espessura, uma sobre a outra em cada ponto de apoio, para ajustar a altura necessária para acomodar o consolo.

Para a aplicação da carga, utilizou-se uma chapa de aço retangular maciça (150x350) mm. Nos apoios, outras duas chapas metálicas maciças (150x250) mm foram posicionadas, uma contendo um rolete, com diâmetro de 40 mm e comprimento de 250 mm, com restrição ao deslocamento horizontal e outra com um rolete livre, simulando seus graus de liberdade. Os detalhes de montagem do sistema de ensaio são mostrados na Figura 3.6.

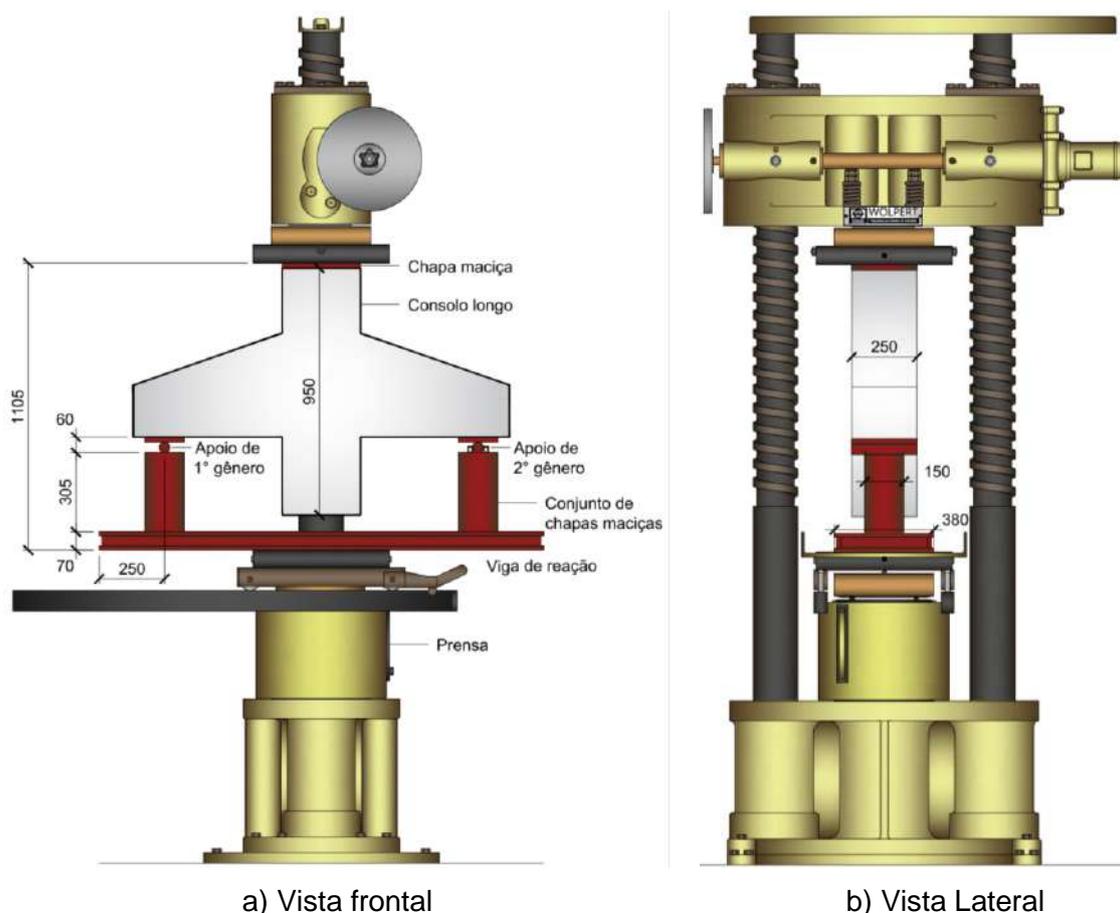


Figura 3.6 - Sistema de ensaio (Medidas em mm).

3.3. Instrumentação

O posicionamento dos elementos de monitoramento foi realizado na estrutura de modo a maximizar a eficiência na obtenção de dados referentes à rotação do consolo, à abertura de fissuras e às deformações tanto do concreto quanto das barras de aço. Isso inclui as armaduras de flexão, as armaduras de costura e as armaduras construtivas nos espécimes que receberam o reforço, e nos espécimes de referência as barras de aço monitoradas serão apenas as da armadura principal.

As leituras referentes a abertura de fissuras e rotação do consolo serão obtidas com sensores de deslocamento linear com potenciômetro de mola (PT). Para as leituras de deformação das armaduras serão utilizados extensômetros elétricos de resistência (EER's), com uma leitura em duas direções (EA), pois através dessa medida, o risco de incertezas na aquisição de dados será menor. Em relação ao concreto, serão adotados EER's nas zonas nodais principais dos consolos (EC), para medir deformações de compressão.

Por fim, serão utilizados EER's nos laminados de PRFC (EF), nas regiões próximas

ao sistema de ancoragem e na interface consolo-pilar, para a medição das deformações. Além dos EER's, potenciômetros serão utilizados para medir o escorregamento do laminado e determinar a influência da ancoragem.

A figura 3.7 mostra e exemplifica tanto internamente quanto externamente o monitoramento idealizado para os espécimes de referência. No total foram utilizados cinco potenciômetros, um LVDT, sete extensômetros para concreto e dois extensômetros para aço, totalizando quinze pontos de monitoramento.

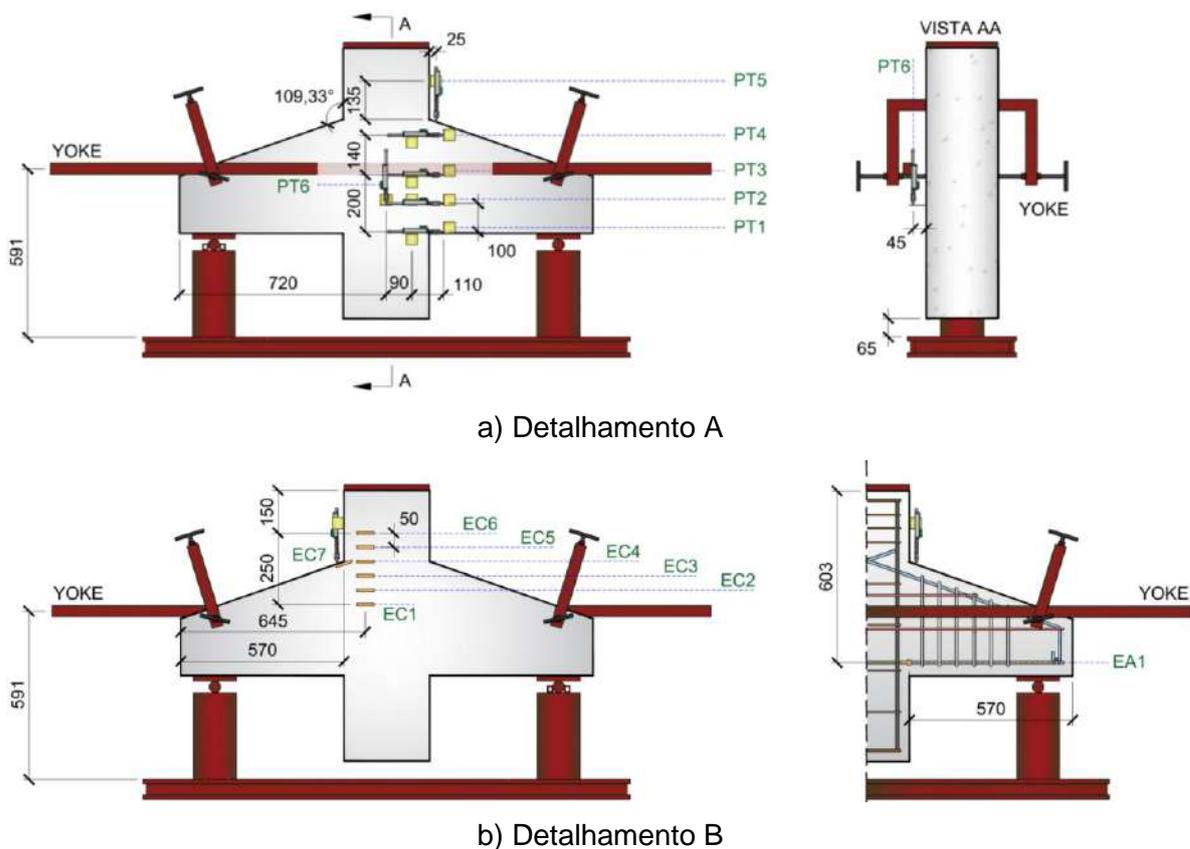
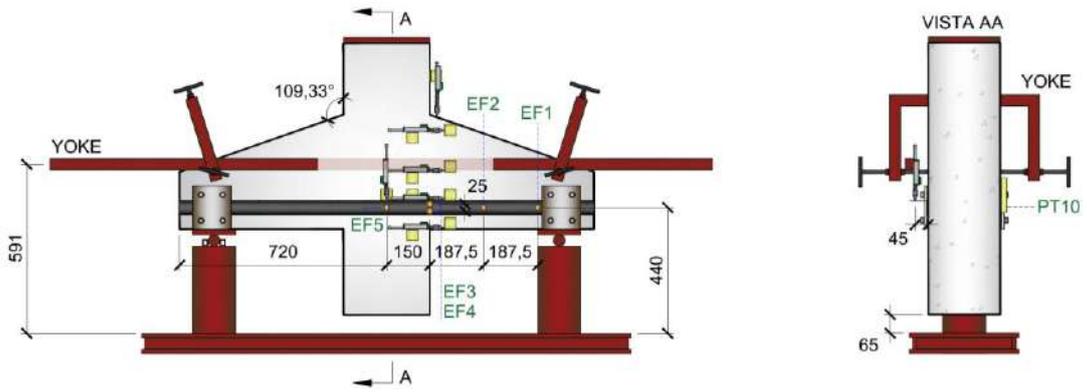
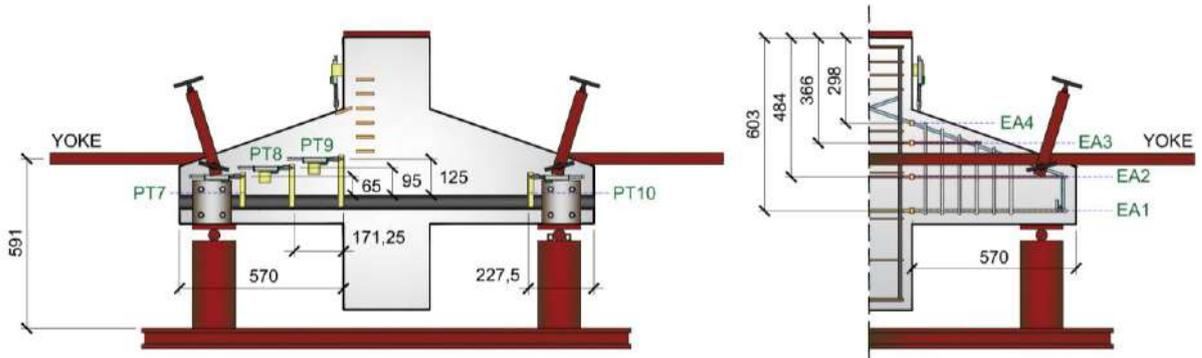


Figura 3.7 - Instrumentação dos consolos de referência.

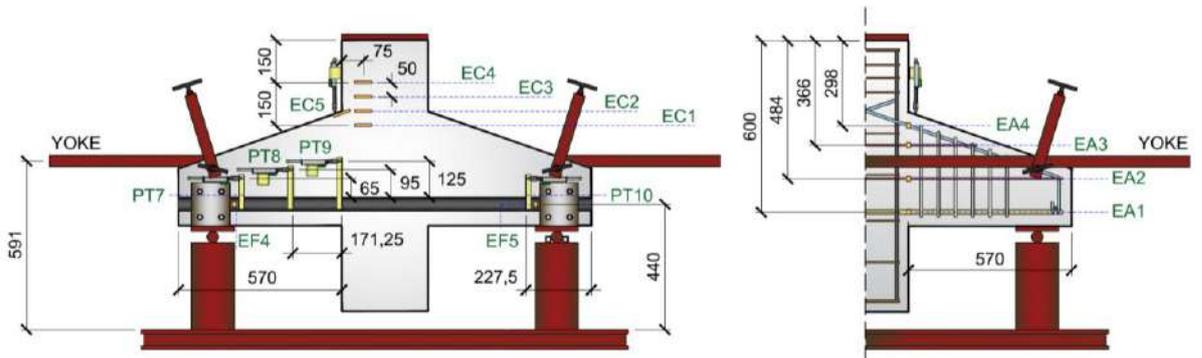
O monitoramento idealizado para os espécimes com reforço externo e ancoragem HB variou conforme a taxa de armadura principal. Essa adaptação foi necessária, pois a abertura de fissuras no consolo ocorria em pontos próximos ao nó principal de compressão, resultando na perda de EER's instalados nessa região. Assim, a configuração de monitoramento do aço e do concreto foi mantida para o consolo com armadura principal de 10 mm, enquanto uma nova configuração foi adotada para o consolo com armadura de 16 mm. As Figuras 3.8 e 3.9 mostram as instrumentações mencionadas, totalizando trinta pontos de monitoramento para o consolo com armadura de 10 mm e vinte e oito para o consolo com armadura de 16 mm.



a) Detalhamento A



a) Detalhamento A



b) Detalhamento B

Figura 3.8 - Instrumentação do consolo CL-HB 0,18.

Figura 3.9 - Instrumentação do consolo CL-HB 0,47.

Para os consolos reforçados com o sistema de ancoragem FT e FT', o monitoramento seguirá o mesmo padrão adotado para o consolo CL-HB 0,47, com algumas modificações no posicionamento dos medidores devido às dimensões da ancoragem. A Figura 3.10 mostra, tanto internamente quanto externamente, o monitoramento idealizado para os espécimes CL-FT. Foram utilizados cinco extensômetros para a fibra, cinco para o concreto, oito para o aço, cinco potenciômetros e um LVDT para o concreto e quatro potenciômetros para medir o escorregamento da fibra, totalizando vinte e oito pontos de monitoramento. Ressalta-se que a distância da origem de referência do consolo até o centroide do EA1 irá variar, sendo de 603 mm para o CL-FT 0,18 e de 600 mm para o CL-FT 0,47.

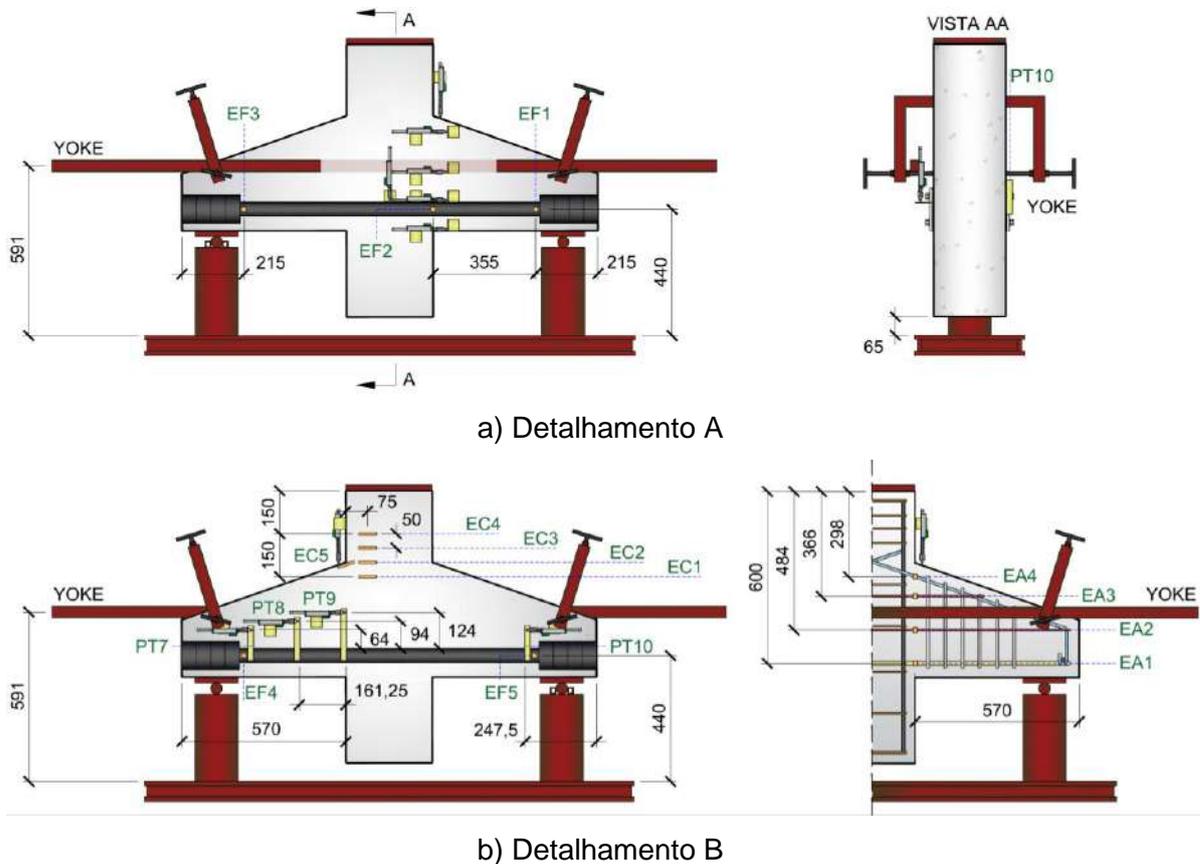


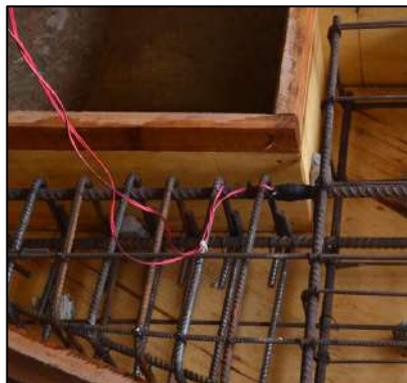
Figura 3.10 - Instrumentação dos consolos CL-FT.

Os instrumentos de medição utilizados em todos os consolos foram posicionados com o uso de dois tipos de cantoneiras, uma de acrílico e outra de aço, totalizando dezoito cantoneiras coladas no consolo. As cantoneiras de acrílico possuem diferentes dimensões, sendo a primeira com (50x50x2,5) mm, a segunda com (120x20x2,5) mm, a terceira com (150x20x2,5) mm e a quarta com (180x20x2,5) mm. A de aço, utilizada para posicionar o PT6, tem dimensões de (60x50x2,5) mm.

Em relação à aplicação dos extensômetros internos, que estão colados nas barras das armaduras dos consolos, a superfície das barras passou por um processo de lixamento. Esse procedimento foi realizado meticulosamente para garantir que as propriedades estruturais da armadura não fossem comprometidas. Após o lixamento, a superfície foi submetida a uma limpeza, garantindo a completa remoção de contaminantes, como poeira, sujeira e outros resíduos.

Para a fixação do extensômetro, é aplicada uma cola epóxi de forma uniforme. Este tipo de adesivo proporciona uma ligação robusta e durável, garantindo a fixação segura do extensômetro nas superfícies lixadas da armadura do consolo.

Com o objetivo de preservar a integridade do extensômetro e garantir seu funcionamento adequado após a conclusão da concretagem, foi aplicada uma camada de silicone. Essa medida visava proteger o dispositivo contra os efeitos adversos do ambiente durante o processo de concretagem, incluindo exposição a materiais abrasivos ou corrosivos. Além disso, todos os pontos de aplicação dos extensômetros foram envolvidos com fita isolante de alto fusão, para evitar problemas relacionados à umidade (Figura 3.11).



a) Consolos de referência



b) Consolos com reforço externo

Figura 3.11 - Aplicação dos extensômetros internos.

Posteriormente, todos os medidores serão soldados e conectados a fios que serão conectados a um condicionador para a medição de deformações. Além disso, para a leitura das deformações no concreto, extensômetros externos foram posicionados na região da interface consolo pilar onde o concreto está sujeito a compressão. Sendo o substrato do concreto dos consolos preparado nessa região com adesivo epóxi para deixar a superfície regular, e assim, tornar a obtenção dos dados mais eficiente.

3.4. Propriedades e características dos materiais

3.4.1. Fôrmas

Foram confeccionados seis moldes de fôrmas em madeira, com dimensões específicas para a formação do consolo previsto neste programa experimental (Figura 3.12). Além disso, as bases que compõem as fôrmas também foram feitas de madeira, sendo utilizados ripões de madeira para garantir a estabilidade da fôrma durante a concretagem. Ressalta-se que, antes da concretagem, foi aplicada uma demão de desmoldante vegetal da marca Linhal em cada fôrma, visando facilitar a retirada dos espécimes.



a) Vista lateral



b) Vista frontal

Figura 3.12 - Fôrmas de madeira.

3.4.2. Concreto

Para essa pesquisa, foram utilizados consolos de concreto de peso normal. O traço de concreto adotado visou assegurar uma resistência característica à compressão (f_{ck}) de 30 MPa aos 28 dias, com uma proporção de 1:1,6:2,4:0,43, correspondendo a cimento, areia, brita e água, respectivamente. O cimento empregado foi o Portland CP-III, e a brita utilizada foi do tipo 1.

Para assegurar o valor idealizado do f_{ck} dos consolos, foram realizadas adaptações nos valores determinados inicialmente, com um acréscimo de 30% sobre o valor calculado, considerando possíveis variações e imprevisões ambientais que possam afetar os agregados. Na Tabela 3.2 é apresentado a quantidade de materiais empregados na confecção dos consolos.

Tabela 3.2 - Quantidade de material utilizado na pesquisa.

Material	Cimento	Areia	Brita	Água
Unidade de medida	kg	kg	kg	kg
Quantidade	69,47	111,20	166,59	29,87
Quantidade +30%	90,31	144,55	216,56	38,046
Adaptação	-	-	-	46,046

Os consolos foram concretados em seis etapas, com um lançamento de concreto para cada consolo, totalizando seis lançamentos. Esse controle visou uma caracterização mais eficiente da resistência mecânica do concreto lançado em cada consolo, sendo confeccionados e testados nove corpos de prova cilíndricos (100x200) mm para cada consolo. Ressaltasse que antes do lançamento, a consistência do concreto foi testada pelo abatimento do tronco de cone, gerando resultados no valor de 13 ± 1 .

Na Figura 3.13, é mostrado o processo de testagem do concreto utilizado em cada lançamento. A Figura 3.14 mostra a concretagem dos corpos de prova (CPs), sendo confeccionados nove para cada lançamento, três para ensaio de tração, três para compressão e três para módulo de elasticidade.



a) Tronco de cone



b) Abatimento do concreto

Figura 3.13 - Slump test.

a) Concretagem dos CP's



b) CP's

Figura 3.14 - Produção dos CP's.

Durante a etapa de concretagem (Figura 3.15a) e a inserção do vibrador (Figura 3.15b), seguiram-se as recomendações normativas estabelecidas na ABNT NBR 5738 (2015) para moldagem e cura de corpos de prova em concreto e na ACI 309 (2005) para o manuseio correto do vibrador de concreto. Após a conclusão do preenchimento, utilizou-se uma régua para remover o excesso de concreto, uniformizando assim a superfície moldada. A cura dos consolos, incluindo os CP's, foi realizada por sete dias, sendo umedecidos três vezes ao dia.



a) Concretagem

b) Vibração do concreto

Figura 3.15 - Concretagem dos consolos.

Para a obtenção das propriedades mecânicas do concreto utilizado nos consolos longos, foram ensaiados todos os CPs produzidos para cada espécime. Os ensaios foram realizados no campus de Tucuruí, no LEC/UFPA, utilizando uma prensa Wolpert com capacidade de 1000 kN. Os resultados dos ensaios serão apresentados com base na média dos CP's testados para cada finalidade, considerando os valores médios do módulo de elasticidade, resistência à compressão e resistência à tração. Esses resultados serão distribuídos entre os consolos analisados, conforme apresentado na Tabela 3.3. No total, foram ensaiados 54 CP's, sendo nove para cada consolo.

Tabela 3.3 - Propriedades mecânicas do concreto.

Consolo	$E_{c, med.}$	$f_{c, med.}$	$f_{ct, med.}$
	GPa	MPa	MPa
Todos os consolos	23,32	32 ± 3	3,80

3.4.3. Aço

Os consolos longos produzidos foram armados com barras de aço CA50, e as armaduras dos pilares foram confeccionadas com o mesmo material. Conforme este

programa experimental, as regiões monitoradas pelos instrumentos de medição serão selecionadas para os ensaios de caracterização, abrangendo as armaduras principais de flexão, as armaduras de costura e as armaduras construtivas. O aço utilizado nas armaduras foi adquirido por meio de fornecedores do município de Tucuruí-PA. Na Figura 3.17 é mostrado um dos modelos confeccionados conforme projeto.

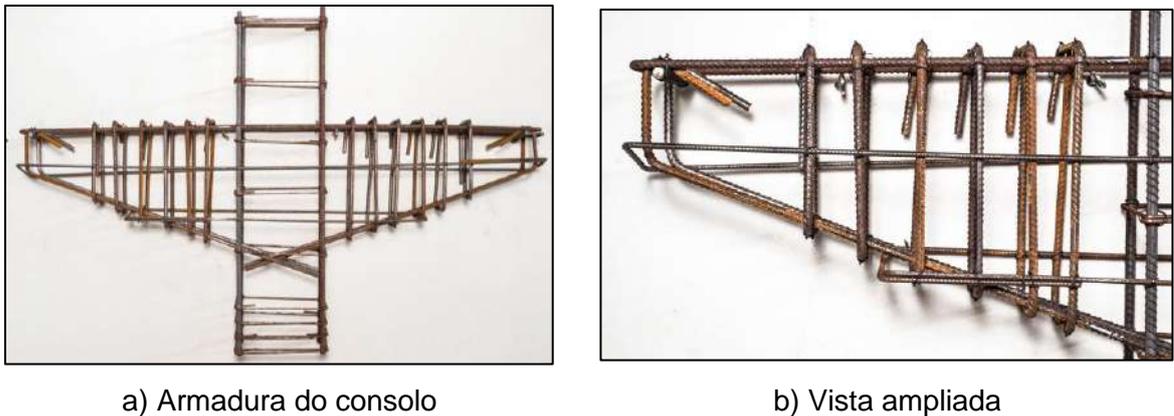


Figura 3.16 - Armadura de aço dos consolos.

As barras selecionadas para os ensaios possuem superfície nervurada e bitolas de 6,3 mm, 10 mm e 16 mm. Elas foram submetidas a ensaios de tração conforme as diretrizes da norma NBR ISO 6892-1 (2018), e suas curvas tensão-deformação foram plotadas nos gráficos da Figura 3.17, com os resultados na Tabela 3.4.

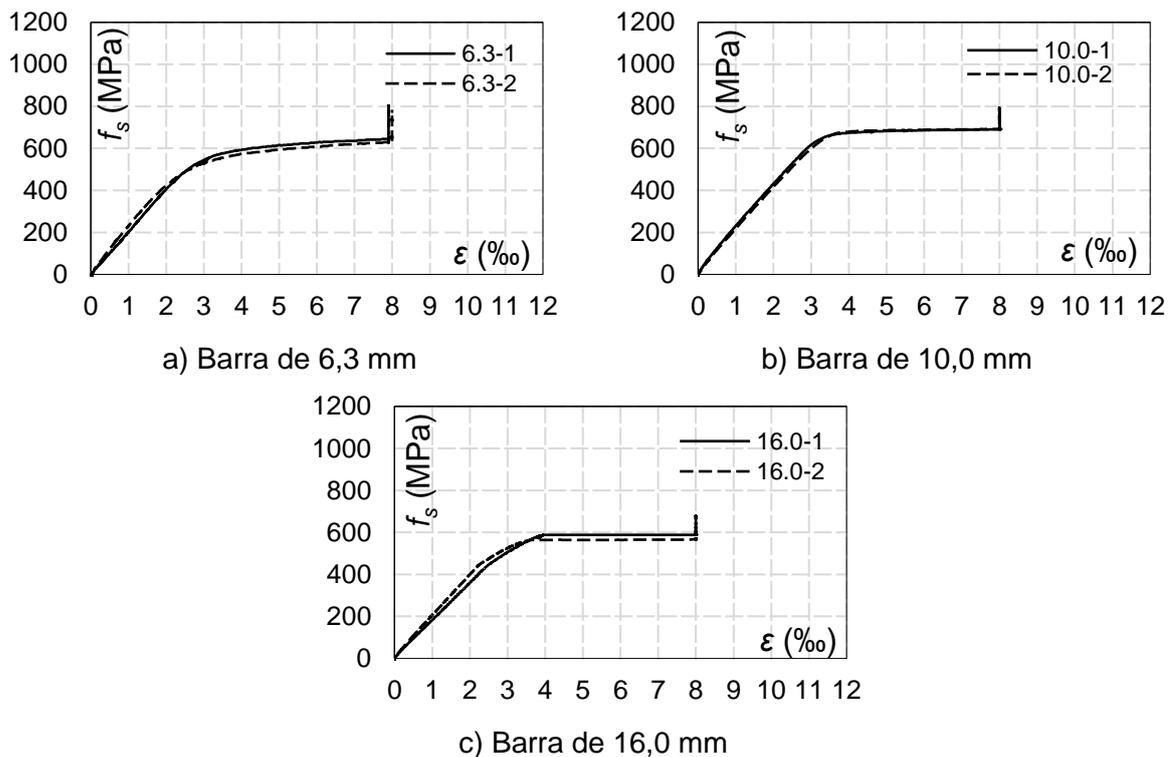


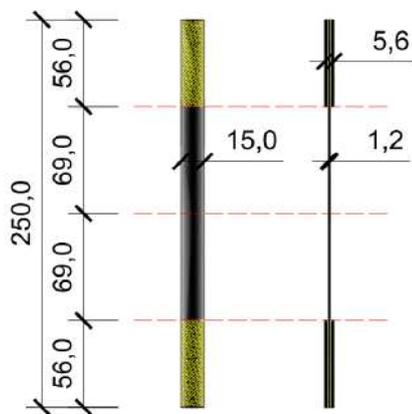
Figura 3.17 - Gráfico de tensão e deformação das barras de aço.

Tabela 3.4 - Propriedades mecânicas das barras de aço.

Barra de aço	$E_{s,méd.}$	$f_{ys,méd.}$	$\epsilon_{ys,méd.}$	$f_{yu,méd.}$	$\epsilon_{yu,méd.}$
mm	GPa	MPa	‰	MPa	‰
6,3	209,30	410,00	2,00	789,53	7,85
10,0	212,80	590,30	2,80	790,72	8,00
16,0	191,40	576,00	3,02	673,07	8,00

3.4.4. Laminado de Polímero Reforçado com Fibra de Carbono (PRFC)

O laminado de fibra de carbono utilizado para o reforço dos consolos longos é produzido pela MC Bauchemie. Trata-se de um compósito com matriz de resina epóxi, reforçado com fibra de carbono unidirecional por pultrusão. Para determinar suas propriedades mecânicas, foram realizados ensaios de caracterização do material, seguindo as recomendações da norma ASTM D3039 (2021). A preparação dos materiais para ensaio e a execução dos testes foram realizadas, respectivamente, no LACEEM/UFPA e no laboratório de engenharia mecânica da UFPA, campus Tucuruí. Os corpos de prova confeccionados para o ensaio foram desenvolvidos de modo a evitar modos de ruptura localizados nas regiões dos ganchos de fixação da máquina de ensaios. Para isso, as extremidades dos corpos de prova foram reforçadas por meio de sobreposições de laminados, colados com resina epóxi e com 1,0 mm de espessura, sendo os laminados do mesmo lote dos que serão testados. A Figura 3.18 mostra as dimensões estabelecidas conforme a norma, além de fotografias do corpo de prova finalizado e posicionado na máquina.



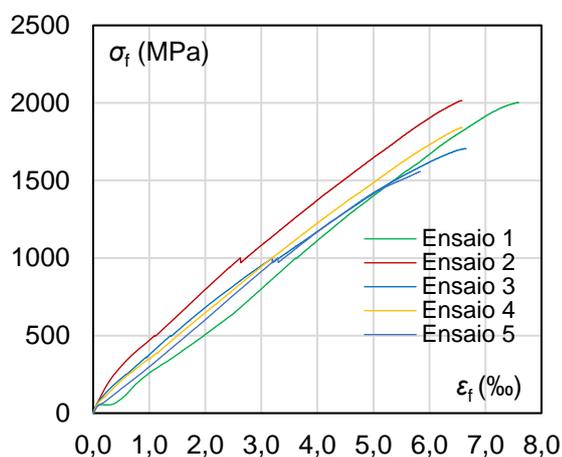
a) Dimensões



b) Ensaio

Figura 3.18 - Características do corpo de prova.

Foram confeccionados cinco corpos de prova com as mesmas dimensões e preparo, cujo comportamento tensão-deformação, modos de ruptura e propriedades mecânicas estão mostrados na Figura 3.19 e apresentados na Tabela 3.5. A tensão última média foi de 1824,00 MPa, e o módulo de elasticidade médio, de 296,33 GPa.



a) Tensão deformação do PRFC

Figura 3.19 - Caracterização do laminado de PRFC.

Tabela 3.5 - Propriedades mecânicas do laminado de PRFC

Ensaio	f_{fu}	ϵ_f	E_f
	MPa	‰	GPa
1	2002,22	7,59	280,38
2	2015,00	6,58	333,11
3	1705,00	6,66	283,83
4	1840,00	6,58	297,80
5	1557,78	5,84	286,51
Média	1824,00	6,65	296,33

3.4.5. Resina epóxi

A resina utilizada para o reforço dos consolos é produzida pela Clever Solutions e comercializada sob o nome S&P 220 PL (Figura 3.20). Esse adesivo é indicado pelo fabricante para a colagem dos laminados e trata-se de um adesivo estrutural bicomponente à base de epóxi. Ressalta-se que o material apresentado não foi ensaiado, sendo utilizadas as propriedades físicas e mecânicas fornecidas pelo fabricante (Tabela 3.6).

Tabela 3.6 - Propriedades físicas e mecânicas da resina epóxi.

Resina	Densidade	Processo de cura	Resistência à compressão	Modulo de elasticidade	Deformação
	Kg/dm ³	Dias	MPa	MPa	%
S&P 220 PL	1,60	7	≥ 90	≥ 7000	0,01



a) Resina utilizada



b) Mistura dos componentes

Figura 3.20 - Resina epóxi utilizada.

3.4.6. Chapas e parafusos de aço

As chapas de aço utilizadas na ancoragem dos laminados de PRFC foram adquiridas por meio de fornecedores de materiais na cidade de Belém-PA. Já os parafusos, sendo varões roscados com diâmetro de 12,5 mm, e as porcas foram obtidos de fornecedores na cidade de Tucuruí-PA. Com esses materiais, é possível montar o sistema de ancoragem proposto na pesquisa, conforme mostra a Figura 3.21.



a) Face frontal



b) Face posterior

Figura 3.21 - Sistema de ancoragem para os laminados de PRFC.

As propriedades mecânicas dos materiais que compõem o sistema de ancoragem não foram ensaiadas, sendo utilizadas as propriedades mecânicas indicadas pela

norma ABNT NBR 8800 (2024). Na Tabela 3.7 são apresentadas as propriedades mecânicas desses materiais.

Tabela 3.7 - Propriedades mecânicas das chapas e parafusos.

Material	Classificação	f_y	f_u
		MPa	MPa
Varão roscado	Aço carbono	250	400 a 500
Chapa de aço	Aço carbono	250	400 a 500

3.5. Processo executivo do reforço dos consolos

3.5.1. Preparação da superfície

A execução do reforço e da ancoragem inicia-se com a preparação dos espécimes, utilizando uma esmerilhadeira para a escarificação da superfície e furadeira para a perfuração nas regiões designadas no projeto. No processo de escarificação dos consolos, foram utilizados dois componentes abrasivos, sendo eles, o rebolo e a escova de aço. Já na perfuração, empregaram-se cinco tipos de brocas, com diâmetros variando de 5 a 14 mm.

Após a desmoldagem dos consolos, realizou-se o desbaste da superfície de contato da região de reforço utilizando o rebolo (Figura 3.22a). O objetivo desse processo é regularizar a superfície de aplicação do reforço e do sistema de ancoragem, removendo excesso de concreto ou outros materiais indesejáveis, garantindo a aderência ideal para a aplicação do laminado de PRFC e das chapas de aço.

Após a conclusão do desbaste com o rebolo, as chapas de aço foram posicionadas nas regiões indicadas no programa experimental, fixadas com grampos. Em seguida, os consolos foram perfurados através dos furos preexistentes nas chapas (Figura 3.22b). Para facilitar o processo e evitar danos à estrutura, foram utilizadas brocas de diferentes diâmetros, progressivamente, até atingir uma abertura de 14 mm de diâmetro e um embutimento de 80 mm. Ressalta-se que, ao atingir o diâmetro de 12,5 mm, as chapas foram removidas para permitir o aumento do diâmetro final sem comprometer a integridade das chapas.

Na terceira etapa de preparação da superfície, utilizou-se uma escova de aço para remover impurezas residuais que poderiam ter permanecido após o desbaste inicial (Figura 3.22c). Em seguida, todos os espécimes foram submetidos a um processo de hidrojateamento para limpeza geral (Figura 3.22d), incluindo os furos, visando a remoção de quaisquer materiais indesejáveis presentes nessas regiões.



a) Desbaste utilizando o rebolo



b) Furo para a ancoragem do reforço



c) Desbaste utilizando a escova de aço



d) Lavagem da superfície e furos

Figura 3.22 - Processo de preparação da superfície.

Na segunda etapa de preparação da superfície do consolo, visando assegurar a aderência e estabilidade do reforço, foram utilizados materiais como fita crepe, acetona e resina epóxi. Inicialmente, a região de aplicação do reforço e do sistema de ancoragem foi delimitada conforme as dimensões das chapas e dos laminados. Em seguida, a área delimitada foi limpa com acetona, para garantir a aderência da resina epóxi, que foi aplicada logo após para uniformizar a superfície de contato com o laminado de PRFC.

Na Figura 3.23, é mostrada a demarcação e limpeza da região, bem como a aplicação da resina epóxi. Ressalta-se que a quantidade de acetona e resina epóxi aplicada foi em pequenas doses, especialmente a camada de resina.



a) Demarcação e limpeza com acetona



b) Regularização da superfície com resina

Figura 3.23 - Limpeza e regularização da superfície.

3.5.2. Aplicação do laminado de PRFC

Para a aplicação do laminado, este foi cortado com comprimentos equivalentes ao da região previamente preparada. Antes da aplicação da resina no laminado, preparação esta realizada para sua fixação no consolo, o laminado foi limpo com acetona. A aplicação foi realizada com o auxílio de um gabarito, a fim de garantir uma espessura uniforme de 1,0 mm. Dessa forma, a resina foi aplicada de maneira uniforme em toda a face do laminado, sem falhas, conforme ilustrado na Figura 3.24.



a) Limpeza com acetona



b) Aplicação da resina no reforço

Figura 3.24 - Limpeza e aplicação da resina no laminado de PRFC.

Após a aplicação da camada de resina, o reforço foi posicionado na região

previamente preparada para sua instalação. Para garantir o contato perfeito entre o laminado e a superfície do concreto, eliminando bolhas de ar e o excesso de resina, foi realizado o procedimento de compressão com rolo de borracha ao longo da região de aplicação do reforço. A Figura 3.25 mostra os procedimentos de posicionamento do laminado, sendo instalados, ao final da aplicação, ganchos metálicos com a finalidade de evitar o escorregamento do laminado durante o processo inicial de cura da resina.



Figura 3.25 - Aplicação do laminado no consolo.

3.5.3. Aplicação das ancoragens

Para o método de ancoragem HB-PRFC, foram realizados tratamentos tanto nas chapas das ancoragens quanto nos furos que receberam os parafusos. Inicialmente, todas as quatro chapas de aço utilizadas foram limpas com acetona, preparando-as para a aplicação da resina epóxi. Antes da fixação, os furos foram preenchidos com uma quantidade adequada de resina, possibilitando a posterior instalação dos parafusos. Para o aperto dos parafusos, não foram realizados controles de torque, sendo uma justificativa a não garantia desse controle em obra. Destaca-se o papel fundamental desse processo, uma vez que a resina atua como agente de integração entre os parafusos e o concreto.

Em relação à movimentação do laminado de PRFC na aplicação da ancoragem HB, foram utilizados ganchos fixadores em ambas as extremidades do reforço, para assim evitar a saída do reforço do local demarcado em projeto. A Figura 3.26 mostra o processo de aplicação da ancoragem no laminado.



a) Limpeza com acetona



b) Aplicação da resina na ancoragem



c) Preenchimento dos furos com resina



d) Aplicação da ancoragem

Figura 3.26 - Aplicação da ancoragem HB.

O método de ancoragem FT-PRFC é aplicado exclusivamente em camadas sobre a superfície do consolo. As etapas preparatórias anteriores à aplicação da ancoragem são semelhantes às adotadas no reforço com HB-PRFC, com a única diferença sendo a ausência da perfuração de furos e, conseqüentemente, do seu preenchimento com resina epóxi.

Inicialmente, os laminados foram preparados de acordo com as dimensões especificadas em projeto para cada camada. A primeira camada de cada ancoragem é composta por dois laminados com dimensões de (50 x 200) mm. A segunda camada contém quatro laminados, sendo dois com dimensões de (50 x 200) mm e dois com (25 x 200) mm. A última camada, disposta transversalmente, é formada por quatro laminados com dimensões de 50 x 150 mm. Vale ressaltar que a espessura prevista

para a resina aplicada em cada camada é a mesma adotada para o reforço, sendo de 1 mm. Na Figura 3.27 são mostrados os processos de preparação e colagem do método de ancoragem descrito.



a) Preparação dos laminados



b) Primeira camada de aplicação



c) Segunda camada de aplicação



d) Terceira camada de aplicação

Figura 3.27 - Aplicação da ancoragem FT'.

Em relação às diferentes configurações de medição para cada camada, propostas nas duas variações da ancoragem FT neste programa experimental, o processo executivo não apresenta alterações. A única diferença está no método de fixação do reforço, já que são aplicadas chapas de madeira no intervalo entre a primeira e a segunda camada, com o objetivo de manter o reforço na posição previamente demarcada.

4. RESULTADOS

4.1. Deslocamentos verticais

Na Figura 4.1, são mostrados os gráficos que representam a deflexão dos consolos sem reforço e dos reforçados com sistemas de ancoragem, conforme a carga aplicada. Os eixos x e y correspondem, respectivamente, ao deslocamento vertical (δ) e a carga aplicada nos consolos (P). Já as linhas vermelhas tracejadas representam as cargas máximas resistentes. Os gráficos foram separados conforme a taxa de armadura principal (ρ_s), sendo comparados os consolos de referência, os reforçados e ancorados pelo método HB-PRFC e os reforçados e ancorados pelo método FT-PRFC.

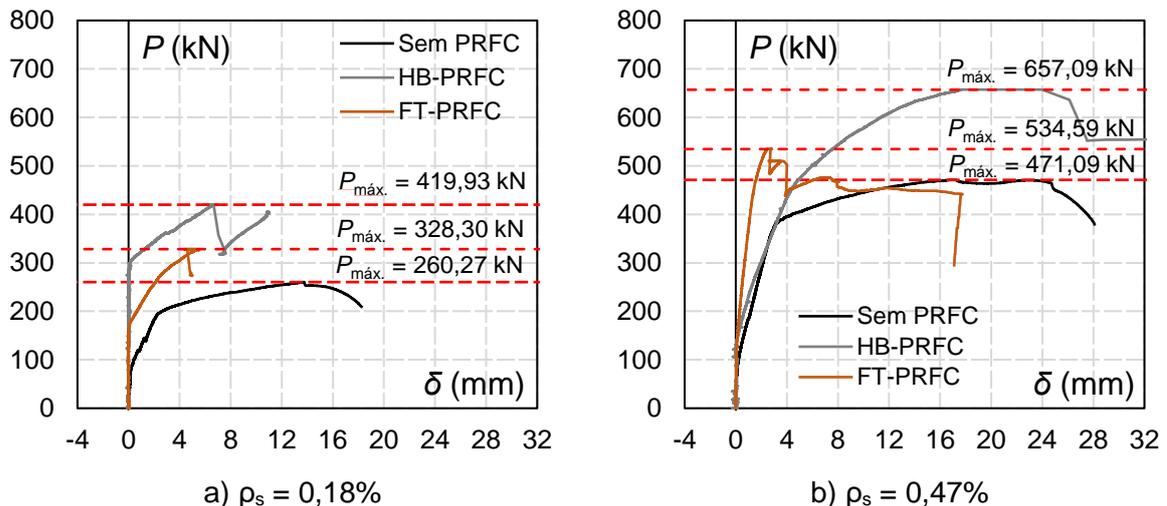


Figura 4.1 - Deslocamentos verticais dos consolos.

Nota-se, inicialmente, que os consolos reforçados tiveram aumento na rigidez à flexão, aumentando a carga de início de fissuração e escoamento do aço e a carga máxima alcançada em relação aos de referência. Este comportamento foi similar nos consolos com as duas taxas de aço (0,18% e 0,47%). Além disso, os consolos reforçados pelo método HB-PRFC apresentam comportamento mais dúctil do que os reforçados pelo método FT-PRFC, sendo observado, ainda, que ambas as ancoragens, quando comparadas aos dados de referência, apresentaram deflexões menores, para o mesmo nível de carregamento, até a carga máxima do de referência, sendo uma exceção o consolo com taxa de 0,47, reforçado pelo método HB-PRFC, que apresentou deflexão final similar ao de referência.

Na Tabela 4.1, é apresentado um resumo dos resultados de carga obtidos por meio dos ensaios dos consolos. Nela, são informadas as cargas de abertura de fissuras (P_w), as cargas de escoamento do aço (P_{ys}), a carga máxima ($P_{m\acute{a}x.}$) e seus respectivos incrementos de resist\ancia, calculados a partir da raz\ao entre as cargas dos consolos refor\cados e as dos consolos de refer\ancia.

Tabela 4.1 - Resultados de carga e incremento de resist\ancia.

Consolo	ρ_s %	P_w kN	P_{ys} kN	$P_{m\acute{a}x.}$ kN	$P_{ys} / P_{ref.}$	$P_{m\acute{a}x.} / P_{ref.}$
CR 0,18	0,18	80,683	192,60	260,27	-	-
CR 0,47	0,47	100,00	364,86	471,09	-	-
CL-HB 0,18	0,18	132,79	286,16	419,93	1,48	1,61
CL-HB 0,47	0,47	144,55	468,93	657,09	1,28	1,39
CL-FT 0,18 ¹	0,18	100,94	250,88	328,30	1,30	1,26
CL-FT' 0,47 ²	0,47	124,95	392,98	534,59	1,07	1,13

¹ Ancoragem com \area de colagem de 0,02 m²

² Ancoragem com \area de colagem de 0,03 m²

Observou-se que, para a ancoragem HB-PRFC, os consolos obtiveram valores de incremento maiores do que aqueles com a ancoragem FT-PRFC. Al\em disso, \e not\orio que h\aa uma queda no incremento de resist\ancia em ambas as ancoragens com o aumento da taxa de armadura principal de flex\ao, obedecendo \a tend\encia observada nos consolos refor\cados ensaiados por autores que comp\oem o estado da arte desta pesquisa. Vale ressaltar que a perda de incremento seria maior no consolo CL-FT' 0,47, uma vez que sua ancoragem foi modificada, com o aumento da \area de colagem de 0,02 para 0,03 m², o que proporcionou um valor de incremento de 1,13.

4.2. Abertura de fissuras

Os gr\aficos referentes a abertura de fissuras dos consolos de refer\ancia e dos refor\cados com sistemas de ancoragem s\ao mostrados na Figura 4.2. Os eixos x e y correspondem, respectivamente, a abertura de fissura (w) e a carga aplicada nos consolos (P). Os gr\aficos foram desenvolvidos para cada um dos esp\ecimes ensaiados, sendo os dados de leitura do ponto PT1 retirados dos consolos refor\cados, devido a erros de medi\cao.

Observa-se, em todos os gr\aficos dos consolos, que, \a medida que a carga aumenta, as fissuras tamb\em se abrem progressivamente. Entretanto, nos consolos refor\cados, esse comportamento ocorre com menor magnitude, sendo semelhantes os comportamentos dos consolos com as ancoragens HB-PRFC e FT-PRFC. Ressalta-

se que, mesmo apresentando comportamentos semelhantes, os consolos reforçados com a ancoragem HB-PRFC exibem valores de abertura de fissuras maiores do que aqueles com a outra ancoragem, devido ao maior acréscimo de carga proporcionado pela mesma.

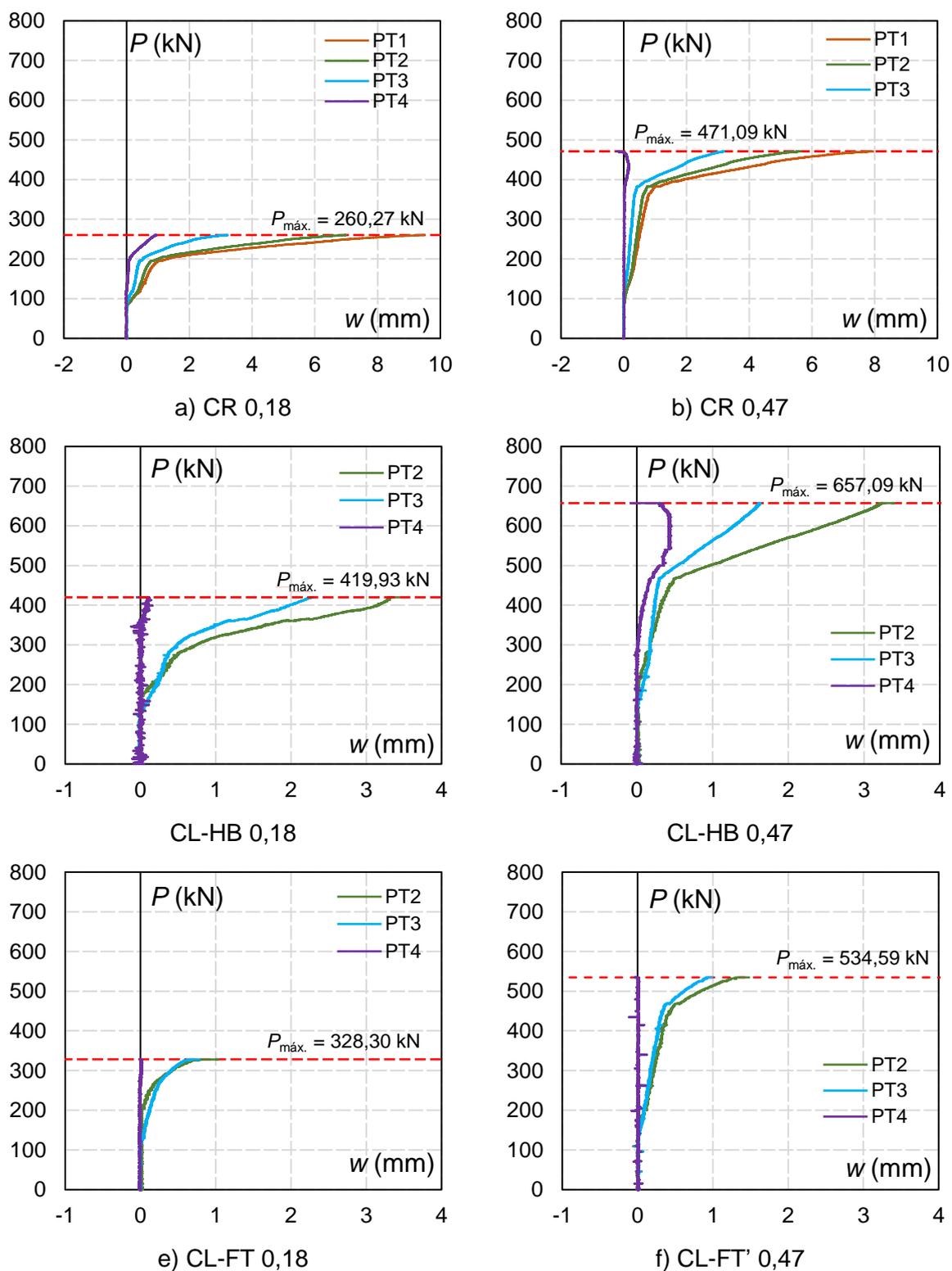


Figura 4.2 - Abertura de fissuras nos consolos.

4.3. Bloco de compressão

Os resultados mostrados nas Figuras 4.3 e 4.4 referem-se às leituras de deformação do concreto na região nodal dos consolos com ρ_s igual a 0,18%. Os gráficos demonstram esse comportamento em duas perspectivas. A primeira ilustra a deformação do concreto (ϵ_c) em função da carga aplicada (P), enquanto a segunda mostra a deformação conforme o posicionamento dos extensômetros utilizados, sendo a referência do posicionamento a altura do consolo (h).

Para o gráfico que relaciona a deformação do concreto com o posicionamento dos extensômetros, a análise foi feita considerando três estágios de carga, sendo elas a carga de início de abertura de fissura (P_w), a carga de escoamento do aço da armadura principal (P_{ys}) e carga máxima resistida pelo consolo ($P_{m\acute{a}x.}$). Os extensômetros estão dispostos de baixo para cima, organizados em um sistema numérico crescente.

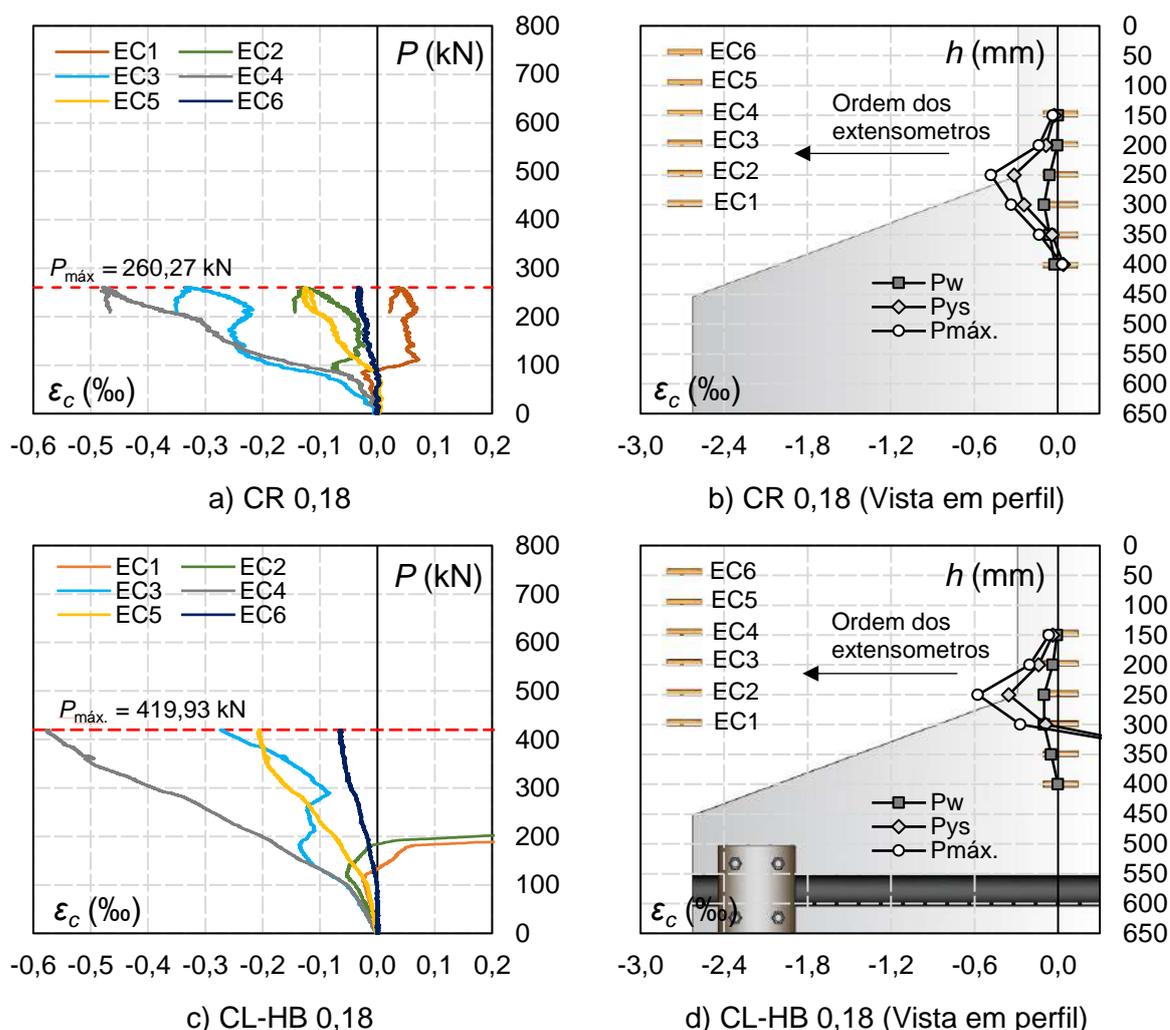


Figura 4.3 - Deformações no concreto dos consolos com ρ_s igual a 0,18% (Parte 1).

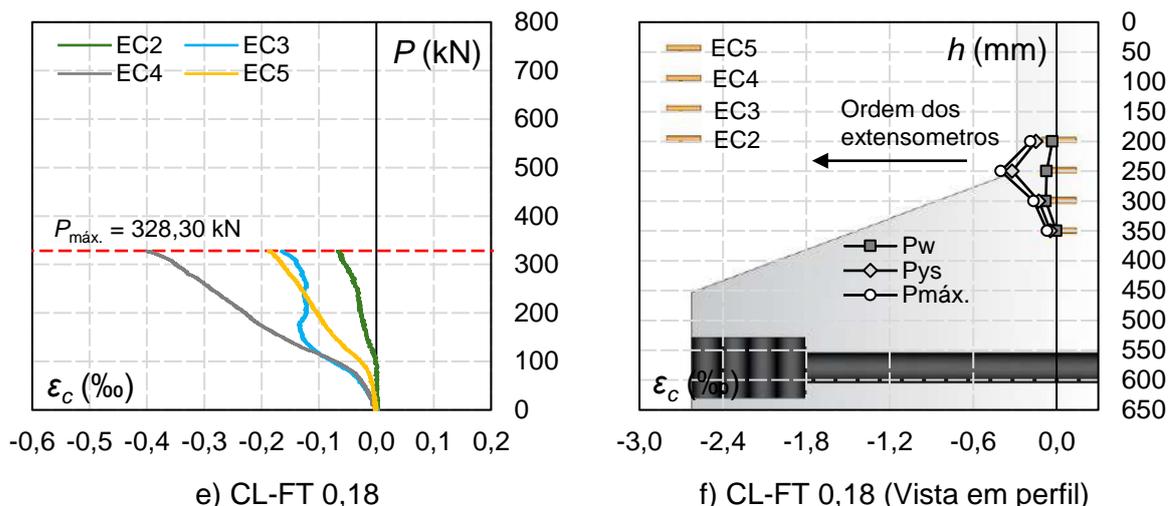


Figura 4.4 - Deformações no concreto dos consolos com ρ_s igual a 0,18% (Parte 2).

A partir dos gráficos apresentados, é possível observar que o laminado de PRFC exerce influência nas deformações que ocorrem na região analisada. Para o consolo reforçado com ancoragem HB-PRFC, são observadas pequenas variações de deformação para mais em todos os pontos de carga monitorados, com destaque para o extensômetro EC4, que apresentou um incremento de deformação de 1,19 na carga máxima de aplicação. Entretanto para os consolos reforçados com ancoragem FT-PRFC os valores de deformação muitas vezes são parecidos com os de referência, tendo algumas exceções de incrementos de deformação no concreto.

Em relação aos consolos com ρ_s igual a 0,47%, observa-se, nas Figuras 4.5 e 4.6, os resultados de deformações no concreto na região comprimida dos consolos. Os gráficos mostram o comportamento em duas perspectivas, conforme visto nos gráficos anteriores.

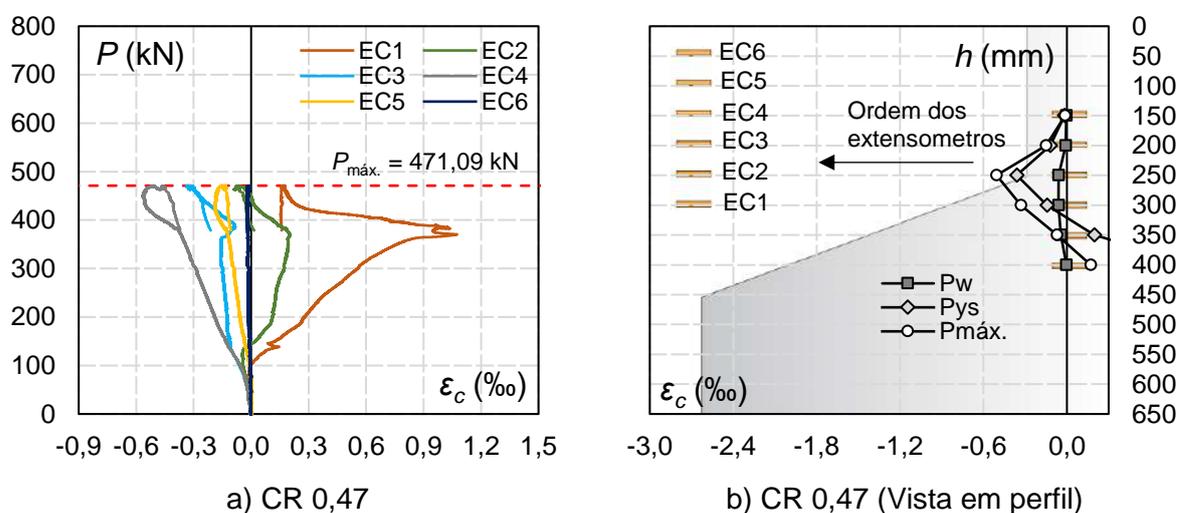


Figura 4.5 - Deformações no concreto dos consolos com ρ_s igual a 0,47% (Parte 1).

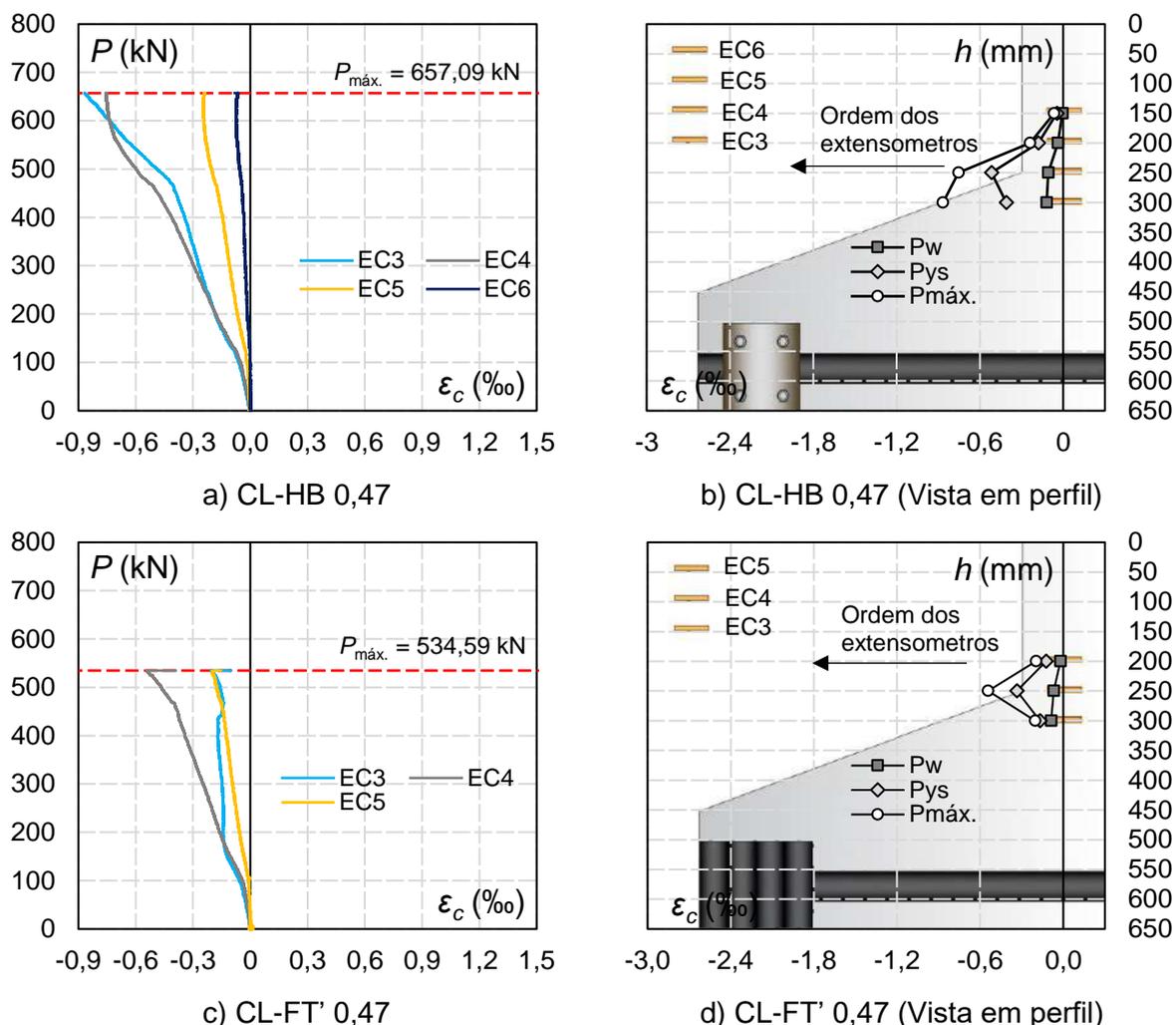


Figura 4.6 - Deformações no concreto dos consolos com ρ_s igual a 0,47% (Parte 2).

Observa-se que, para os consolos com ρ_s igual a 0,47%, os níveis de deformação na região comprimida são maiores. No consolo reforçado com o método HB-PRFC, é possível identificar incrementos de deformação desde o estágio de cargas correspondentes à abertura de fissuras, destacando-se o extensômetro EC3, com um aumento de deformação de 2,63 quando os consolos atingiram a carga máxima. Além disso, diferentemente dos demais consolos analisados, este não apresentou maiores deformações no EC4. No consolo com o método FT-PRFC, os incrementos de deformação foram menores do que os observados com o método HB, sendo o EC4 o extensômetro com as maiores leituras, com um incremento de deformação de 1,07.

4.4. Deformações nos laminados de PRFC

Na Figura 4.7 são mostrados os gráficos com as deformações do laminado, nas regiões próximas a ancoragem. Os eixos x e y correspondem, respectivamente, a deformação do laminado (ϵ_l) e a carga aplicada nos consolos (P). Os extensômetros

EF1 e EF3 correspondem a um dos laminados que reforçam o consolo, sendo o laminado do outro lado monitorado pelos extensômetros EF4 e EF5. Já as linhas vermelhas tracejadas na orientação vertical correspondem a deformação última da fibra, e as linhas em cinza a deformação de descolamento do laminado.

Para efeito comparativo, e devido à ausência de extensômetros nas regiões próximas à ancoragem, foi acrescentado na Figura 4.7a um extensômetro que não está posicionado exatamente no mesmo ponto de monitoramento, mas em uma região próxima, conforme descrito no programa experimental. O extensômetro EF6 (nomeado dessa forma para se distinguir dos demais EF2) está posicionado a 18 cm do extensômetro EF1.

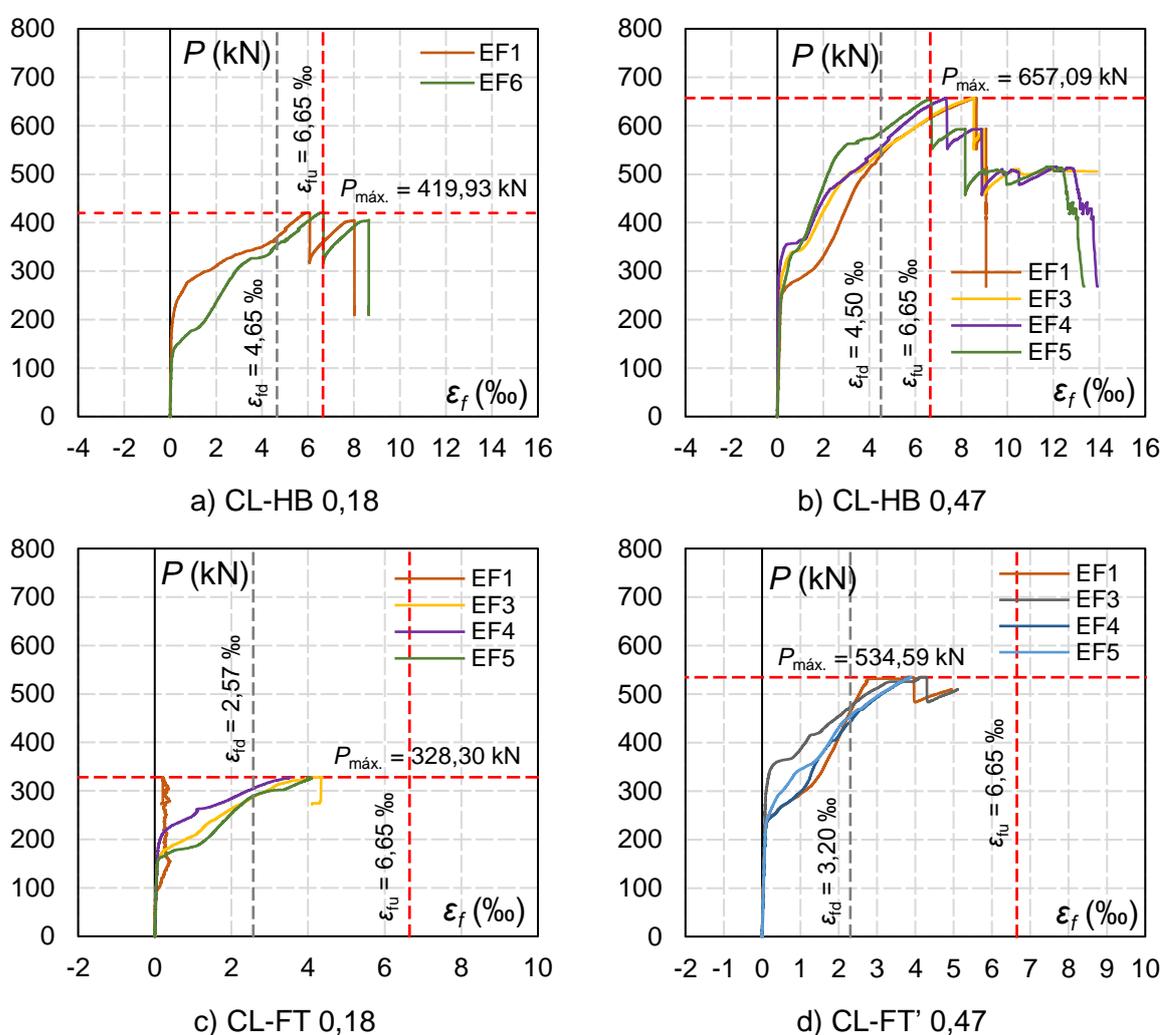


Figura 4.7 - Deformações no laminado de PRFC nas regiões próximas a ancoragem.

Com base nos gráficos apresentados, nota-se que o laminado começa a se descolar do substrato do consolo a partir do início da abertura de fissuras, comportamento também observado nas bibliografias consultadas. Ressalta-se que, no intervalo entre

a abertura das fissuras e o descolamento do laminado, há uma variação na rigidez em cada ponto de monitoramento, sendo esse comportamento ocasionado pelo descolamento parcial em regiões isoladas ao longo do comprimento do laminado. Com isso, no intervalo entre o descolamento e a carga máxima, o laminado volta a apresentar um comportamento de deformação linear, uma vez que está sendo fixado pelas ancoragens, perdendo essa linearidade ao atingir a carga máxima.

Ao alcançar a carga máxima, as deformações nos laminados divergem quando comparadas entre os métodos de ancoragem estudados. Para a ancoragem HB-PRFC, ainda há leituras de deformação, uma vez que, ao atingir a carga máxima, o laminado escorrega da ancoragem. Já para a ancoragem FT-PRFC, o comportamento predominante é o descolamento da ancoragem juntamente com o reforço, não obtendo leituras a partir desse ponto.

Em relação à comparação das deformações no laminado de PRFC entre os métodos de ancoragem utilizados, foram utilizados os extensômetros EF2, posicionados na interface consolo-pilar. Na Figura 4.8, são mostrados os gráficos que comparam as deformações no laminado obtidas com as ancoragens HB-PRFC e FT-PRFC.

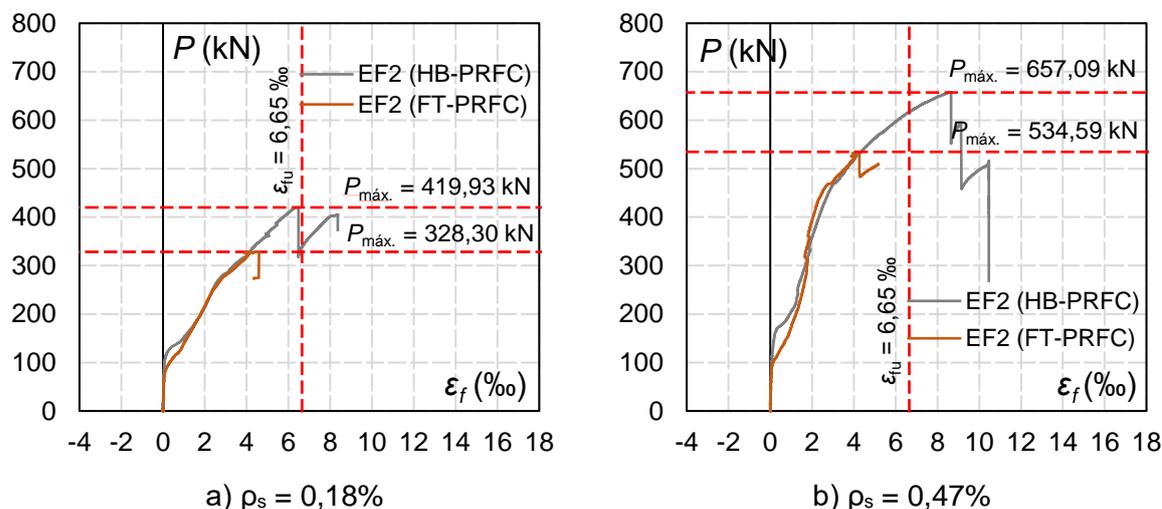


Figura 4.8 - Deformações no laminado de PRFC nas regiões próximas a ancoragem.

Nota-se que o comportamento de deformação é semelhante para os consolos reforçados com ρ_s igual a 0,18% e 0,47%. Com isso, os consolos reforçados com a ancoragem HB desenvolvem deformações no laminado até a deformação última obtida nos ensaios dos corpos de prova. Por outro lado, os consolos reforçados com a ancoragem FT-PRFC desenvolvem deformações inferiores à deformação última, o que evidencia uma maior efetividade da ancoragem HB-PRFC.

4.5. Escorregamento do laminado de PRFC

Na Figura 4.9, são mostrados os gráficos que ilustram o escorregamento do laminado de PRFC em função da carga e da posição dos pontos de monitoramento dos consolos com ρ_s igual 0,18%, respectivamente. No primeiro gráfico, os eixos x e y correspondem, respectivamente, ao escorregamento do laminado (S_f) e a carga aplicada nos consolos (P). No segundo gráfico, os eixos x e y correspondem, respectivamente, a posição de aplicação do potenciômetro (l) e o escorregamento do laminado (S_f).

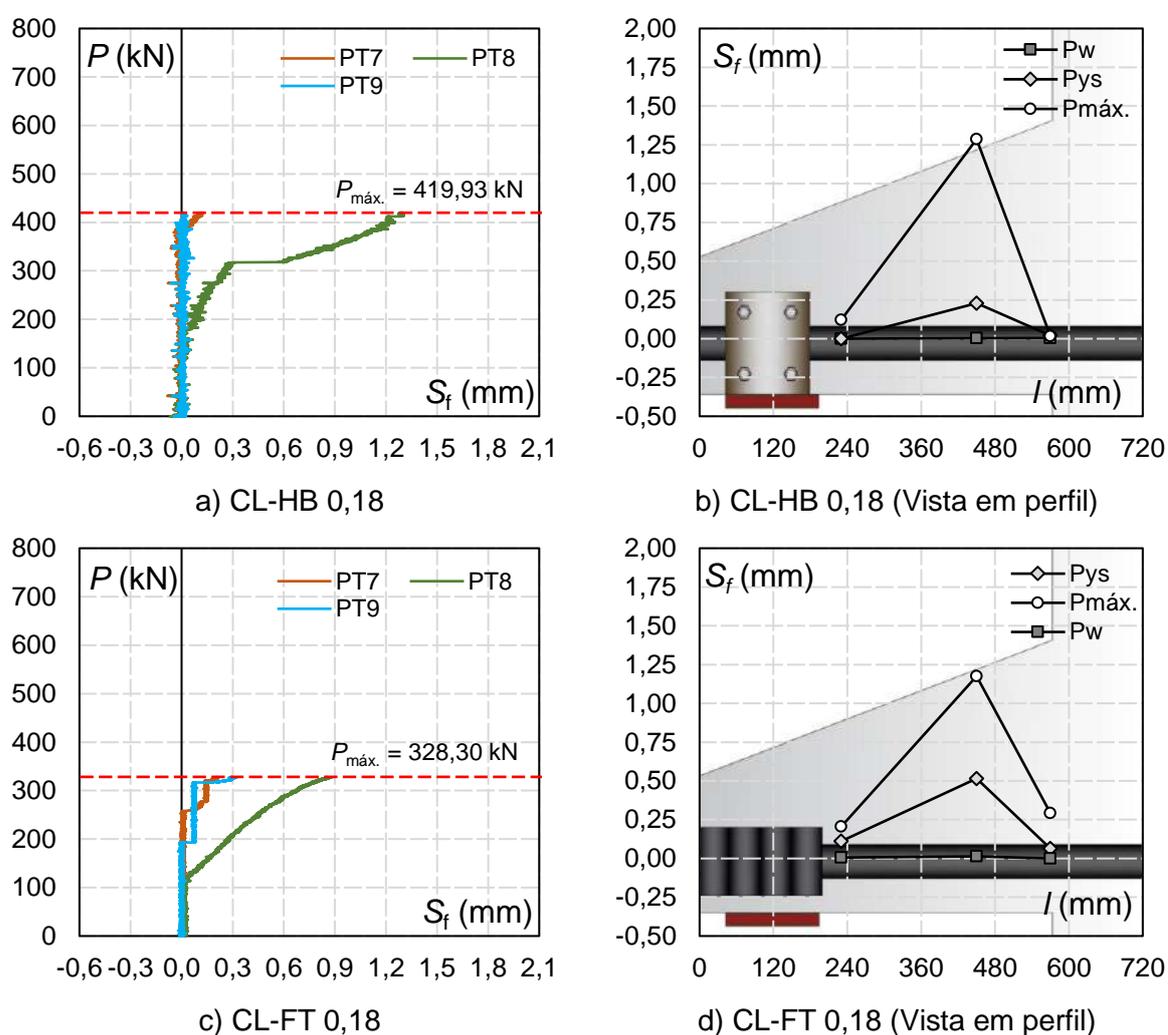


Figura 4.9 - Escorregamento do laminado dos consolos com ρ_s igual a 0,18%.

Ressalta-se que a ordem dos potenciômetros segue o programa experimental, sendo o primeiro o PT7, o segundo o PT8 e o terceiro o PT9, ordenados da direita para a esquerda, conforme ilustrado na figura. Além disso, o PT10 não foi incluso no gráfico com vista em perfil, uma vez que as medidas obtidas são similares ao PT7.

Como foi visto anteriormente, o laminado inicia o descolamento a partir da carga de abertura de fissura para ambas as ancoragens e ambas taxas de armadura principal. Observando o gráfico de vista em perfil, é possível concluir que isso realmente ocorre, sendo possível identificar leves valores de escorregamento do laminado, sendo esse comportamento percebido em todos os consolos reforçados. Além disso, comparando os métodos de ancoragem analisados e com base no PT7, uma vez que ele esteja mais próximo da ancoragem, conseqüentemente não sofrendo o efeito da abertura de fissuras como o PT8 e PT9, a ancoragem HB-PRFC conteve com mais efetividade o laminado nos estágios de carga de fissuração e de escoamento.

A Figura 4.10 mostra os gráficos de escorregamento dos espécimes com ρ_s igual 0,47%. Os gráficos demonstram o comportamento em duas perspectivas, conforme visto nos gráficos anteriores.

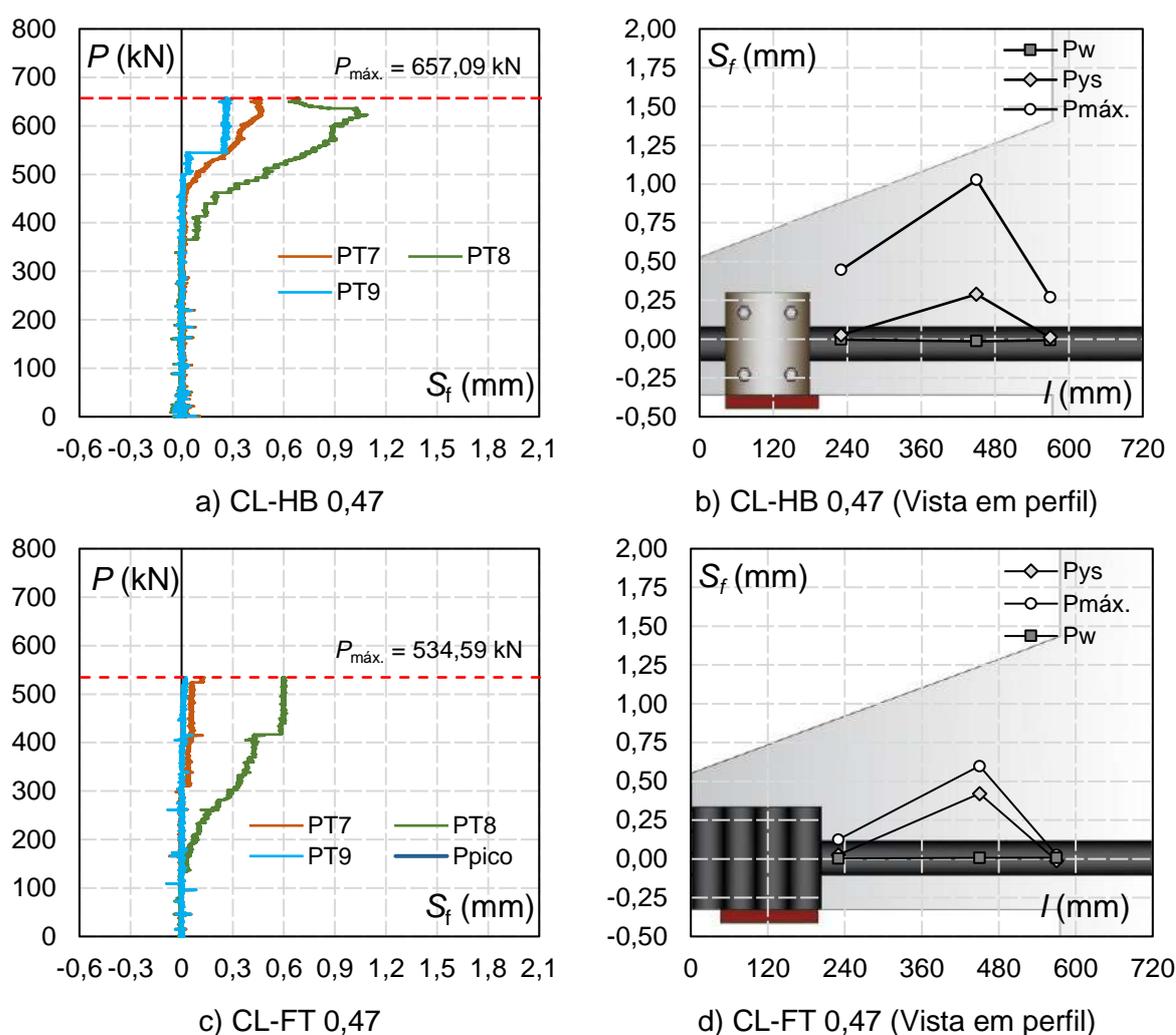


Figura 4.10 - Escorregamento do laminado dos consolos com ρ_s igual a 0,47%.

Para essa outra série de ensaios é perceptível, como visto também nos resultados dos consolos com ρ_s igual a 0,18%, que no estágio de carga de abertura de fissura o laminado descola ou escorrega, sendo tal comportamento visto em ambas as ancoragens. Além disso, comparando os métodos de ancoragem analisados e com base no PT7 percebe-se um comportamento parecido nas cargas de abertura de fissura e carga de escoamento do aço, apresentando valores distintos na carga máxima.

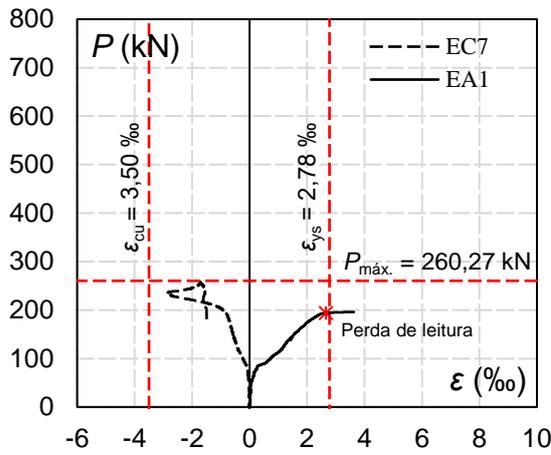
Comparando o comportamento ao escorregamento dos consolos com ρ_s igual a 0,18% com os consolos com ρ_s igual a 0,47%, percebe-se que os elementos com menor taxa de armadura principal apresentam maior escorregamento. Isso ocorre porque o laminado é mais solicitado em elementos subarmados, tornando o escorregamento mais evidente nesses casos

4.6. Deformação dos materiais e monitoramento de fissuras

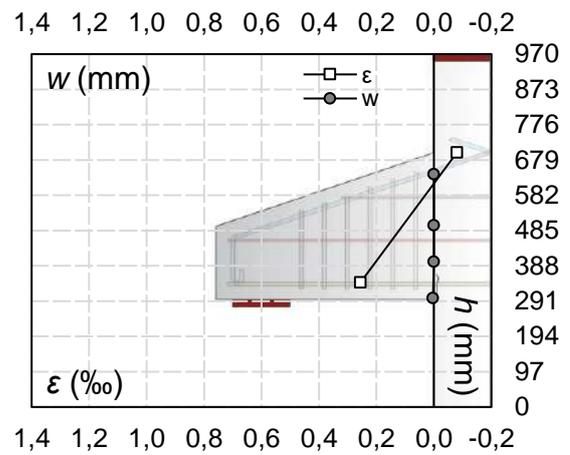
São mostrados nas Figuras 4.11 a 4.18 os estados de deformação do concreto, da armadura construtiva, das armaduras de costura, da armadura principal e do laminado em todos os consolos ensaiados. Nos gráficos de carga versus deformação, os eixos x e y correspondem, respectivamente, à deformação dos aços, do concreto e dos laminados monitorados na região da interface consolo-pilar (ϵ), e à carga aplicada nos consolos (P). As linhas vermelhas tracejadas na vertical representam as deformações-limite para o concreto (ABNT NBR 6118, 2023) e para o aço da armadura principal.

Ressalta-se que são apresentados gráficos com vista em perfil que demonstram o comportamento à deformação dos materiais, alinhados à abertura das fissuras no mesmo estágio de carga. Os eixos x e y correspondem, respectivamente, à deformação de todos os materiais citados anteriormente (ϵ), à abertura de fissuras (w) e o posicionamento dos instrumentos de medição ao longo da altura do consolo (h). Os estágios de carga analisados compreendem P_w , P_{ys} e $P_{m\acute{a}x.}$.

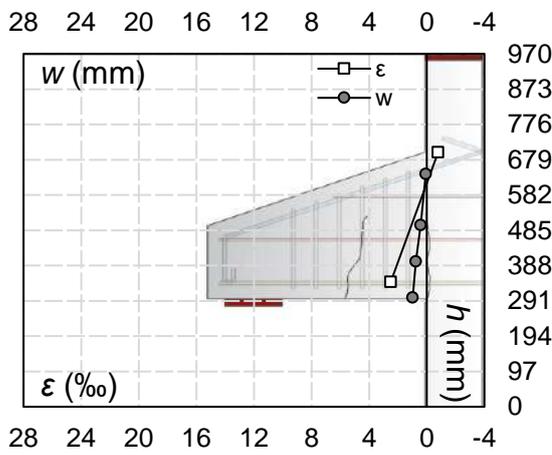
Em relação à nomenclatura utilizada para identificar cada ponto de monitoramento, foram adotadas as mesmas denominações do programa experimental, sendo EA1 o extensômetro da armadura principal, EA2 e EA3 a armadura de costura, EA4 a armadura construtiva, EC7 o concreto e EF2 o laminado. Por fim, foram feitas marcações em vermelho nos gráficos que possuíam comportamentos irregulares, sendo visto em quase todos os pontos de monitoramento da armadura principal.



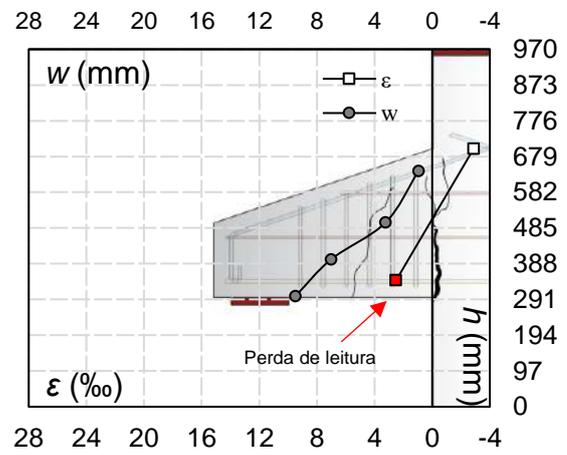
a) Gráfico carga x deformação



b) P_w

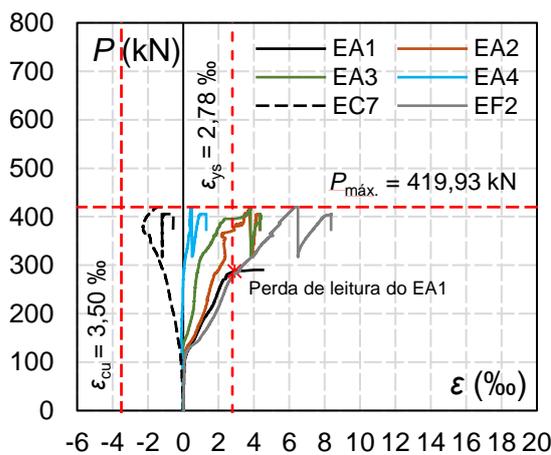


c) P_{ys}

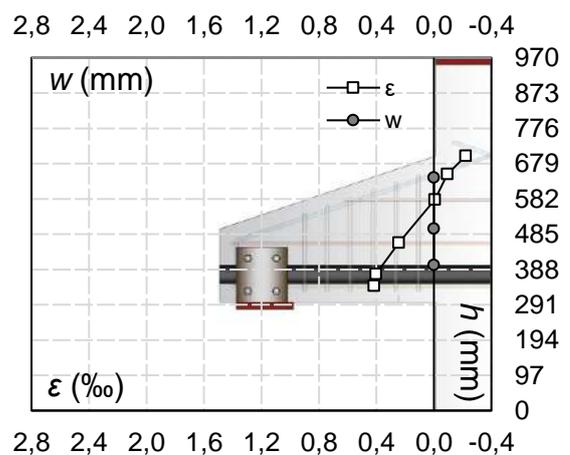


d) $P_{m\acute{a}x}$.

Figura 4.11 - Monitoramento do consolo de referência CR 0,18.



a) Gráfico carga x deformação



b) P_w

Figura 4.12 - Monitoramento do consolo reforçado CL-HB 0,18 (Parte 1).

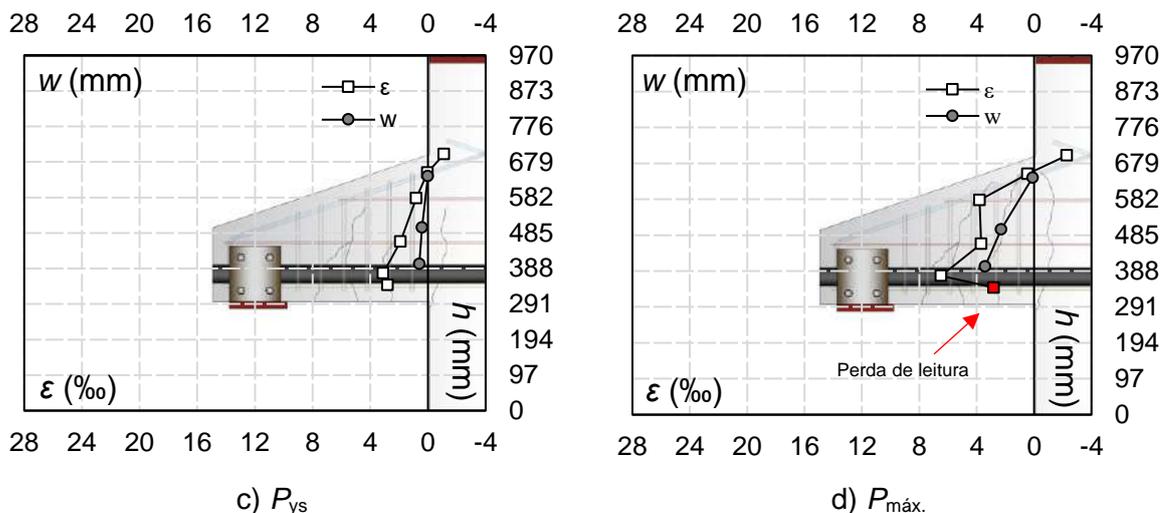


Figura 4.13 - Monitoramento do consolo reforçado CL-HB 0,18 (Parte 2).

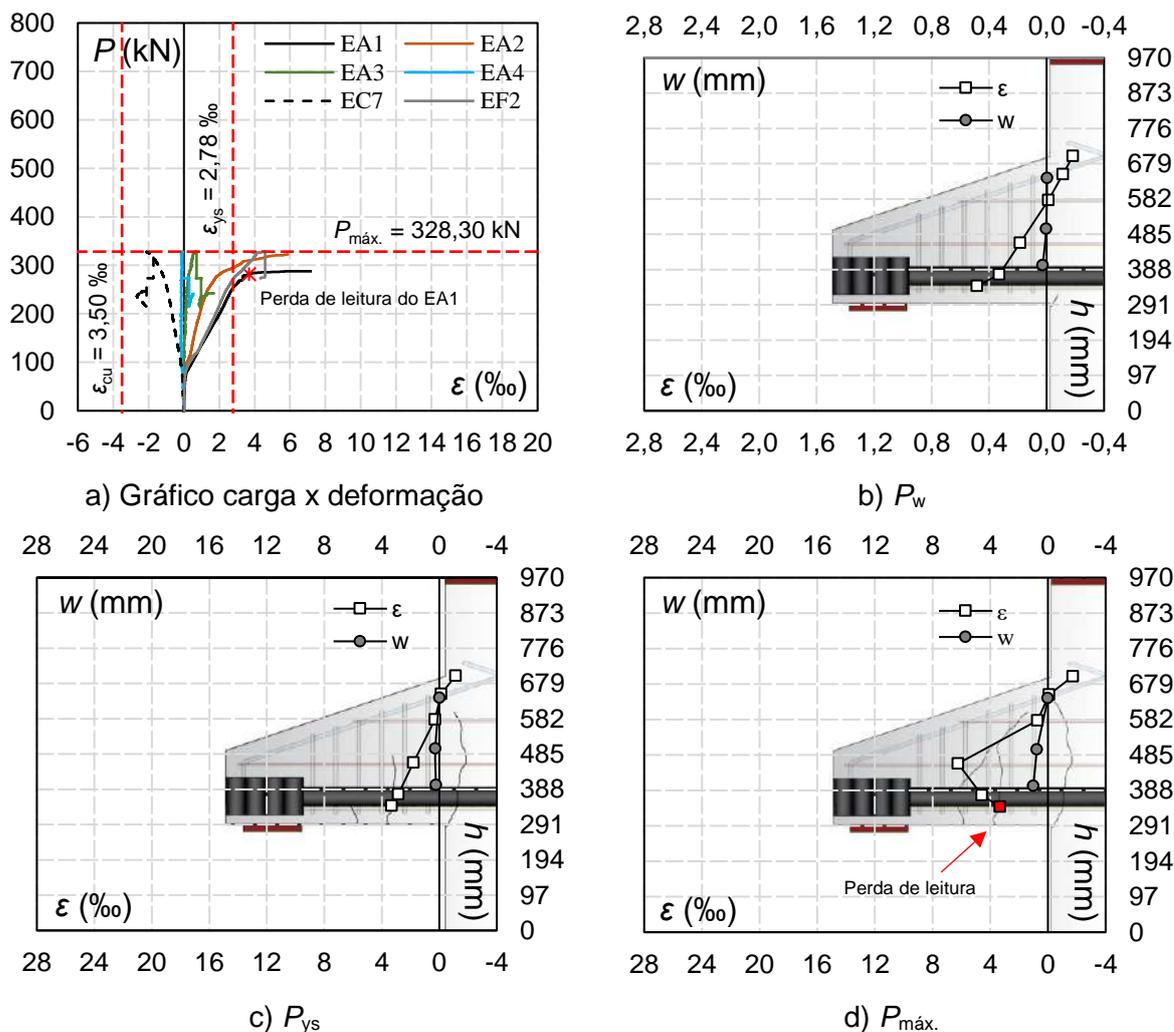
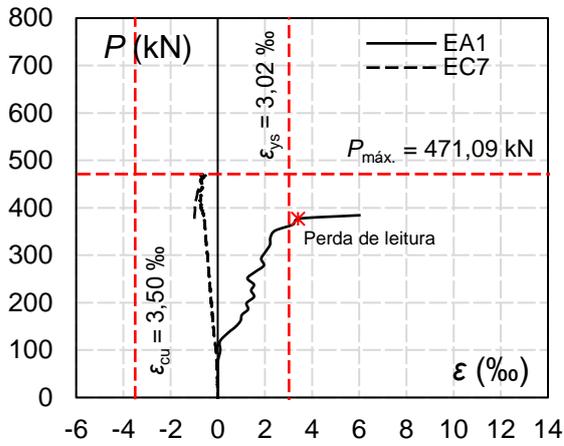
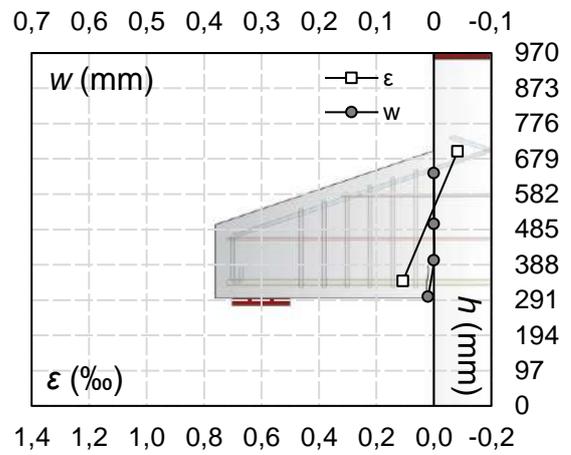


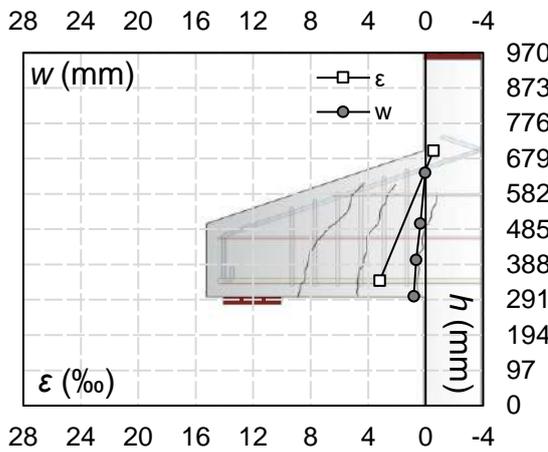
Figura 4.14 - Monitoramento do consolo reforçado CL-FT 0,18.



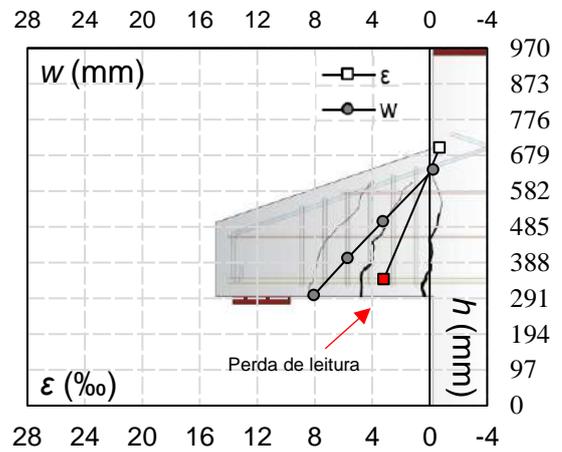
a) Gráfico carga x deformação



b) P_w

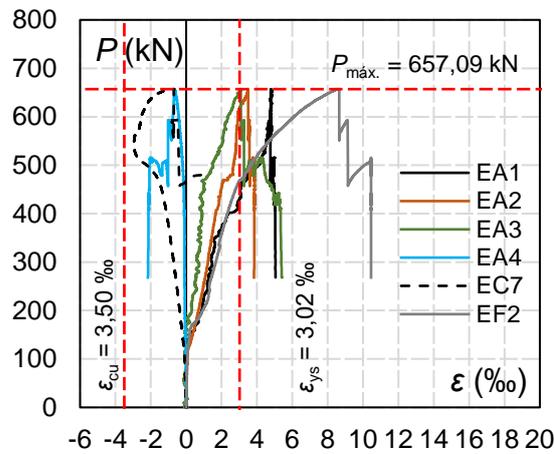


c) P_{ys}

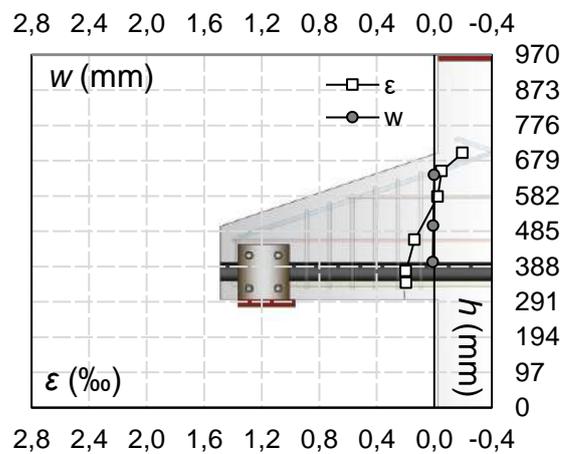


d) $P_{m\acute{a}x.}$

Figura 4.15 - Monitoramento do consolo de referência CR 0,47.



a) Gráfico carga x deformação



b) P_w

Figura 4.16 - Monitoramento do consolo reforçado CL-HB 0,47 (Parte 1).

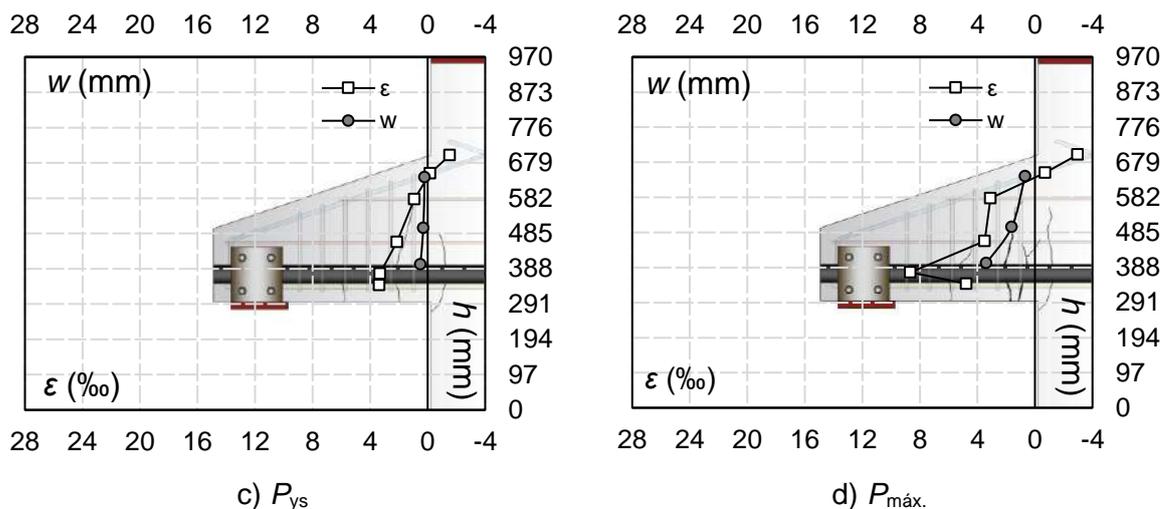


Figura 4.17 - Monitoramento do consolo reforçado CL-HB 0,47 (Parte 2).

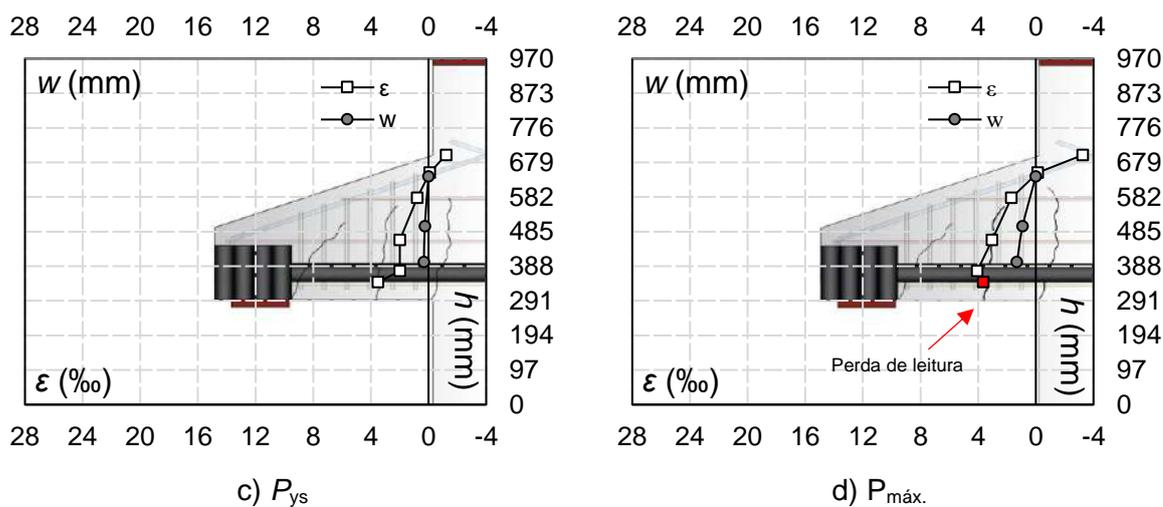
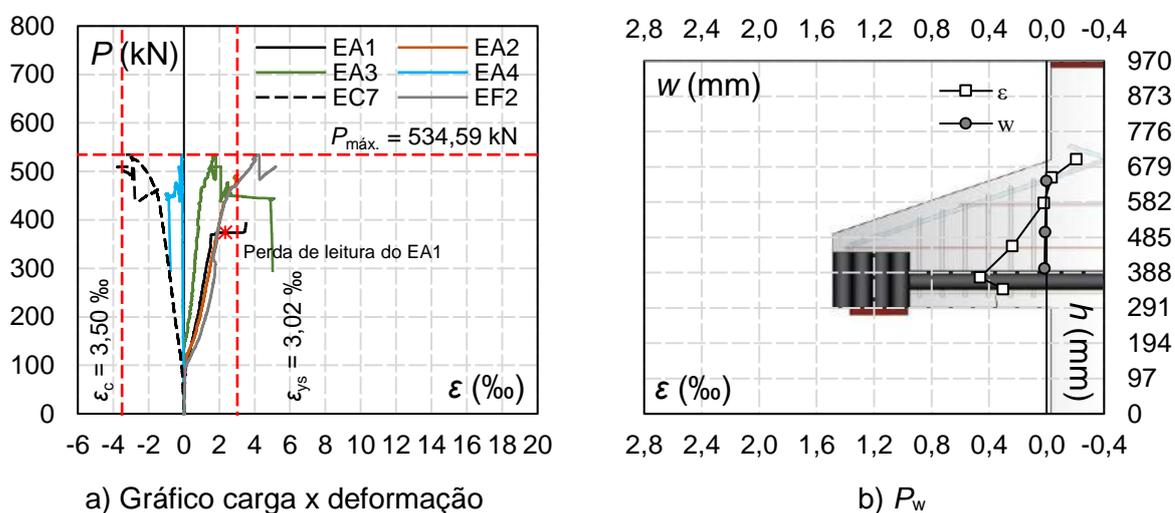


Figura 4.18 - Monitoramento do consolo reforçado CL-FT' 0,47.

Primeiramente, percebe-se que a rigidez proporcionada pelo laminado aos consolos resulta em um incremento na carga de aparecimento das fissuras iniciais. Ressalta-se ainda que o reforço proporciona mais sinais antes da ruptura, sendo observado em

todos os consolos reforçados o aparecimento de uma terceira linha de fissuras no início da fase de escoamento do aço. Além disso, observa-se que, ao longo dos passos de carga analisados, o laminado contribui para a contenção do alargamento das fissuras, sendo esse efeito mais evidente na proximidade da carga máxima.

Ao comparar as deformações ocorridas na armadura principal e no laminado de PRFC, observa-se que, em ambas as ancoragens, os dois materiais apresentam rigidez semelhante até a aproximação da carga de escoamento da armadura principal, momento em que essa similaridade se perde. Além disso, observa-se uma distribuição de deformações que varia linearmente ao longo da altura da seção transversal do consolo, evidenciando a existência de uma linha neutra, conforme as hipóteses da Teoria de Bernoulli-Euler. Vale ressaltar que, na carga máxima, o laminado foge dessa variação linear, principalmente nos consolos com o método HB-PRFC. Isso ocorre porque o laminado passa a trabalhar sem a interação com o concreto, sendo mantido apenas pelas ancoragens.

4.7. Modos de ruptura

Com o intuito de mostrar a capacidade de deformação plástica após a carga máxima, todos os consolos foram ensaiados até a estricção do aço da armadura principal, obtendo-se, assim, altos valores de deformação do aço e o esmagamento do concreto. Visto que o monitoramento realizado e discutido anteriormente foi estudado até o estágio de carga máxima, é necessário que, para esta discussão, sejam apresentados os valores de deformação última, uma vez que os modos de ruptura que serão mostrados nesta etapa referem-se a consolos solicitados com cargas depois do pico. Na Tabela 4.2, são apresentados os valores de deformação e carga correspondentes à carga de pico e à carga última.

Tabela 4.2 - Valores máximos e últimos de deformação e carga.

Consolo	$\epsilon_{c,máx.}$	$\epsilon_{c,u.}$	$\epsilon_{s,máx.}$	$\epsilon_{s,u.}$	$\epsilon_{f,máx.}$	$\epsilon_{f,u.}$	$P_{máx.}$	P_u
	‰	‰	‰	‰	‰	‰	kN	kN
CR 0,18	2,87	2,87*	7,50	7,50*	-	-	260,27	181,70
CR 0,47	0,69	0,98	11,28	11,37	-	-	471,09	379,50
CL-HB 0,18	2,28	2,28*	6,97	6,97*	6,48	8,36	419,93	373,38
CL-HB 0,47	2,97	2,97*	4,77	5,04	8,66	10,46	657,09	281,26
CL-FT 0,18	2,00	2,55	10,22	10,22*	4,59	4,59*	328,30	241,08
CL-FT 0,47	3,25	3,66	3,62	4,01	4,07	5,16	534,59	438,06

*Perda de leitura dos extensômetros de medição.

No Quadro 4.1, são apresentadas as etapas de ruptura tanto dos consolos de referência quanto dos consolos reforçados. Nele, a ruptura é detalhada com base nas observações dos resultados e dos ensaios. A análise foi realizada considerando a rigidez dos espécimes nos estágios de carga pré-pico e pós-pico.

Quadro 4.1 - Modo de ruptura dos consolos ensaiados

Consolo	Etapas de ruptura					Modo de ruptura
	Pré-pico de carga		Pós-pico de carga			
	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 4	Etapa 5	
CR 0,18	Escoamento da armadura principal	-	Esmagamento do concreto	-	-	Flexão
CR 0,47						
CL-HB 0,18		Descolamento do laminado	Ruptura do laminado	Esmagamento do concreto	-	
CL-HB 0,47					-	
CL-FT 0,18			Descolamento da ancoragem	-		
CL-FT' 0,47			Ruptura do laminado	Descolamento da ancoragem	Esmagamento do concreto	

As Figuras 4.19 a 4.24 apresentam os modos de ruptura pós-pico de carga para cada consolo analisado. Observa-se que o descolamento do reforço e o esmagamento do concreto foram os mecanismos predominantes. Além disso, todos os reforços utilizados se desprenderam juntamente com uma fina camada do cobrimento das armaduras, o que caracteriza uma aplicação eficiente da resina epóxi.

Nos consolos reforçados com o método de ancoragem HB-PRFC, observa-se a predominância da ruptura do laminado de reforço e seu escorregamento. Para os consolos com ρ_s igual a 0,18%, foi identificado, em uma das ancoragens, o escorregamento do laminado com sua superfície descolada do concreto. Nas proximidades de outra ancoragem, verificou-se a ruptura transversal do laminado. Já nos consolos com ρ_s igual a 0,47% em ambos os lados, observou-se a ruptura longitudinal do reforço, além do escorregamento do laminado e uma ruptura transversal parcial próxima a uma das ancoragens.

Em relação aos consolos reforçados com o método de ancoragem FT-PRFC, observa-se a predominância do descolamento das ancoragens. Nos consolos com ρ_s igual a 0,18%, não foram identificados indícios visuais de escorregamento do laminado, tampouco sinais de ruptura nas regiões próximas às ancoragens. Por outro lado, nos consolos com ρ_s igual a 0,47%, foi observada, em uma região próxima à ancoragem, a iniciação de uma ruptura transversal do laminado de reforço, sendo essa a única característica distinta em comparação ao consolo com menor taxa de armadura.



a) Vista frontal - Face A



b) Vista frontal - Face B



c) Esmagamento do concreto



d) Estricção do aço

Figura 4.19 - Consolo de referência CR 0,18.

a) Vista frontal - Face A



b) Vista frontal - Face B



c) Esmagamento do concreto



d) Estricção do aço

Figura 4.20 - Consolo de referência CR 0,47.



a) Vista frontal - Face A



b) Vista frontal - Face B



c) Esmagamento do concreto



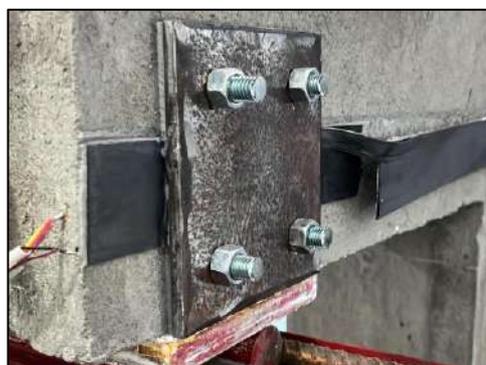
d) alta deformação do aço



e) Sem alteração



f) Escorregamento do laminado



g) Ruptura transversal do laminado



h) Escorregamento do laminado

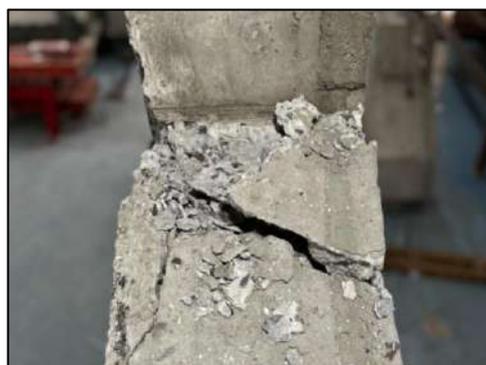
Figura 4.21 - Consolo reforçado CL-HB 0,18.



a) Vista frontal - Face A



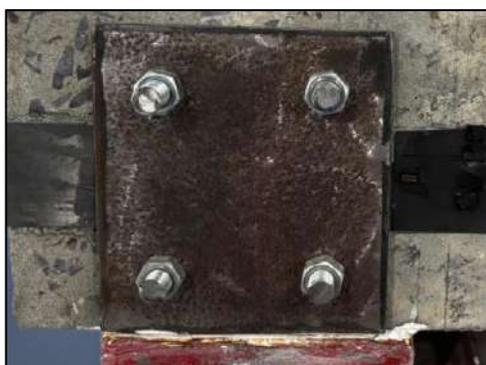
b) Vista frontal - Face B



c) Esmagamento do concreto



d) Ruptura longitudinal do laminado



e) Sem alteração



f) Escorregamento do laminado



g) Escorregamento do laminado



h) Ruptura transversal parcial do laminado

Figura 4.22 - Consolo reforçado CL-HB 0,47.



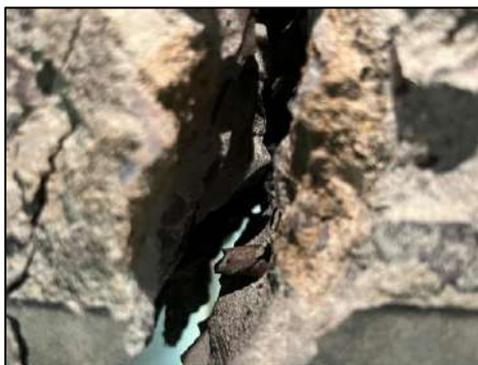
a) Vista frontal - Face A



b) Vista frontal - Face B



c) Esmagamento do concreto



d) Estricção do aço



e) Sem alteração



f) Descolamento da ancoragem



g) Descolamento da ancoragem



h) Sem alteração

Figura 4.23 - Consolo reforçado CL-FT 0,18.



a) Vista frontal - Face A



b) Vista frontal - Face B



c) Esmagamento do concreto



d) Rachadura de flexão



e) Descolamento da ancoragem



f) Sem alteração



g) Ruptura transversal do laminado



h) Descolamento da ancoragem

Figura 4.24 - Consolo reforçado CL-FT' 0,47.

5. AVALIAÇÃO DAS RECOMENDAÇÕES NORMATIVAS

5.1. Previsão de resistência dos consolos reforçados

Considerando a premissa de que consolos longos podem ser dimensionados como vigas em balanço, conforme a ABNT NBR 6118 (2023), este subcapítulo tem como objetivo investigar as previsões de resistência de consolos reforçados com laminados de PRFC por meio de dois modelos de cálculo, a teoria da flexão conforme o ACI 440.2R (2017) e o MBT. Para a aplicação do MBT, foram seguidas as recomendações da ACI 318 M (2019). Na Figura 5.1 é mostrado como foram idealizados os consolos para a elaboração dos modelos de cálculo.

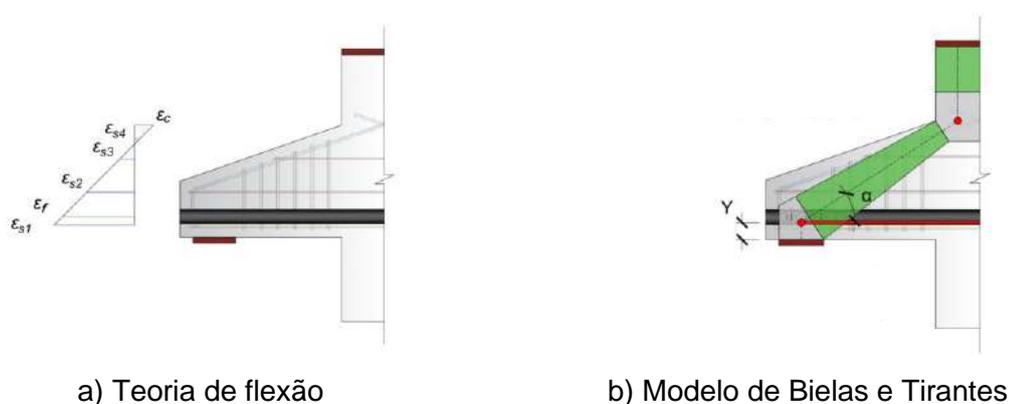


Figura 5.1 - Modelos de cálculo utilizados na previsão de resistência.

Para o MBT foram feitas adaptações que permitiram a consideração da contribuição do laminado à resistência do consolo de concreto armado. As equações 5.1 e 5.2 são necessárias para determinar a área de aço equivalente ($A_{s,eq}$) e o posicionamento do tirante do consolo reforçado (Y), respectivamente.

$$A_{s,eq} = \frac{E_f}{E_s} A_f \quad (5.1)$$

$$Y = \frac{A_{sf} f_y Y_{aço} + A_f f_{fe} Y_{fibra}}{A_{sf} f_y + A_f f_{fe}} \quad (5.2)$$

Ressalta-se que, para o dimensionamento de consolos reforçados e ancorados, é necessário realizar verificações para evitar possíveis rupturas nas regiões de ancoragem, as quais podem inviabilizar a utilização eficiente do reforço. Para o método de ancoragem HB, recomenda-se considerar a condição mais crítica entre as verificações *pryout*, escorregamento do laminado, ruptura dos parafusos e chapas.

Para a ancoragem FT, considera-se a condição mais crítica sendo o descolamento da ancoragem. Considera-se conservador utilizar valores de descolamento do laminado, uma vez que o emprego da ancoragem proporciona ao consolo reforçado maiores valores de deformação do reforço.

A efetividade do reforço é garantida a partir da sua ruptura. Dessa forma, considera-se como cortante crítica o valor correspondente à cortante na ruptura do laminado. Para que essa condição seja alcançada, é necessário o dimensionamento dos possíveis modos de ruptura localizados nas regiões de ancoragem. As verificações correspondentes são apresentadas nas Equações 5.3, 5.4 e 5.5.

$$V_{crit.} = V_{fu} \quad (5.3)$$

$$V_{fu} \leq \begin{cases} V_{cpg} \\ V_{esc.} \\ V_{sa} \\ V_{chap.} \end{cases}, \text{ para ancoragem HB} \quad (5.4)$$

$$V_{fu} \leq V_{da}, \text{ para ancoragem FT} \quad (5.5)$$

Onde:

$V_{crit.}$ é a cortante crítica;

V_{fu} é a cortante de ruptura do laminado;

V_{cpg} é a cortante de ruptura por *pryout*;

$V_{esc.}$ é a cortante de ruptura por escorregamento do laminado;

V_{sa} é a cortante de ruptura dos parafusos;

$V_{chap.}$ é a cortante de ruptura da chapa de aço;

V_{da} é a cortante de descolamento da ancoragem.

A Figura 5.2 mostra os valores de tração (F) que solicitam as ancoragens propostas, sendo esse valor limitado pela carga de tração última do laminado (F_{Tu}), o que demonstra a efetividade do reforço. Em relação à ruptura por *pryout*, observa-se um comportamento conservador para a ancoragem, sendo esse modo de falha desprezado, uma vez que o *pryout* só ocorrerá quando o laminado estiver descolado do substrato de concreto do consolo. Quanto ao escorregamento do laminado, o valor considerado também é conservador, pois os cálculos não levam em conta a contribuição por fricção proporcionada pelo aperto dos parafusos.

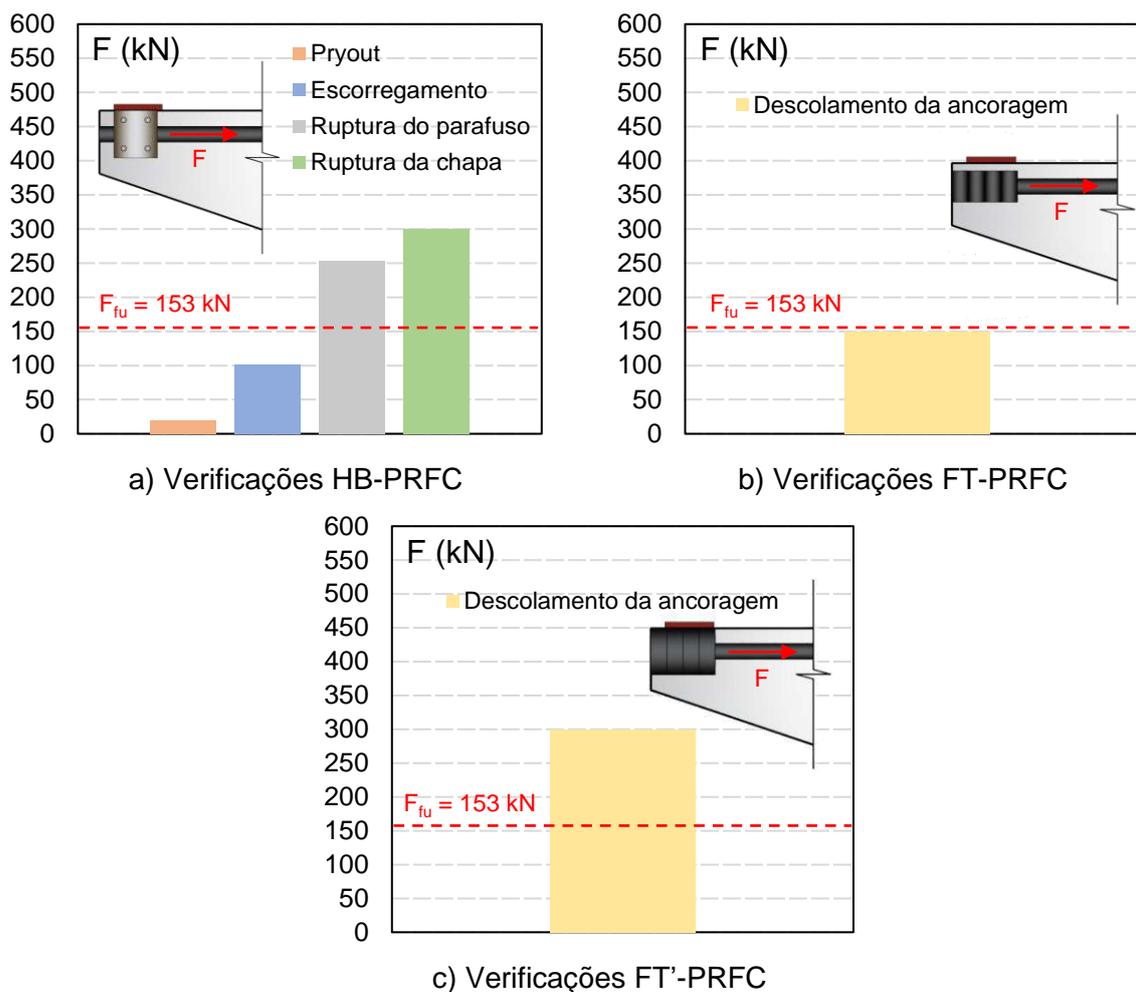


Figura 5.2 - Verificações para a ancoragem do reforço.

As Tabelas 5.1 e 5.2 apresentam os resultados de cortante e os modos de ruptura previstos, utilizando, respectivamente, a teoria da flexão e o Modelo da Biela e Tirante (MBT). Ressalta-se que os valores de cortante para os elementos reforçados foram adotados com base no critério de cortante mínima e máxima, sendo a mínima correspondente à cortante de descolamento do laminado, e a máxima, à cortante de ruptura do laminado.

Tabela 5.1 - Avaliação dos modelos de cálculo por teoria da flexão.

Consolo	Critério de ruptura		Critério de ancoragem	$V_{máx,TF}$	$V_{máx,exp.}$	Modo de ruptura
	V_{fd}	V_{fu}	$V_{crit.} < V_{fu}$			
	kN	kN	kN	kN	kN	
CR 0,18	-	-	-	73,15	130,13	Flexão
CR 0,47	-	-	-	170,07	235,54	Flexão
CL-HB 0,18	132,67	242,46	188,99	188,99	209,96	Flexão
CL-HB 0,47	225,71	294,89*	279,83	279,83	328,54	(com esc. do laminado)
CL-FT 0,18	132,67	242,46	-	242,46	164,15	Flexão
CL-FT' 0,47	225,71	294,89*	-	294,89	267,29	(com ruptura do laminado)

*Carga de aplicação máxima desenvolvida pelo reforço considerando o equilíbrio de forças.

Tabela 5.2 - Avaliação dos modelos de cálculo por MBT.

Consolo	Critério de ruptura		Critério de ancoragem	$V_{m\acute{a}x,MBT}$	$V_{m\acute{a}x,exp.}$	Modo de ruptura
	V_{fd}	V_{fu}	$V_{crit.} < V_{fu}$			
	kN	kN	kN			
CR 0,18	-	-	-	63,23	130,13	Flexão
CR 0,47	-	-	-	150,01	235,54	
CL-HB 0,18	115,27	214,39	163,36	163,36	209,96	Flexão
CL-HB 0,47	210,82	321,08	264,41	264,41	328,54	(com esc. do laminado)
CL-FT 0,18	115,27	214,39	-	214,39	164,15	Flexão
CL-FT' 0,47	210,82	321,08	-	321,08	267,29	(com ruptura do laminado)

Para o dimensionamento dos consolos reforçados e ancorados, foram utilizadas as propriedades mecânicas dos materiais obtidas por meio de normas, ensaios e informações dos fabricantes. Em relação ao concreto e ao aço, foram utilizados os valores obtidos em ensaio. Para as chapas de aço, os laminados de PRFC e os parafusos, adotaram-se os valores fornecidos pelas normas, sendo os valores do reforço indicados pelo fabricante.

Em relação ao critério de ancoragem, percebe-se que os consolos com a ancoragem HB-PRFC podem romper devido ao escorregamento do laminado. Entretanto, isso não se configura um erro de dimensionamento, uma vez que os cálculos não consideram a contribuição a fricção do aperto dos parafusos, sendo o valor considerado conservador. Com isso, foi esperado possíveis rupturas do laminado em todos os consolos reforçados, sendo garantido um torque adequado no aperto de todos os conectores da ancoragem, tendo cuidado para que não houvessem apertos excessivos.

Observa-se que, dentre os métodos de cálculo analisados, o Modelo de Bielas e Tirantes (MBT) tende a ser mais conservador. Uma possível explicação seria o modelo adotado, pois a abordagem baseada na teoria da flexão considera a contribuição das armaduras de costura na resistência à flexão do consolo. Em contrapartida, o MBT estabelece apenas um tirante na região das armaduras principais. Ressalta-se que os modos de ruptura estabelecidos por cálculo são os mesmos, considerando a ruptura por flexão nos modelos com e sem reforço.

A Figura 5.3 mostra a relação entre os valores de cortante obtidos experimentalmente e aqueles estimados pelas prescrições normativas do ACI 318 M (2019) e ACI 440.2R (2017). A proximidade dos pontos em relação à linha de referência $\lambda = 1$, permite avaliar a precisão de cada modelo na estimativa da resistência, demonstrando as tendências de sub ou superestimativa associada a cada modelo.

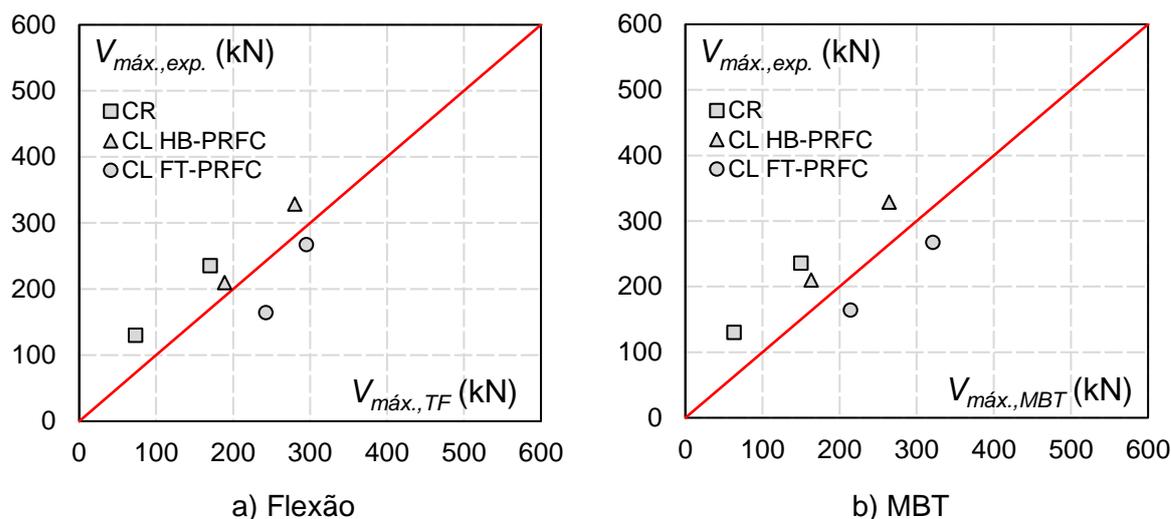


Figura 5.3 - Avaliação dos resultados normativos.

De modo geral, observa-se que os modelos normativos para consolos reforçados com a ancoragem FT-PRFC tendem a superestimar a resistência obtida experimentalmente, independentemente da taxa de armadura principal. Por outro lado, os cálculos baseados na teoria da flexão e MBT, se ajustam bem, sendo necessário a utilização de fatores de cálculo para que ambas as ancoragens se adequem na previsão de resistências de forma correta. Ressaltasse que dentre os modelos testados o por teoria de flexão é o mais eficiente, com uma distribuição mais próxima da linha de referência.

5.2. Deformação conforme o modelo por teoria de flexão

Utilizando as propriedades mecânicas obtidas a partir dos ensaios dos laminados, foi realizada a previsão de resistência, com o objetivo de determinar os valores de deformação do concreto, do aço e do laminado, utilizando o modelo baseado na teoria da flexão. Com isso, será possível desenvolver um gráfico capaz de comparar os valores de deformação experimental e normativo, utilizando todos os dados obtidos por meio dos ensaios, os quais estão descritos no capítulo do programa experimental. A Figura 5.4 mostra os valores de deformações obtidos nos ensaios em comparação com os valores calculados. No gráfico, os eixos x e y correspondem, respectivamente, à deformação dos materiais (ϵ) e à altura do conjunto consolo-pilar (h). A linha tracejada representa as leituras experimentais de deformação, enquanto a linha contínua indica os valores estimados pelos cálculos.

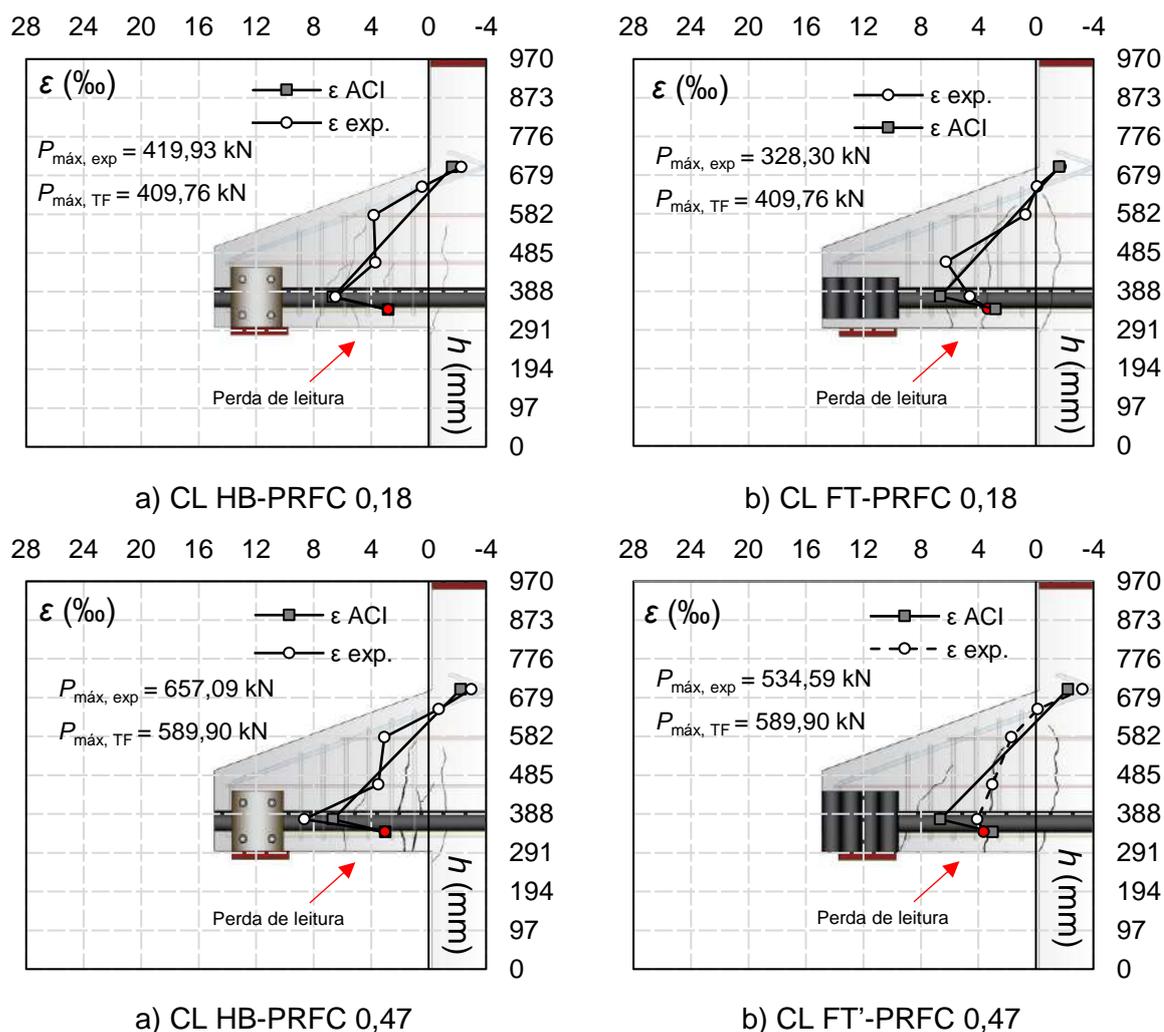


Figura 5.4 - Deformações dos materiais do consolo conforme a ACI 440.2R (2017).

Observa-se que o modelo descreve com eficiência o comportamento do método de ancoragem HB-PRFC, apresentando valores de deformação do concreto que não ultrapassam os obtidos nos ensaios e que se mostram bastante próximos dos resultados experimentais. Além disso, observa-se que, para os consolos reforçados com o método de ancoragem HB-PRFC, a fibra apresenta deformações superiores às obtidas nos ensaios localizados. Em contrapartida, o método FT-PRFC não alcança esse mesmo nível de desempenho, apresentando valores de deformação inferiores aos observados experimentalmente.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo, são apresentadas as conclusões dos resultados obtidos no programa experimental, que envolveu seis consolos, com o objetivo de avaliar o comportamento estrutural em função da variação da taxa de armadura principal e do tipo de ancoragem de fixação lateral dos laminados de PRFC. O comportamento e a resistência desses consolos foram avaliados com base nas metodologias de cálculo pela teoria da flexão e pelo modelo de bielas e tirantes.

As principais conclusões dos resultados e análises são:

- Os consolos ancorados pelo método HB, em comparação com o método FT, apresentaram maiores incrementos de resistência, maior capacidade de deformação plástica, melhor controle da abertura de fissuras, aproveitamento mais eficaz da capacidade resistente do concreto, descolamento do laminado em níveis de deformação superiores a 4 ‰ e maiores deformações do laminado até a carga máxima resistente dos consolos.
- Em relação as taxas de armadura principal do consolo, identificaram-se perdas no incremento de resistência da ordem de 22% e 13%, respectivamente para as ancoragens HB e FT, em decorrência do aumento da taxa em três vezes. As deformações no laminado de PRFC foram maiores nos consolos com maior taxa de armadura para a ancoragem HB, sendo perceptível mesmos valores de deformação do laminado para os consolos com a ancoragem FT.
- As estimativas normativas tendem a superestimar os valores de resistência para os modelos com ancoragem FT-PRFC. No entanto, para os consolos com ancoragem HB-PRFC, tanto o Modelo de Bielas e Tirantes quanto o modelo baseado na teoria da flexão apresentaram boas previsões das cargas máximas, sendo este último o que forneceu valores mais próximos das resistências experimentais.
- Os modos de ruptura observados nos consolos reforçados com a ancoragem HB ocorreram na região de ancoragem, caracterizando-se pelo escorregamento do laminado e pela ruína do consolo por flexão. Nos consolos com ancoragem FT, o modo de ruptura foi dominado pelo descolamento da ancoragem, resultando também na ruína por flexão.

A fim de complementar os resultados e conclusões apresentados nesta pesquisa,

seria de interesse que fossem realizados trabalho capazes de:

- Variar a relação a/d de consolos classificados como longos e, com isso, ensaiá-los reforçados com laminados de PRFC, visando obter mais resultados na região de transição entre o comportamento típico de consolos e o de vigas;
- Desenvolver uma análise computacional por elementos finitos para os ensaios experimentais, com o objetivo de comparar e complementar os resultados desta pesquisa;
- Propor uma maior efetividade do laminado de reforço utilizando outros sistemas de ancoragem, visto que na literatura, a poucos trabalhos que abordam essa temática;
- Variar a taxa de reforço utilizada nos consolos longos, afim de determinar a quantidade mais eficiente.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBOOD, I. S. Strut-and-tie model and its applications in reinforced concrete deep beams: A comprehensive review. **Case Studies in Construction Materials**, v. 19, 2023.

ABDULQADER, S. S.; AL-SHATHR, B. S.; HASAN, A. K. Experimental behavior of self compacting concrete corbels strengthened with external CFRP. **Engineering and Technology Journal**, v. 36, 2018.

ABDULRAHMAN, M. B.; SALIH, S. A.; ABDULJABBAR, R. J. The assessment of using CFRP to enhance the behavior of high strength reinforced concrete corbels. **Tikrit Journal Of Engineering Sciences**, v. 28, 2021.

ABRA, O. **Développement d'une approche de conception des structures en béton armé basée sur la réduction de capacité résistive**. 2017. Thesis (Master) – École Polytechnique de Montréal, Université de Montréal, Montréal, 2017.

ABRANTES, J.; LÚCIO, V.; FERREIRA, M. **Investigação experimental sobre diferentes configurações de ancoragem com laminados de CFRP no reforço de elementos de betão armado**. In: ENCONTRO NACIONAL BETÃO ESTRUTURAL – BE2024, Porto. 2024.

ALABDULHADY, M. Y.; H. SNEED, L. H. Torsional strengthening of reinforced concrete beams with externally bonded composites: A state of the art review. **Construction and Building Materials**, v. 205, 2019.

AL-ATTA, B.; KALFAT, R.; AL-MAHAIDI, R. Hybrid and patch anchors for prevention of IC debonding in RC planks flexurally strengthened using FRP. **Structures**, v. 43, p. 1042-1056, set. 2022.

AL-KAMAKI, Y. S. S.; HASSAN, G. B.; ALSOFI, G. Experimental study of the behaviour of RC corbels strengthened with CFRP sheets. **Case Studies In Construction Materials**, v. 9, 2018.

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

AL-SAAD, N. T. K.; MOHAMMED, A.; AL-MAHAIDI, R.; SANJAYAN, J. A state-of-the-art review: near-surface mounted frp composites for reinforced concrete structures. **Construction And Building Materials**, v. 209, p. 748-769, jun. 2019.

ALWASH, D.; KALFAT, R.; AL-MAHAIDI, R.; DU, H. Shear strengthening of RC beams using NSM CFRP bonded using cement-based adhesive. **Construction And Building Materials**, v. 301, p. 124365, set. 2021.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 309**: Guide for Consolidation of Concrete. Farmington Hills: ACI, 2005.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318**: Building Code Requirements for Structural Concrete. Farmington Hills: ACI, 2019.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 440.2R**: Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. ACI ed. Farmington Hills: Committee 440, 2017.

ARAÚJO, D. L.; AZEVEDO, S. A.; OLIVEIRA, E. M.; SILVA, E. M. O.; OLIVEIRA JÚNIOR, L. A. Strength evaluation of concrete corbels cast in a different stage from the column. **IBRACON Structures and Materials Journal**, v. 10, n. 2, p. 509 – 527, abr. 2017.

ARDUINI, M. *et al.* Brittle Failure in FRP Plate and Sheet Bonded Beams. **ACI Structural Journal**, v. 94, n. 4, p. 363-370, jan. 1997.

ASSIH, J.; IVANOVA, I.; DONTCHEV, D.; LI, A. Concrete damaged analysis in strengthened corbel by external bonded carbon fibre fabrics. **Applied Adhesion Science**, v. 3, n. 1, p. 1-13, dez. 2015.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9062**: Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D3039/D3039M**: Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2021.

BANK, L. C.; ARORA, D. Analysis of RC beams strengthened with mechanically fastened FRP (MF-FRP) strips. **Composite Structures**, v. 79, n. 2, p. 180-191, jul. 2007.

BANK, L. Mechanically-fastened FRP (MF-FRP) – a viable alternative for strengthening RC members. **FRP Composites In Civil Engineering** - Cice 2004, [S.L.], p. 3-15, 15 dez. 2004.

BARAVESCO, D. **Análise e dimensionamento de blocos de fundação destinados ao apoio de pilares de geometria complexa**. 2016. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2016.

BEER, F. P.; JOHNSTON JR., E. R.; DEWOLF, J. T.; MAZUREK, D. F. **Mechanics of Materials**. 7. Ed. New York: McGraw Hill Education, 2015.

BROWN, M. D. **Design for shear in reinforced concrete using strut-and-tie and sectional models**. 2005. Tese (Doctorate of Philosophy) – Faculty of the Graduate School of The University of Texas, University of Texas, Austin, 2005.

BUYUKOZTURK, Oral; HEARING, Brian. Failure Behavior of Precracked Concrete Beams Retrofitted with FRP. **Journal Of Composites For Construction**, [S.L.], v. 2, n. 3, p. 138-144, ago. 1998.

CANHA, R. M. F.; KUCHMA, D. A.; DEBS, M. K. E.; de SOUZA, R. A. Numerical analysis of reinforced high strength concrete corbels. **Engineering Structures**, [S.L.], v. 74, p. 130-144, set. 2014.

CANHA, R. M. F.; KUCHMA, D. A.; DEBS, M. K. E.; de SOUZA, R. A. Numerical analysis of reinforced high strength concrete corbels. **Engineering Structures**, v. 74, p. 130 – 144, set. 2014.

CHASTRE, C. Materiais e tecnologias de reforço de estruturas de betão: potencialidade e limitações, **Congresso Latinoamericano Patología de la construcción, Tecnología de la rehabilitación y gestión del patrimonio**. Santander. 10p. 2014.

CHEN, C.; WANG, X.; SUI, L.; XING, F.; CHEN, X.; ZHOU, Y. Influence of FRP thickness and confining effect on flexural performance of HB-strengthened RC beams. **Composites Part B: Engineering**, v. 161, p. 55-67, mar. 2019.

CHEN, C.; WANG, X.; SUI, L.; XING, F.; CHEN, X.; ZHOU, Y. Influence of FRP thickness and confining effect on flexural performance of HB-strengthened RC beams. **Composites Part B: Engineering**, [S.L.], v. 161, p. 55-67, mar. 2019.

COLLINS, M. P.; MITCHELL, D. **Prestressed Concrete Structures**. New Jersey: Prentice Hall, 1991.

DALTON, S.; ATAMTURKTUR, S.; JUANG, H. Structural Health Monitoring for Sustainable and Resilient Infrastructure Management. **International Journal of Building**, v. 2, p. 55-68, jun. 2013.

DONG, K.; GAO, Y.; YANG, S.; YANG, Z.; JIANG, J. Experimental investigation and analytical prediction on bond behaviour of CFRP-to-concrete interface with FRP anchors. **Case Studies In Construction Materials**, v. 19, p. 1-18, dez. 2023.

EL-METWALLY, S. E. E.; CHEN, W. **Structural Concrete: Strut-and-Tie Models for Unified Design**. S/E. New York: Taylor & Francis Group, 2018.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules - Rules for buildings, bridges and civil engineering structures**. 2023.

FATTUHI, N. I.; HUGHES, B. P. Ductility of Reinforced Concrete Corbels Containing Either Steel Fibers or Stirrups. **Structural Journal**, v. 86, n. 6, p. 644 – 651, nov. 1989.

FEDERATION INTERNATIONALE DE BÉTON. **FIB BULLETIN 90**: Externally applied FRP reinforcement for concrete structures. Bulletin 90 ed. Kastl: Tg5.1, 2019.

FEDERATION INTERNATIONALE DE LA PRECONTRAINTE. **FIP Recommendations**: Practical Design of Structural Concrete. London: FIP, 1999.

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

G1 Mundo. Prédio que desabou parcialmente em Miami e deixou mortos começa a ser demolido. G1, 2021. Disponível em: <https://g1.globo.com/mundo/noticia/2021/07/04/predio-que-desabou-parcialmente-em-miami-e-deixou-mortos-comeca-a-ser-demolido.ghtml>. Acesso em: 13 maio 2025.

G1 Santa Catarina. Prédio com apartamentos de R\$ 4 milhões segue interditado há 1 ano em Florianópolis. G1, 2025. Disponível em: <https://g1.globo.com/sc/santa-catarina/noticia/2025/01/29/predio-apartamentos-4-milhoes-interditado-1-ano-florianopolis.ghtml>. Acesso em: 13 maio 2025.

GAO, X.; GAO, L.; ZHANG, F. A New Bond-Slip Model of Hybrid Bonded FRP-to-Concrete Joints. **Ksce Journal Of Civil Engineering**, v. 27, n. 1, p. 270-284, out. 2022.

GHOZANI, S.; MOGHADASI, M.; TAEPOOR, S. Numerical study of reinforced concrete corbels with different layup schemes of cfrp laminates. **Jurnal Teknologi**, v. 84, n. 1, p. 171-181, nov. 2021.

GRIBNIAK, V. *et al.* Mechanical Behavior of Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams Bonded with External Carbon Fiber Sheets. **Materials**, [S.L.], v. 10, n. 6, p. 666, 17 jun. 2017.

GUDONIS, E.; TIMINSKAS, E.; GRIBNIAK, V.; KAKLAUSKAS, G.; ARNAUTOV, A. K.; TAMULĖNAS, V. FRP REINFORCEMENT FOR CONCRETE STRUCTURES: state-of-the-art review of application and design. **Engineering Structures And Technologies**, [S.L.], v. 5, n. 4, p. 147-158, 8 maio 2014.

HARDJASAPUTRA, H. Evolutionary structural optimization as a tool in finding strut-and-tie models for designing reinforced concrete deep beam. **Procedia Engineering**, Local de Publicação, v. 125, p. 995 - 1000, 2015.

HASNAT, A.; ISLAM, M. M.; AMIN, A. F. M. S. Enhancing the Debonding Strain Limit for CFRP-Strengthened RC Beams Using U-Clamps: identification of design parameters. **Journal Of Composites For Construction**, v. 20, n. 1, p. 1-16, fev. 2016.

IBRAHIM, S.; ABDULRAHMAN, B.; YAHIA, I.; ALSUBARI, B.; ABDULAALI, S.; ALQAWZAI, S. Behavior of Reinforced Concrete Corbels Strengthened with CFRP

Strips Subjected to Monotonic and Repeated Loading. **Tikrit Journal Of Engineering Sciences**, v. 31, n. 1, p. 88-100, 16 fev. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO. **IBRACOM CT 303**: Uso de materiais não convencionais para estruturas de concreto, fibras e concreto reforçado com fibras. São Paulo: IBRACOM CT 303, 2023.

IVANOVA, I.; ASSIH, J.; LI, A.; DONTCHEV, D.; DELMAS, Y. Experimental investigation into strengthened short reinforced concrete corbels by bonding carbon fiber fabrics. **Journal Of Adhesion Science and Technology**, v. 29, 2015.

KHEYRODDIN, A.; RAYGAN, S.; KIOUMARSI, M. Strut and tie model for CFRP strengthened reinforced concrete corbels. **Engineering Structures**, v. 304, 2024.

LAMANNA, A. J.; BANK, L. C.; SCOTT, D. W. Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Beams by Mechanically Attaching Fiber-Reinforced Polymer Strips. **Journal Of Composites For Construction**, v. 8, n. 3, p. 203-210, jun. 2004.

LEE, J.; LOPEZ, M. M. Characterization of FRP Uwrap Anchors for Externally Bonded FRP-Reinforced Concrete Elements: an experimental study. **Journal Of Composites For Construction**, [S.L.], v. 20, n. 4, p. 1-11, ago. 2016.

LLAURADÓ, P. V.; IBELL, T.; GÓMEZ, J. F.; RAMOS, F. J. G. Pull-out and shear-strength models for FRP spike anchors. **Composites Part B: Engineering**, v. 116, p. 239-252, maio 2017.

MACGREGOR, J. G. **Reinforced Concrete: Mechanics and Design**. 3. Ed. New Jersey: Prentice Hall, 1997.

MEIER, U. Strengthening of structures using carbon fibre/epoxy composites. **Construction And Building Materials**, v. 9, n. 6, p. 341-351, dez. 1995.

MENN, Christian. **Prestressed Concrete Bridges**. Zurich: B. Birkhäuser, 1986.

MIGOTTO, D. **Autofunções e frequências de vibração do modelo Euler-Bernoulli para vigas não-clássicas**. 2011. Dissertação (Mestrado em Matemática) – Centro de Ciências Naturais e Exatas, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2011.

MOGHADDAS, A.; MOSTOFINEJAD, D.; ILIA, E. Empirical FRP-concrete effective bond length model for externally bonded reinforcement on the grooves. **Composites Part B: Engineering**, [S.L.], v. 172, p. 323-338, set. 2019.

MOHAMAD-ALI, A. A.; ATTIYA, M. A. Experimental behaviour of reinforced concrete corbels strengthened with carbon fibre reinforced polymer strips. **Basrah Journal for Engineering Science**, v. 12, 2012.

MOSTAFA, A.; RAZAQPUR, A. G. CFRP Anchor for preventing premature debonding of externally bonded FRP laminates from concrete. **Journal of Composites for Construction**, v. 17, n. 17, p. 641-650, 2013.

MOSTOFINEJAD, D.; ESFAHANI, M. R.; SHOMALI, A. Experimental and numerical study of the RC beams shear-strengthened with NSM technique. **Journal Of Composite Materials**, v. 53, n. 17, p. 2377-2389, fev. 2019.

MUTONI, A.; RUIZ, M. F. Dimensionamiento y verificación del hormigón estructural mediante el método de los campos de tensiones. **Journal Hormigón y Acero**, n. 242, 2006.

MUTTONI, A.; SCHWARTZ, J.; THÜRLIMANN, B. **Design of Concrete Structures with Stress Fields**. Boston: Birkhauser, 1997.

PAN, J.; WU, Y. Analytical modeling of bond behavior between FRP plate and concrete. **Composites Part B: Engineering**, v. 61, p. 17-25, maio 2014.

POWELL, R. E.; FOSTER, S. J. Experimental Investigation on Rectangular Corbels Cast in High-Strength Concrete. **UNICIV Report n. R-338**, School of Civil Engineering, University of New South Wales, 1994.

RITTER, K. W. Die bauweise hennebique. **Schweizerische Bauzeitung**, Zurich, v. 33, n. 7, p. 59-61, fev. 1899.

ROMANICHEN, R. M.; SOUZA, R. A Reinforced concrete corbels strengthened with external prestressing. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, [S.L.], v. 12, n. 4, p. 812-831, ago. 2019.

SATO, H. T. **Dimensionamento de regiões D através do método dos elementos finitos e do método de bielas e tirantes aliado à otimização topológica**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

SAYED-AHMED, E. Y.; BAKAY, R.; SHRIVE, N.G.. Bond Strength of FRP Laminates to Concrete: state-of-the-art review. **Electronic Journal Of Structural Engineering**, v. 9, p. 45-61, 1 jun. 2009.

SCHLAICH, J. et al. Toward a Consistent Design of Structural Concrete. **PCI Journal**, v. 32, n. 3, p. 74 – 150, mai. – jun. 1987.

SCHLAICH, J. S.; SCHÄFER, K.; JENNEWEIN, M. Towards a consistent design of reinforced concrete structures. **Journal of the prestressed concrete institute**, v. 32, n. 03, p. 74-150, 1987.

SENA-CRUZ, J. M.; BARROS, J. A. O.; COELHO, M. R. F.; SILVA, L. F. F. T. Efficiency of different techniques in flexural strengthening of RC beams under monotonic and fatigue loading. **Construction and Building Materials**, v. 29, p. 175-182, abr. 2012.

SHADHAN, Khalid K.; KADHIM, Mohsen M. Mohammad. USE OF CFRP LAMINATES FOR STRENGTHENING OF REINFORCED CONCRETE CORBELS. **International Journal Of Civil Engineering And Technology**, [S.L.], v. 6, n. 11, p. 11-20, nov. 2015.

SHAKIR, Q. M. Analysis, Behavior, Strengthening and repairing of Reinforced Concrete Corbels: Comprehensive Review. **Journal of Materials and Engineering Structures**, v. 10, n. 2, p. 157–184, mar. 2023.

SIDDIKA, A.; MAMUN, M.; ALYOUSEF, R.; AMRAN, Y. Mugahed. Strengthening of reinforced concrete beams by using fiber-reinforced polymer composites: a review. **Journal Of Building Engineering**, v. 25, p. 1-12, set. 2019.

SOUZA, V. C.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 2009. 243 p.

SU, R. K. L.; CHANDLER, A. M. Design criteria for unified strut and tie models. **Progress in Structural Engineering and Materials**, v. 3, n. 3, p. 288 – 298, 2001.

TECHNIQUES Soluções em Engenharia. **Reforço estrutural com perfis de chapa de aço**. Techniques, 2025. Disponível em: <https://techniques.com.br/servicos/reforco-estrutural-com-perfis-de-chapa-de-aco/>. Acesso em: 13 maio 2025.

TOBEIA, S. B. Behavior of corbels strengthened with carbon fiber reinforced polymers (CFRP)- Numerical study. **Engineering and technology Journal**, v. 32, 2014.

TORRES, F. M. **Análise Teórico – Experimental de Consolos de Concreto Armado**. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

VOUMARD, J. M. Precast Corbels Fitted to Columns. **Fib Bulletin 61**: Design examples for strut-and-tie models. 2011.

WAGNER, L. L.; CORREA, A. L. S.; DE FREITAS, D. B. Review on the use of prefabricated elements. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n. 10, p.75455-75465, 2020.

WU, Y.; HE, L.; BANK, L. C. Bond-Test Protocol for Plate-to-Concrete Interface Involving All Mechanisms. **Journal Of Composites For Construction**, v. 20, n. 1, p. 1-15, fev. 2016.

WU, Y.; HUANG, Y. Hybrid bonding of FRP to reinforced concrete structures. **Journal of Composites for Construction**, v. 12, n. 3, p. 266-273, jun. 2008.

WU, Yu-Fei; YAN, Jun-Hui; ZHOU, Ying-Wu; XIAO, Yan. Ultimate Strength of Reinforced Concrete Beams Retrofitted with Hybrid Bonded Fiber-Reinforced Polymer. **ACI Structural Journal**, v. 107, n. 4, p. 451-460, jul. 2010.

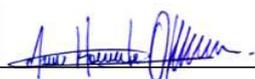
WU, Z.; HU, C.; WU, Y.; ZHENG, J. Improved hybrid bonding technique for attaching FRP to reinforced concrete beams. **Magazine Of Concrete Research**, v. 63, n. 11, p. 861-869, nov. 2011.

YALIM, B.; KALAYCI, A. S.; MIRMIRAN, A. Performance of FRP-Strengthened RC Beams with Different Concrete Surface Profiles. **Journal Of Composites For Construction**, v. 12, n. 6, p. 626-634, dez. 2008.

ZAKI, M. A.; RASHEED, H. A.; MITSIOS, K. Improvements in lightweight concrete T beams CFRP strengthened and anchored with U-wraps. **Structural Concrete**, v. 25, n. 3, p. 2206-2221, 6 abr. 2024.

ZHOU, Y.; WANG, X.; SUI, L.; XING, F.; HUANG, Z.; CHEN, C.; LI, P.; MEI, L. Effect of mechanical fastening pressure on the bond behaviors of hybrid-bonded FRP to concrete interface. **Composite Structures**, v. 204, p. 731-744, nov. 2018.

Página de assinaturas



Marcos Oliveira
946.018.361-15
Signatário



Maurício Ferreira
691.601.122-04
Signatário



Aarao Neto
563.116.132-04
Signatário

HISTÓRICO

- 24 jun 2025** 14:47:34  **Lucas Carvalho Silva** criou este documento. (Email: lucascarvalho44067@gmail.com, CPF: 611.572.163-66)
- 25 jun 2025** 18:29:24  **Aarao Ferreira Lima Neto** (Email: aaraol@yahoo.com.br, CPF: 563.116.132-04) visualizou este documento por meio do IP 191.246.250.105 localizado em Belém - Pará - Brazil
- 25 jun 2025** 18:29:24  **Aarao Ferreira Lima Neto** (Email: aaraol@yahoo.com.br, CPF: 563.116.132-04) assinou este documento por meio do IP 191.246.250.105 localizado em Belém - Pará - Brazil
- 25 jun 2025** 17:09:27  **Maurício de Pina Ferreira** (Email: mpina@ufpa.br, CPF: 691.601.122-04) visualizou este documento por meio do IP 179.151.222.123 localizado em Belém - Pará - Brazil
- 25 jun 2025** 17:09:27  **Maurício de Pina Ferreira** (Email: mpina@ufpa.br, CPF: 691.601.122-04) assinou este documento por meio do IP 179.151.222.123 localizado em Belém - Pará - Brazil
- 25 jun 2025** 15:46:08  **Marcos Honorato Oliveira** (Email: honorato.eng@gmail.com, CPF: 946.018.361-15) visualizou este documento por meio do IP 164.41.4.26 localizado em Brasília - Federal District - Brazil
- 25 jun 2025** 15:46:09  **Marcos Honorato Oliveira** (Email: honorato.eng@gmail.com, CPF: 946.018.361-15) assinou este documento por meio do IP 164.41.4.26 localizado em Brasília - Federal District - Brazil

