



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

LAYSE RAFAELE FURTADO LIMA

EFEITO DA TAXA DE ARMADURA EXISTENTE E DO SISTEMA DE ANCORAGEM NA
RESISTÊNCIA À FLEXÃO DE CONSOLOS CURTOS DE CONCRETO ARMADO
REFORÇADOS COM LAMINADOS DE PRFC

Tucuruí, PA
2025



Escaneie a imagem para verificar a autenticidade do documento
Hash SHA256 do PDF original ee2dba1ceb080d85bfff576009081085495b1a73f3c9dead0aba183dba84ee01
<https://valida.ae/6058f61deb053cfbe4798933cc263396af04cecdad2ecb69>



LAYSE RAFAELE FURTADO LIMA

**EFEITO DA TAXA DE ARMADURA EXISTENTE E DO SISTEMA DE
ANCORAGEM NA RESISTÊNCIA À FLEXÃO DE CONSOLOS CURTOS DE
CONCRETO ARMADO REFORÇADOS COM LAMINADOS DE PRFC**

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 a obtenção do título de Mestre em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético. Área de concentração: Estruturas.

Orientador: Maurício de Pina Ferreira.

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)

F992e Furtado Lima, Layse Rafaela.
Efeito da taxa de armadura existente e do sistema de ancoragem na resistência à flexão de consolos curtos de concreto armado reforçados com laminados de PRFC / Layse Rafaela Furtado Lima, . — 2025.
128 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Maurício de Pina Ferreira 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. Consolo curto de concreto. 2. Reforço ligado externamente. 3. Polímero reforçado com fibra de carbono. 4. Sistema de ancoragem. I. Título.

CDD 620



LAYSE RAFAELE FURTADO LIMA

EFEITO DA TAXA DE ARMADURA EXISTENTE E DO SISTEMA DE ANCORAGEM NA RESISTÊNCIA À FLEXÃO DE CONSOLOS CURTOS DE CONCRETO ARMADO REFORÇADOS COM LAMINADOS DE PRFC

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 a obtenção do título de Mestre em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético. Área de concentração: Estruturas.

Orientador: Maurício de Pina Ferreira.

Aprovada em 13 de junho de 2025.

BANCA EXAMINADORA:



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

Assinado por: **VÁLTER JOSÉ DA GUIA LÚCIO**
Num. de Identificação: 04892282
Data: 2025.06.17 19:01:37+01'00'

Prof. Dr. Válder José da Guia Lúcio / Faculdade Nova de Lisboa – Examinador Externo



Prof. Dra. Gláucia Maria Dalfré / Universidade Federal de São Carlos – Examinador Externo



Prof. Dr. Aarão Ferreira Lima Neto / Universidade Federal do Pará – Examinador Interno



*Se você não tivesse capacidade,
Deus não te daria a oportunidade.*



Escaneie a imagem para verificar a autenticidade do documento
Hash SHA256 do PDF original ee2dba1ceb080d85bfff576009081085495b1a73f3c9dead0aba183dba84ee01
<https://valida.ae/6058f61deb053cbe4798933cc263396af04cecdad2ecb69>



AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço aos meus pais, que foram meu refúgio e fonte de inspiração, que sonharam comigo e me apoiaram em cada passo. Luciane, Marcos, Socorro e Linevaldo, essa vitória é nossa.

A minha irmã Lívia e aos meus tios Larisse, Leonardo e Júnior, obrigada por serem meu ânimo e apoio, vocês me ensinaram que quando se tem família, um sonho é vivido por todos.

Ao meu grande apoiador, Rodrigo Moraes, que foi a minha fonte de incentivo diária, minha calmaria nos dias mais turbulentos, e que esteve comigo em cada luta, obrigada por tudo meu amor.

Agradeço aos meus amigos e companheiros de pesquisa, Jedson Abrantes, Paulo Sérgio e Lucas Silva, eu não teria conseguido sem vocês. Obrigada por tornarem essa caminhada mais fácil, pela companhia nas inúmeras reuniões e ensaios. Hoje lembro com saudade dos dias cansativos em laboratório que terminavam em pizza. Essa pesquisa é fruto de um trabalho em equipe.

Ao meu orientador Maurício de Pina, por acreditar em mim. Ao longo desses seis anos trabalhando juntos, você foi um grande incentivador. Obrigada por ter me dado oportunidades que me fizeram ser a pesquisadora e profissional que sou hoje. Você me ensinou a sempre duvidar de tudo, mas nunca duvidou que eu conseguiria.

A minha família NUMEA, Iana Damasceno, Mayara Costa, João Victor, Arlene Alves, Manoel Mangabeira, Rafaela Novaes e Erick Rocha. Um agradecimento especial para vocês, que tornaram meus dias mais alegres, que sempre estenderam a mão quando precisei e caminharam ao meu lado em cada fase.

Aos que me acolheram no campus universitário de Tucuruí, Aarão Neto, Ailana Guta, Thaisy Mayara, Paulo Elisson e todos que contribuíram no meu dia a dia e na minha pesquisa, muito obrigada.

Por fim, agradeço ao NDAE, PPGINDE e CAPES, por acreditarem na minha pesquisa e por apoiá-la.



RESUMO

Consolos curtos são elementos utilizados em pontes e edifícios para suportar vigas, longarinas ou cargas concentradas de grande intensidade, sendo caracterizados por apresentarem uma relação vão-altura menor que um. Ao longo de sua vida útil, essas estruturas podem deixar de atender aos requisitos básicos de segurança por razões como erro de projeto, degradação do material, sobrecarga ou mudança na utilização, sendo necessárias técnicas de reforço que sejam aplicadas com rapidez e de forma eficiente. Nesse sentido, este trabalho busca analisar experimentalmente consolos curtos de concreto armado reforçados externamente à flexão com laminados de Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono (PRFC). Para isso, foram analisados seis espécimes, sendo três com taxa de armadura de flexão de 0,18% e três com taxa de 0,47%. Todos os modelos possuem a mesma geometria, com a presença de estribos horizontais e verticais. O reforço foi posicionado em ambas as faces do consolo e ancorado nas extremidades, sendo verificado a influência de dois sistemas. A primeira ancoragem é composta por chapa de aço e parafusos, enquanto a segunda é formada por sobreposições de laminados, com colagem transversal em sua última camada. Com isso, foi possível analisar que o reforço se mostrou eficiente em termos de incremento de resistência, que variaram de 14,5% a 50,3%, com destaque para a ancoragem híbrida, que proporcionou o maior valor de carregamento.

Palavras-chave: Consolo curto de concreto; Reforço ligado externamente; Polímero reforçado com fibra de carbono; Sistema de ancoragem;



ABSTRACT

Short corbels are elements used in bridges and buildings to support beams, stringers or concentrated loads of great intensity, and are characterized by having a span-to-height ratio of less than one. Over the course of their useful life, these structures can fail to meet basic safety requirements for reasons such as design error, material degradation, overload or change in use, requiring reinforcement techniques that can be applied quickly and efficiently. With this in mind, this work seeks to experimentally analyze short reinforced concrete beams reinforced externally in bending with Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) laminates. To this end, six specimens were analyzed, three with a 0.18% flexural reinforcement rate and three with a 0.47% rate. All the models have the same geometry, with the presence of horizontal and vertical stirrups. The reinforcement was positioned on both sides of the cantilever and anchored at the ends, checking the influence of two systems. The first anchoring system is made up of steel plates and bolts, while the second is made up of overlapping laminates, with transverse bonding in the last layer. As a result, it was possible to analyze that the reinforcement proved to be efficient in terms of increased resistance, which ranged from 14,5% to 50,3%, with the hybrid anchorage standing out as having the highest loading value.

Keywords: Concrete short corbel; Externally bonded reinforcement; Carbon fiber reinforced polymer; Anchoring system;



LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Casos de ruptura e manifestações patológicas em consolos (Neupane et al., 2017; Ávila et al., 2010; Uchoa e Pinheiro, 2023; Calebe, 2021).	19
Figura 1.2 – Métodos de reforço a flexão em consolos (Adaptado de Bobek et al., 2023; Romanichen e Souza, 2019; Shakir et al., 2022).	20
Figura 1.3 – Método de ancoragem híbrida (Adaptado de Zhao et al., 2023).	21
Figura 1.4 – Sistema de ancoragem colado transversalmente (Adaptado de Abrantes et al., 2024).	22
Figura 1.5 – Sistemas de ancoragem em consolos de concreto (Adaptado de Ivanova et al., 2015; Shadhan e Kadhim, 2015; Abdulrahman, 2021)	22
Figura 2.1 - Utilização de consolos de concreto armado (Bobek et al., 2024).	25
Figura 2.2 - Principais características de consolos curtos (Adaptado de ABNT NBR 6118, 2023; e Kamadjaja, 2020).	26
Figura 2.3 - Modo de ruptura de consolos curtos de concreto (Adaptado de Araújo et al., 2017).	27
Figura 2.4 - Trajetória de tensões em consolos curtos (Adaptado de Araújo et al., 2017).	28
Figura 2.5 - Tipos de Bielas (Adaptado de Schlaich et al., 1987).	29
Figura 2.6 - Tipos de Nós (Adaptado de ACI 318, 2019).	30
Figura 2.7 - Modelo de Bielas e Tirantes para Consolos Curtos de Concreto (Adaptado de ABNT NBR 6118 (2023)).	30
Figura 2.8 - Diferentes usos do PRFC's (Adaptado de Ke et al., 2023).	31
Figura 2.9 - Técnica <i>Near Surface Mounted</i> (Adaptado de Rezazadeh e Barros, 2015)	33
Figura 2.10 - Técnica <i>Externally Bonded</i> (Adaptado de Kotynia et al., 2021).	33
Figura 2.11 - Mecanismos de falha por descolamento (Adaptado de Buyukozturk et al., 2006).	34
Figura 2.12 - Falha por ruptura do PRFC (Adaptado de Morgam, 2015).	34
Figura 2.13 - FRP Spike (Adaptado de Sun et al., 2020; Muciaccia et al., 2022).	35
Figura 2.14 - Configuração de âncoras U-Jackets (Adaptado de Fu et al., 2018).	36
Figura 2.15 - Âncoras π -Anchor (Adaptado de Mostafa e Razaqpur, 2013).	37



Figura 2.16 - Configuração do sistema auto travante (Adaptado de Zhou <i>et al.</i> , 2023).	38
Figura 2.17 - Aplicação do sistema de ancoragem U-Wrap (Adaptado de Lee e Lopez, 2020).	39
Figura 2.18 - Configuração da ancoragem mecânica com parafuso (Adaptado de Realfonzo <i>et al.</i> , 2013).	40
Figura 2.19 - Modos de falha de ancoragem com parafusos (Adaptado de Kim <i>et al.</i> , 2021).	41
Figura 2.20 - Mecanismo da ligação híbrida (Adaptado de Chen <i>et al.</i> , 2019).	41
Figura 2.21 - Mecanismo da ligação híbrida (Adaptado de Liu <i>et al.</i> , 2023).	42
Figura 2.22 – Sistema de ensaio com colagem transversal (Adaptado de Abrantes <i>et al.</i> , 2024).	43
Figura 2.23 - Configuração dos consolos reforçados (Adaptado de Mohamad-Ali e Attiya, 2012)	44
Figura 2.24 – Incremento de resistência em relação ao consolo referência	45
Figura 2.25 – Configuração dos consolos reforçados (Adaptado de IVANOVA <i>et al.</i> , 2015).	46
Figura 2.26 – Incremento de resistência em relação ao consolo referência	46
Figura 2.27 – Configuração dos consolos reforçados (Adaptado de Shadhan e Kadhim, 2015).	47
Figura 2.28 – Incremento de resistência em relação ao consolo referência	48
Figura 2.29 – Configuração dos consolos reforçados (Adaptado de Al-Kamaki <i>et al.</i> , 2018).	49
Figura 2.30 – Incremento de resistência em relação ao consolo referência	49
Figura 2.31 – Configuração dos consolos reforçados (Adaptado de Abdulqader <i>et al.</i> , 2018).	50
Figura 2.32 – Incremento de resistência em relação ao consolo referência	51
Figura 2.33 – Configuração dos consolos reforçados (Adaptado de Abdulrahman <i>et al.</i> , 2021).	52
Figura 2.34 – Incremento de resistência em relação ao consolo referência	52
Figura 2.35 – Aumento na capacidade de carga em relação a taxa de reforço.	53
Figura 2.36 – Modos de ruptura de consolos reforçados.	54
Figura 2.37 – Modos de ruptura de consolos reforçados.	55



Figura 2.38 – Principais componentes de consolos de concreto (Adaptado de ACI 318, 2019).	55
Figura 2.39 – Critérios de detalhamento de ancoragens com parafuso (ACI 318, 2019)	58
Figura 2.40 – Modos de ruptura para carga de cisalhamento (Adaptado de ACI 318, 2019).	60
Figura 2.41 – Deformação e distribuição de tensões para uma seção retangular (ACI 440.2R, 2017).	64
Figura 2.42 – Área bruta da seção transversal de uma chapa (Adaptado de ABNT NBR 8800, 2024).	66
Figura 2.43 – Área líquida para uma seção em zigue zague (Adaptado de ABNT NBR 8800, 2024).	67
Figura 3.1- Geometria dos consolos.	68
Figura 3.2 - Detalhamento das armaduras.	69
Figura 3.3 – Detalhamento do reforço com sistema híbrido de ancoragem.	70
Figura 3.4– Sistema de ancoragem com colagem transversal (menor taxa de flexão)	71
Figura 3.5– Sistema de ancoragem com colagem transversal (maior taxa de flexão)	72
Figura 3.6 - Sistema de ensaio dos consolos.	73
Figura 3.7– Instrumentação para medição de deslocamentos verticais.	74
Figura 3.8 – Instrumentação do laminado para medição de deslocamentos.	75
Figura 3.9– Instrumentação da armadura dos consolos de referência.	75
Figura 3.10– Instrumentação da armadura dos consolos reforçados.	76
Figura 3.11- Instrumentação no concreto dos consolos.	76
Figura 3.12 - Instrumentação no reforço.	77
Figura 3.13 - Procedimentos realizados durante a concretagem.	78
Figura 3.14 – Características do corpo de prova.	80
Figura 3.15 – Valores médios para a caracterização do PRFC.	80
Figura 3.16– Resina epóxi utilizada.	81
Figura 3.17– Processo de preparação da superfície.	82
Figura 3.18– Limpeza e regularização da superfície.	83
Figura 3.19– Limpeza e aplicação da resina no laminado de PRFC.	83



Figura 3.20– Processo de aplicação do laminado de PRFC	84
Figura 3.21– Processo de aplicação da ancoragem híbrida.	85
Figura 3.22– Consolos reforçados com ancoragem híbrida.....	85
Figura 3.23– Processo de aplicação da ancoragem com colagem transversal.....	86
Figura 3.24– Consolos reforçados com colagem transversal.....	87
Figura 4.1- Modelo de bielas e tirantes para os consolos de referência.	88
Figura 4.2- Medidas para ajuste do tirante.....	89
Figura 4.3- Modelo de bielas e tirantes para os consolos reforçados.	90
Figura 4.4- Distribuição de esforço na treliça dos consolos de referência.	90
Figura 4.5- Distribuição de esforço na treliça dos consolos reforçados.	91
Figura 4.6- Distribuição de esforço para a ancoragem.....	91
Figura 4.7- Zonas escolhidas para análise.....	92
Figura 5.1- Carga-deslocamento dos consolos conforme taxa da armadura principal.	94
Figura 5.2- Deformação no laminado de PRFC.	95
Figura 5.3- Deformação dos materiais para os consolos de referência.	97
Figura 5.4- Deformação dos materiais para os consolos reforçados e com ancoragem híbrida.	98
Figura 5.5- Deformação dos materiais para os consolos reforçados e com ancoragem com laminado colado transversalmente.	99
Figura 5.6- Abertura de fissuras para os consolos de referência.	101
Figura 5.7- Abertura de fissuras para os consolos reforçados e com ancoragem híbrida.	102
Figura 5.8- Abertura de fissuras para os consolos reforçados e com ancoragem com laminado colado transversalmente.....	103
Figura 5.9- Deformação na zona de compressão dos consolos de referência.....	104
Figura 5.10- Deformação na zona de compressão dos consolos reforçados e com ancoragem híbrida.	105
Figura 5.11- Deformação na zona de compressão dos consolos reforçados e com ancoragem colada transversalmente.	106
Figura 5.12- Monitoramento do escorregamento do laminado.....	107
Figura 5.13- Consolo CR-18 pós ensaio.	108
Figura 5.14- Consolo CR-47 pós ensaio.	109



Figura 5.15- Consolo CS-0,18-A pós ensaio.....	109
Figura 5.16- Consolo CS-0,47-A pós ensaio.....	110
Figura 5.17- Pryout dos consolos com ancoragem híbrida.	110
Figura 5.18- Consolo CS-0,18-B pós ensaio.....	111
Figura 5.19- Consolo CS-0,47-B pós ensaio.....	112
Figura 5.20- Descolamento do sistema de ancoragem transversal.....	112
Figura 5.21- Previsão de resistência pelo MBT.....	114
Figura 5.22- Análise das prescrições teóricas.....	115



LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Características do programa experimental de Mohamad-Ali e Attiya, (2012).....	44
Tabela 2.2 - Características do programa experimental de Ivanova <i>et al.</i> , (2015)	45
Tabela 2.3 – Características do programa experimental de Shadhan e Kadhim (2015)	47
Tabela 2.4 – Características do programa experimental de Al-Kamaki <i>et al.</i> (2018).	49
Tabela 2.5 – Características do programa experimental de Abdulqader <i>et al.</i> (2018)	50
Tabela 2.6 – Características do programa experimental de Abdulrahman <i>et al.</i> (2021)	51
Tabela 2.7 - Fator de confinamento da biela (ACI 318, 2019).....	56
Tabela 2.8 - Fator de eficiência da biela (ACI 318, 2019).	56
Tabela 2.9: Taxa de armadura mínima das bielas (ACI 318, 2019).	56
Tabela 2.10 - Configuração da região nodal (ACI 318, 2019).	57
Tabela 2.11: Comprimento de ancoragem reto (ACI 318, 2019).....	57
Tabela 2.12 - Fatores de modificação para ancoragem de barras (ACI 318, 2019)..	58
Tabela 2.13 - Requisitos mínimos de espaçamento e distância entre bordas (ACI 318, 2019).....	59
Tabela 2.14 - Recobrimento de concreto para elemento fabricados <i>in loco</i> (ACI 318, 2019).	59
Tabela 2.15 - Distância entre bordas na ausência de informações da âncora (ACI 318, 2019).	60
Tabela 2.16 - Fatores de modificação (ACI 318, 2019).....	62
Tabela 2.17 - Valores dos coeficientes de ponderação da resistência (ABNT NBR 8800, 2024).	67
Tabela 3.1 - Resumo das características dos consolos	69
Tabela 3.2 - Composição do traço adotado.....	79
Tabela 3.3- Propriedades mecânicas do concreto.	79
Tabela 3.4- Propriedades mecânicas do aço.	79
Tabela 3.5- Propriedades mecânicas do PRFC.	80
Tabela 4.1 - Cálculo da força no laminado.	89



Tabela 5.1 – Resumo de valores máximos obtidos em ensaios.....	108
Tabela 5.2 – Resumo de valores máximos de previsão pelo MBT.....	113
Tabela 5.3 – Comparação de cortantes máximos.	115



SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.1. Justificativa.....	23
1.2. Objetivos	23
1.2.1. Objetivo Geral.....	23
1.2.2. Objetivos Específicos	23
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1. Consolos Curtos de Concreto Armado.....	25
2.2. Método de Bielas e Tirantes.....	28
2.3. Técnicas de Reforço com PRFC.....	31
2.3.1. FRP Spike	35
2.3.2. FRP U-Jacket.....	36
2.3.3. π -Anchor	37
2.3.4. Self-Locking.....	38
2.3.5. FRP U-Wrap.....	38
2.3.6. Mechanically Fastened.....	39
2.3.7. Hybrid Bonded.....	41
2.3.8. Ancoragem com Colagem Transversal	42
2.4. Consolos Reforçados com PRFC.....	43
2.4.1. Mohamad-Ali e Attiya (2012).....	43
2.4.2. Ivanova <i>et al.</i> (2015).....	45
2.4.3. Shadhan e Kadhim (2015).....	47
2.4.4. Al-Kamaki <i>et al.</i> (2018).....	48
2.4.5. Abdulqader <i>et al.</i> (2018).....	50
2.4.6. Abdulrahman <i>et al.</i> (2021).....	51
2.4.7. Discussão dos Trabalhos	53
2.5. Prescrições Normativas	55
2.5.1. ACI 318 (2019) - Dimensionamento	55
2.5.2. ACI 318 (2019) – Ancoragem com Parafusos	58
2.5.3. ACI 440.2R (2017) – Verificação do Laminado	62
2.5.4. ABNT NBR 8800 (2024) – Verificação da Chapa de Aço.....	65
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	68



3.1. Características dos Consolos.....	68
3.2. Características do Reforço.....	70
3.3. Sistema de Ensaio.....	72
3.4. Instrumentação.....	73
3.4.1. Deslocamentos Verticais.....	73
3.4.2. Deformação no Concreto e nas Armaduras.....	75
3.4.3. Deformação no Reforço.....	77
3.5. Propriedades e Características dos Materiais.....	78
3.5.1. Concreto.....	78
3.5.2. Aço.....	79
3.5.3. Polímero Reforçado com Fibra de Carbono (PRFC).....	79
3.5.4. Resina.....	81
3.6. Processo Executivo do Reforço.....	81
3.6.1. Preparação da Superfície.....	81
3.6.2. Aplicação do Laminado de PRFC.....	83
3.6.3. Aplicação das Ancoragens.....	84
4. MODELO PARA ANÁLISE TEÓRICA.....	88
5. RESULTADOS.....	94
5.2. Deslocamento Vertical.....	94
5.3. Deformação dos Materiais.....	95
5.3.1. Laminado de PRFC.....	95
5.3.2. Aço e Concreto.....	96
5.4. Abertura de Fissuras.....	100
5.5. Deformações no Bloco de Compressão.....	103
5.6. Escorregamento do Laminado.....	106
5.7. Modos de Ruptura.....	107
5.8. Análise da Previsão Teórica.....	113
6. CONCLUSÕES.....	116
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	118



1. INTRODUÇÃO

Consolos curtos são elementos utilizados na transferência de cargas concentradas em edifícios de concreto armado ou pré-moldado. São caracterizados por uma projeção curta, com relação vão-altura (a/d) menor que um e pelo comportamento controlado, em grande parte, pelo cisalhamento (Shakir, 2020). Devido à sua geometria e condições de carregamento, apresentam uma perturbação considerável na distribuição das tensões, sendo classificados como regiões de descontinuidade “D”, onde as hipóteses de Bernoulli não são válidas (Chetchotisak *et al.*, 2022).

Para um dimensionamento mais preciso dessas regiões, pode ser utilizado o Método de Bielas e Tirantes. Nesse modelo, aplica-se uma analogia simplificada de treliça, baseada em uma condição de equilíbrio de forças, compostas por membros de compressão e tração, denominados de bielas e tirantes, respectivamente, que são conectados por nós (Amani *et al.*, 2024). Os tirantes são responsáveis pela área de aço da armadura principal, enquanto a verificação das bielas busca garantir a capacidade adequada para as zonas comprimidas.

Diversos estudos são realizados para compreender o comportamento, a capacidade final e os modos de ruptura desses elementos, de forma que diferentes variáveis são analisadas e aplicadas com o objetivo de melhorar o desempenho de novas estruturas (Ridha *et al.*, 2017; Abdul-razzaq e Dawood, 2020; Araujo *et al.*, 2021). No entanto, Bobek *et al.* (2024) ressaltam que, além das análises para garantir novos elementos mais seguros e duráveis, é necessário se atentar para a manutenção das estruturas já existentes.

Devido a efeitos ambientais, desgaste dos materiais, sobrecarga, erros de dimensionamento ou mudança na utilização, os consolos podem deixar de atender aos requisitos de vida útil. Na Figura 1.1 são ilustradas diferentes situações, como de Neupane *et al.* (2017) que relatam um elemento com ruptura por erro de dimensionamento no aparelho de apoio ou no comprimento inadequado de ancoragem da armadura principal. Já Ávila *et al.* (2010) apresentam um consolo com falha pós sismos recorrentes em Santiago do Chile, enquanto Uchoa e Pinheiro (2023) descrevem uma estrutura com múltiplas fissuras decorrentes de retração do concreto. Além disso, Calebe (2021) menciona um acidente no Paraná, com colapso total da



estrutura, após notificação de manifestação patológicas em diversos consolos pré-moldados.

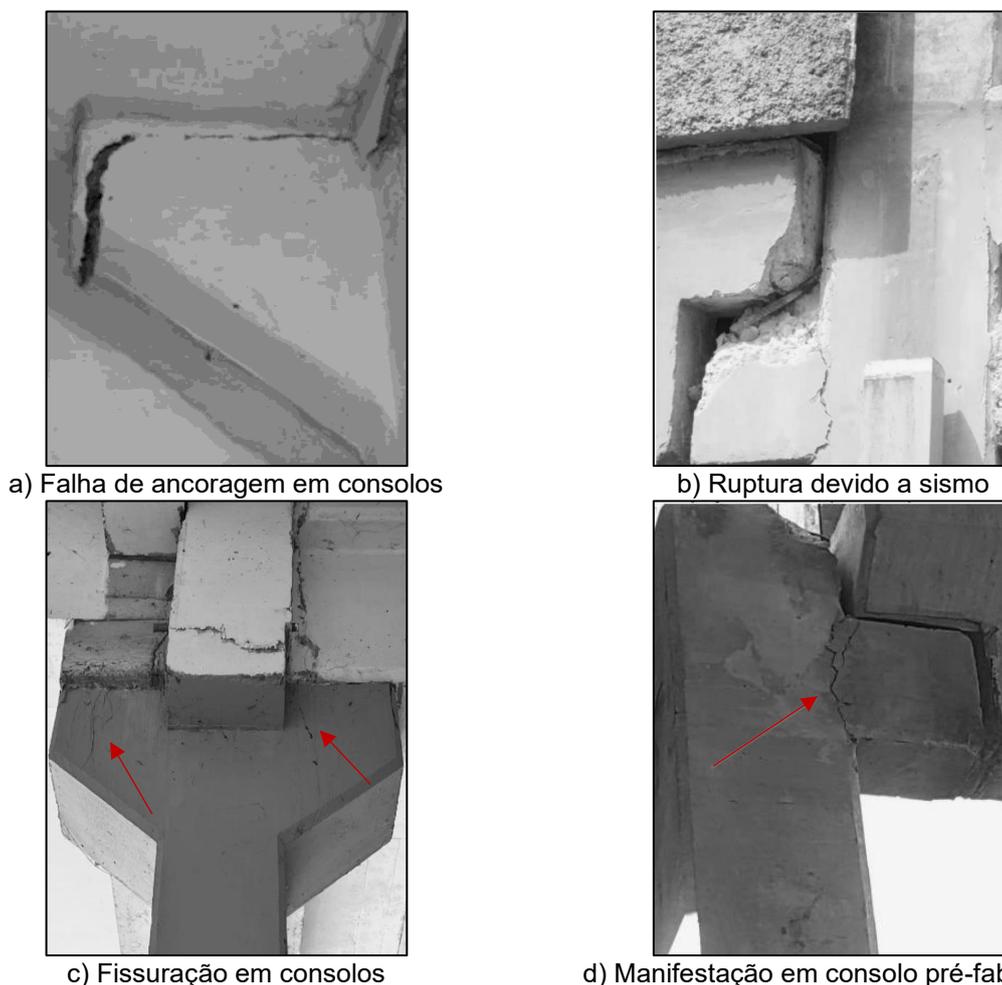


Figura 1.1 – Casos de ruptura e manifestações patológicas em consolos (Neupane et al., 2017; Ávila et al., 2010; Uchoa e Pinheiro, 2023; Calebe, 2021).

Nesse sentido, é necessário o estudo de técnicas de reparo e reforço desses elementos, buscando um método eficaz, confiável e econômico que aumente sua capacidade resistente, limite a propagação de fissuras e reduza deformações. Uma técnica convencional para reabilitação de elementos estruturais é o aumento da seção transversal, enquanto alguns métodos mais modernos envolvem um tratamento localizado, buscando aumentar a capacidade resistente, seja ao cisalhamento ou à flexão.

Para aquelas relacionadas a flexão podem ser utilizadas técnicas de protensão externa, chapas de aço, *Near-Surface Mounted* (tiras de polímeros embutidas no concreto) e *Externally Bonded Reinforcement* (Polímeros Reforçados



com Fibra de Carbono Colados Externamente), como ilustrado na Figura 1.2 (Romanichen e Souza, 2019).

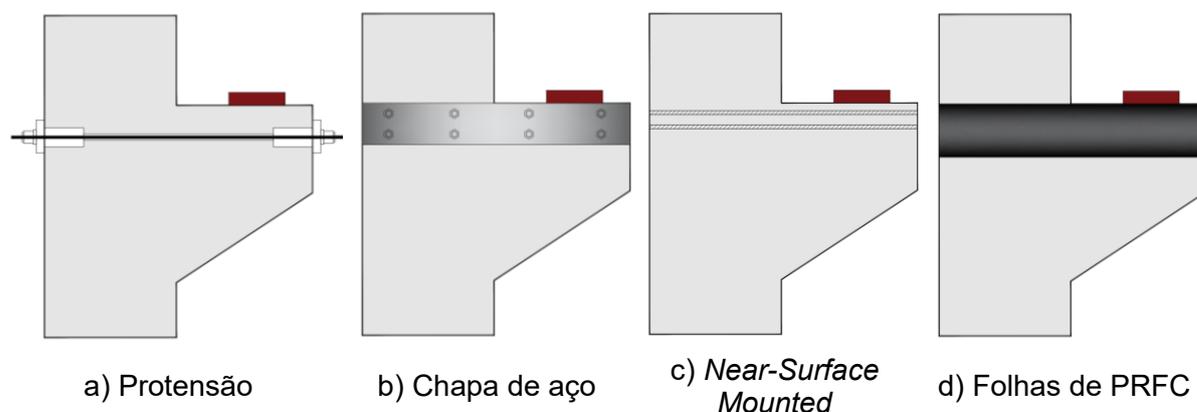


Figura 1.2 – Métodos de reforço a flexão em consolos (Adaptado de Bobek *et al.*, 2023; Romanichen e Souza, 2019; Shakir *et al.*, 2022).

Segundo Frhaan *et al.* (2021), entre os métodos citados, a utilização de PRFC consiste em uma solução prática, de fácil manuseio e rápida instalação. Considerando que os consolos podem ser estruturas pouco acessíveis, essas vantagens conferem boa viabilidade para esta técnica. Além disso, são materiais com grande leveza e alta resistência a tração, apresentando resultados mecânicos satisfatórios, resistência à corrosão elevada e pouca deformação em altas temperaturas. Vijayan *et al.* (2023) ainda ressaltam que as mantas/laminados de PRFC podem ser dispostas com diferentes orientações, largura e espessura, sendo um material adaptável a requisitos estruturais específicos, como é o caso dos consolos.

No entanto, Hanif *et al.* (2023) destacam que devem ser considerados os principais modos de ruptura nas estruturas reforçadas com laminado colado na superfície, sendo a falha por descolamento o tipo predominante. Ela pode ocorrer por delaminação na extremidade, separação do cobrimento do concreto e induzido por fissuras de flexão ou cisalhamento. Ainda segundo os autores, mesmo com a preparação adequada de superfície e utilização correta do material epóxi, esse tipo de falha é difícil de ser evitado.

Conforme Zhou *et al.* (2017), alguns sistemas de ancoragem são investigados para prevenir ou retardar esse descolamento das tiras de PRFC, buscando atingir níveis mais altos de deformação da fibra. Entre os métodos mais utilizados, os autores destacam a ancoragem utilizando o próprio PRFC, conhecida como FRP *Spike*,



ancoragem por fixação mecânica de parafusos (*Mechanically Fastened*) e ancoragem com chapa de aço e parafusos, conhecida como ancoragem híbrida (*Hybrid Bonded*).

O método de ancoragem híbrida consiste na combinação do uso de chapas de aço fixadas ao concreto com parafusos, podendo atravessar as folhas de PRFC ou serem posicionadas em ambos os lados, conforme demonstrado na Figura 1.3 (Wang e Guo, 2023). A posição adequada dos fixadores deve ser analisada e verificada, considerando os novos modos de ruptura que podem ocorrer, evitando ruptura das âncoras ou desprendimento.

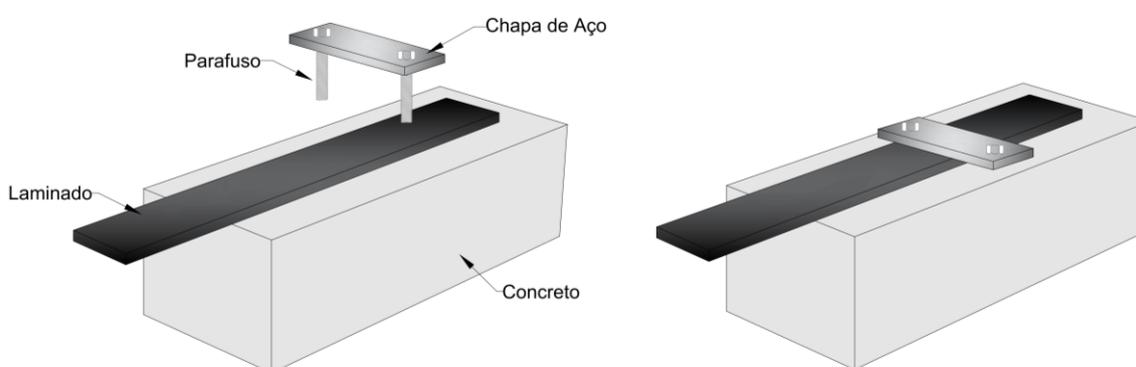


Figura 1.3 – Método de ancoragem híbrida (Adaptado de Zhao *et al.*, 2023).

Wu *et al.* (2011) obtiveram o dobro de resistência quando utilizada ancoragem híbrida, com as chapas e parafusos espaçadas ao longo da viga, sendo considerado um sistema promissor para evitar ou retardar um modo de falha por descolamento. Jiang *et al.* (2024) ressaltam que a maior parte dos estudos foram realizados em viga de teste, sendo necessário aplicações mais amplas para entender completamente o comportamento da ligação concreto-fibra.

Segundo Al-Saawani *et al.* (2024), outro sistema viável é aquele utilizando o próprio material de reforço, que elimina componentes e torna o processo mais otimizado. Além disso, segundo Grelle e Sneed (2013), quando o sistema é aplicado transversalmente, será proporcionado um efeito de fixação devido as deformações. Ainda segundo o autor, é uma metodologia flexível, podendo ser dispostas em diferentes formatos, largura e posição. Abrantes *et al.* (2024) verificou experimentalmente o sistema de ancoragem com aumento de seção e colagem transversal, utilizando laminados de PRFC, obtendo resultados satisfatórios quando



comparados ao laminado apenas colado, com incremento de resistência em torno de 67%. A Figura 1.4 ilustra as características utilizadas pelo autor, que consiste na sobreposição de camadas e colagem transversal.

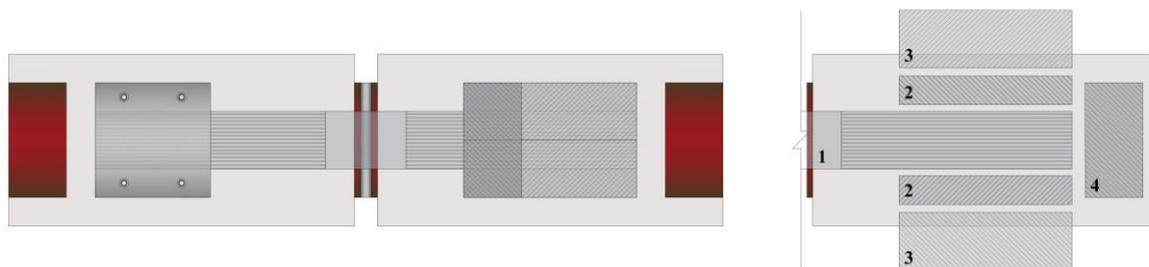


Figura 1.4 – Sistema de ancoragem colado transversalmente (Adaptado de Abrantes *et al.*, 2024).

Em relação aos consolos curtos de concreto, autores como Mahamad Ali e Attiya (2012), Ivanova *et al.* (2015), Shadhan e Kadhim (2015), Al-Kamaki *et al.* (2018), Abdulqader *et al.* (2018) e Abdulrahman (2021) estudaram experimentalmente consolos reforçados a flexão com manta de PRFC, sendo a grande maioria apenas com colagem em ambas as faces do elemento. Além disso, as variáveis comuns a esses trabalhos envolvem o número de camadas, disposição e quantidade de tiras. Entretanto, 51% dos corpos de prova estudados apresentaram ruptura por descolamento da fibra. Para evitar esse modo de falha, a prática comum aos estudos era envolver a manta em toda a seção do consolo, Figura 1.5a. Outra solução testada foi a utilização de ancoragem mecânica, como demonstrado na Figura 1.5b, no entanto, apenas um estudo analisou essa fixação com parafusos. Na Figura 1.5c é ilustrado também o consolo com chapa de aço, no entanto, apenas colada, sem fixação mecânica.

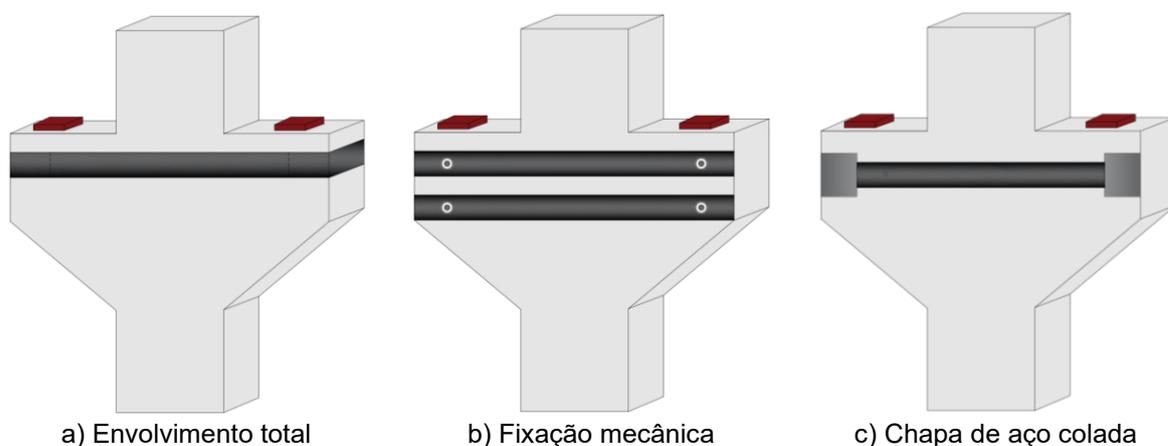


Figura 1.5 – Sistemas de ancoragem em consolos de concreto (Adaptado de Ivanova *et al.*, 2015; Shadhan e Kadhim, 2015; Abdulrahman, 2021)



1.1. Justificativa

O reforço de estruturas é essencial para garantir a capacidade resistente adequada, seja em casos de sobrecarga, mudança de utilização ou de efeitos ambientais e de tempo. Diversos estudos são realizados para compreender a melhor maneira de reforçar elementos; no entanto, quando se trata de elementos descontínuos, diversas lacunas são identificadas, como é o caso de consolos curtos de concreto.

Os consolos podem ser, muitas vezes, elementos pouco acessíveis e com geometria limitada para a ancoragem de reforços. Além disso, possuem uma distribuição de tensões que não se enquadra nos modelos tradicionais de análise. Esses fatores tornam os métodos de reforço mais restritos e pouco explorados na literatura científica.

Nesse contexto, este trabalho busca verificar experimentalmente consolos com diferentes taxas de armadura de flexão reforçados com laminado de PRFC e utilizando dois sistemas distintos de ancoragem. Dessa forma, procura contribuir para a análise de elementos descontínuos reforçados.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Geral

O presente trabalho tem por objetivo analisar experimentalmente consolos curtos de concreto armado com duas taxas de armadura de flexão e reforçados externamente com laminados de polímeros reforçados com fibra de carbono, utilizando dois sistemas de ancoragem, um híbrido e outro colado transversalmente.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Verificar o incremento de resistência proporcionado pela técnica de reforço utilizada, considerando os dois sistemas de ancoragem adotados;
- Comparar o desempenho dos sistemas de ancoragem e verificar qual proporcionou maior aproveitamento da capacidade do reforço;



- Verificar o efeito da variação da taxa de armadura de flexão existente (0,18% e 0,47%) sobre o incremento de resistência e os modos de ruptura dos elementos reforçados;
- Comparar os valores de resistência obtidos experimentalmente com as previsões teóricas.



2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, será realizada, inicialmente, uma revisão da literatura sobre consolos curtos de concreto armado, bem como sobre as particularidades de seu dimensionamento, comportamento e modos típicos de ruptura. Em seguida, o Polímero Reforçado com Fibra de Carbono (PRFC) será apresentado como um material para reforço em estruturas de concreto armado, por meio de técnicas que evidenciem suas principais propriedades, seu desempenho quanto ao modo de falha e os métodos de ancoragem possíveis. Com isso, serão discutidos trabalhos envolvendo o reforço de consolos de concreto com PRFC, assim como tendências e principais lacunas. Por fim, são descritos os critérios normativos utilizados para o dimensionamento do reforço utilizado, assim como as verificações do sistema de ancoragem escolhido.

2.1. Consolos Curtos de Concreto Armado

Consolos de concreto armado são estruturas que se projetam de um pilar, viga ou parede para suportar outra viga ou carga concentrada de grande intensidade, sendo caracterizados por apresentar uma relação vão/altura (a/d) menor que um (Beshara *et al.*, 2020). Estes elementos devem atender aos requisitos de resistência aos esforços de cargas verticais e forças horizontais causadas por retração, dilatação térmica ou da fluência de vigas, podendo ser dispostos simetricamente ou assimetricamente, como demonstrado na Figura 2.1 (Abdul-Razzaq *et al.*, 2020).



Figura 2.1 - Utilização de consolos de concreto armado (Bobek *et al.*, 2024).



Os consolos podem ser divididos em curtos, muito curtos ou longos. Essa divisão se baseia na distância “a”, medida da linha de aplicação de força à face externa do pilar, e a altura útil “d” do elemento. Segundo a ABNT NBR 6118 (2023), são classificados como curtos aqueles que possuem $0,5d \leq a \leq d$, muito curtos se $a \leq 0,5d$ e longo quando a relação a/d ultrapassa uma unidade. Já para o ACI 318 (2019), apenas a relação $a/d > 2$ pode ser considerada um limite para o dimensionamento como consolos; a partir desse valor, são tratados como vigas em balanço. A Figura 2.2 apresenta os principais componentes, cargas atuantes e características geométricas de consolos curtos de concreto armado.

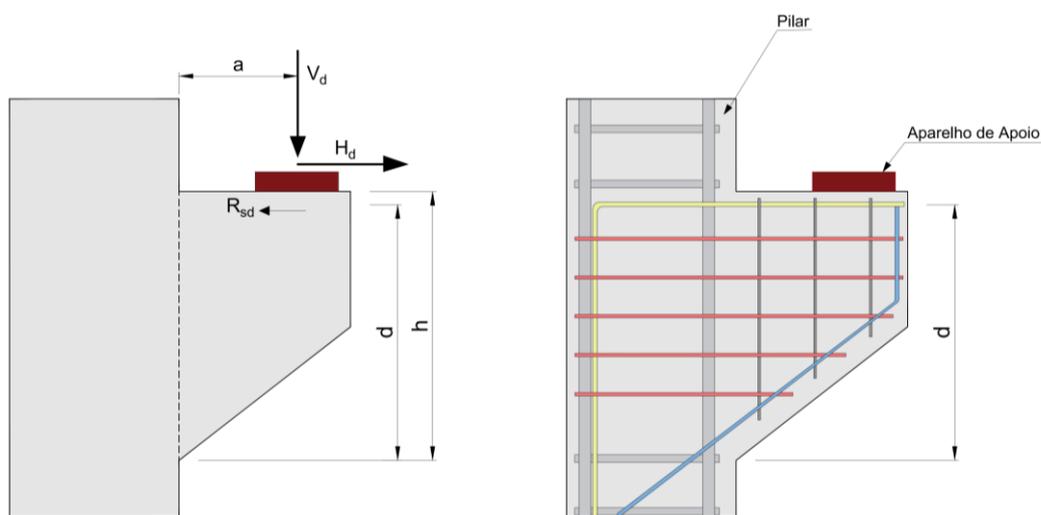


Figura 2.2 - Principais características de consolos curtos (Adaptado de ABNT NBR 6118, 2023; e Kamadjaja, 2020).

Em relação aos modos de ruptura, Shakir (2020) discute os seis principais modos de falha que ocorrem em consolos curtos de concreto, sendo estes:

- a) Ruptura por flexão, caracterizada pela abertura de uma fissura na parte superior do consolo junto ao pilar, com o escoamento da armadura principal e rotações significativas antes da ruptura por compressão do concreto, Figura 2.3a;
- b) Ruptura por fendilhamento diagonal, apresentando, inicialmente, uma fissura típica de flexão seguida pelo fendilhamento inclinado da biela de compressão, Figura 2.3b;
- c) Ruptura por cisalhamento puro, reconhecida por apresentar um quadro de fissuras inclinadas concentradas na região de ligação do consolo com o pilar, ocorrendo a ruptura nesse plano, Figura 2.3c;



d) Ruptura por falha de ancoragem, com um fendilhamento na região próxima ao apoio, devido a erros decorrentes do detalhamento, Figura 2.3d;

e) Ruptura por ação horizontal, podendo surgir através de efeitos dinâmicos, deformações ou variação térmica, provocando o surgimento de fissuras que não se prolongam até o pilar, mas atravessam o consolo, atingindo o bordo inferior, Figura 2.3e;

f) Ruptura por esmagamento do apoio com esmagamento do concreto localizado na região próxima ao apoio, Figura 2.3f;

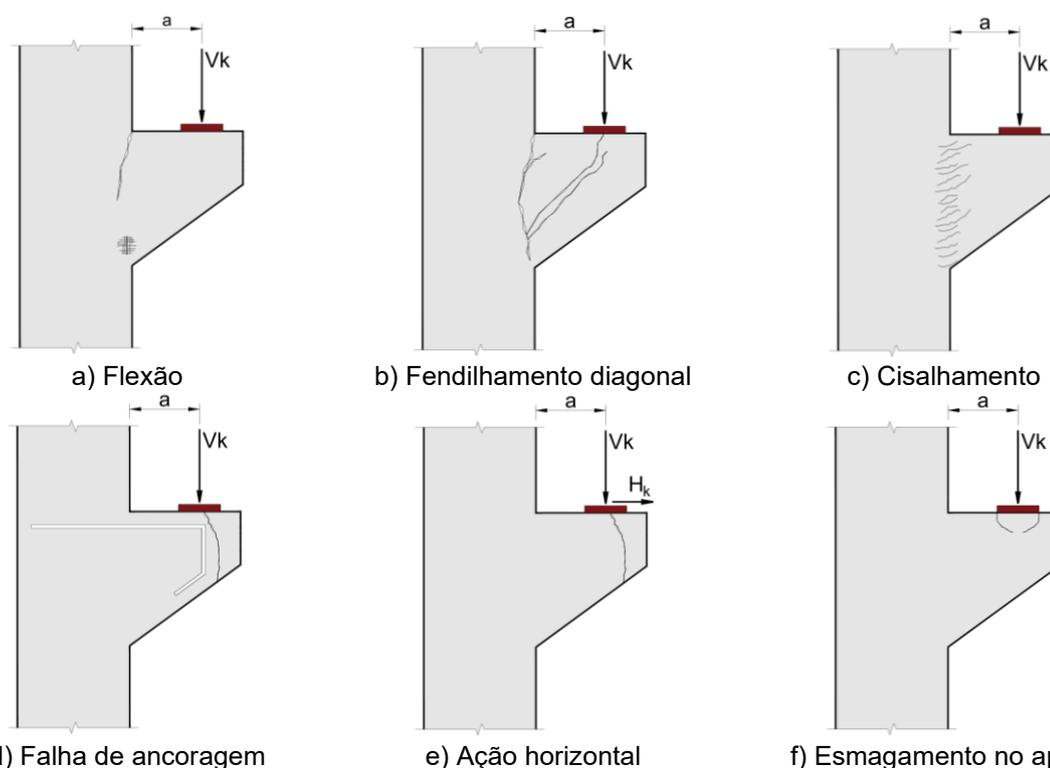


Figura 2.3 - Modo de ruptura de consolos curtos de concreto (Adaptado de Araújo et al., 2017).

Por possuírem dimensões com ordem de grandeza semelhante, os consolos são classificados como elementos tridimensionais, não havendo comprimento suficiente para que as perturbações localizadas sejam dissipadas. Devido sua descontinuidade geométrica e condições de carregamento, os consolos são formados unicamente por regiões de descontinuidade (D), onde a teoria geral da flexão não é válida, pois a distribuição das tensões não ocorre de maneira linear, como demonstrado na Figura 2.4 (Borghain et al., 2024).



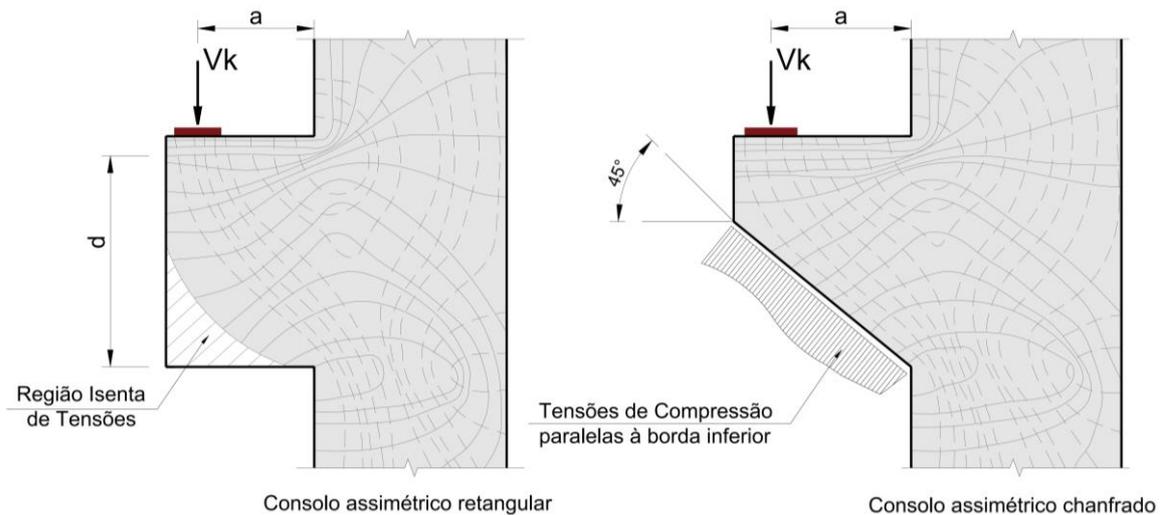


Figura 2.4 - Trajetória de tensões em consolos curtos (Adaptado de Araújo *et al.*, 2017).

Devido essa maior perturbação das tensões principais e cisalhantes, os métodos de dimensionamento baseados na hipótese de Bernoulli não são adequados, sendo necessária uma abordagem mais segura e aproximada das deformações, como a utilização do Método de Bielas e Tirantes (MBT) (Chetchotisak *et al.*, 2022).

2.2. Método de Bielas e Tirantes

O Método de Bielas e Tirantes tem como base o teorema do limite inferior da plasticidade e consiste na utilização da distribuição de tensões para determinar as regiões mais solicitadas de um elemento, convertendo o elemento em uma estrutura treliçada com membros axiais de compressão e tração, denominados de bielas e tirantes, que são conectados por nós. Além disso, o responsável pelo projeto pode escolher o modelo de treliça que melhor atenda as condições de equilíbrio do sistema (Abbood, 2023).

As bielas representam as tensões de compressão do modelo treliçado. Esses campos de compressão podem variar de acordo com cargas concentradas e as reações do elemento, podendo apresentar três tipos de configurações: prismática, leque ou garrafa (Figura 2.5). Os tipos prismáticos e em leque não apresentam campos de tensão com curvatura significativa, sendo as tensões ortogonais consideradas desprezíveis. Já para bielas do tipo em garrafa, essas tensões de tração

são significativas devido às mudanças de direção nas tensões de compressão (Guerra, 2017).

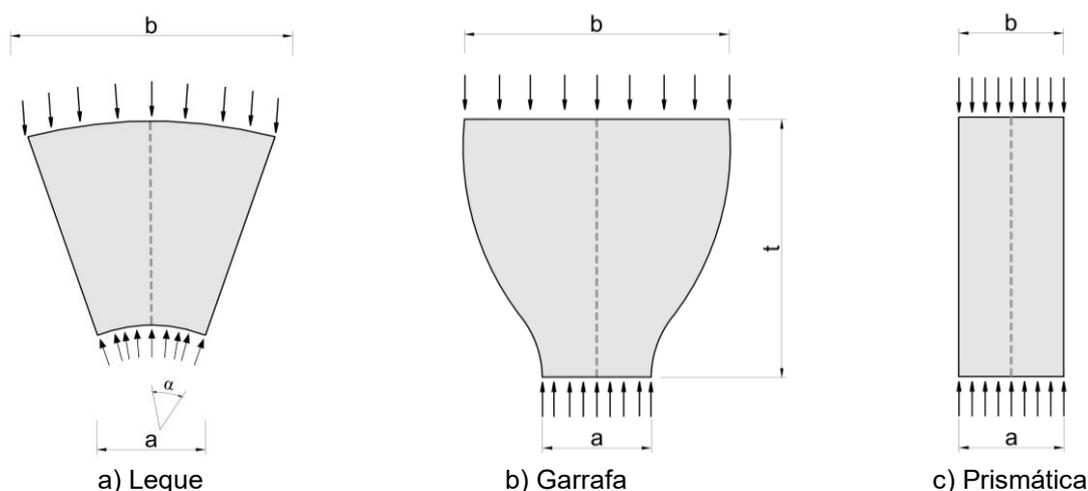


Figura 2.5 - Tipos de Bielas (Adaptado de Schlaich *et al.*, 1987).

Os tirantes representam os campos de tração da estrutura, que são absorvidos por barras de aço, que podem ser passivas ou ativas, sendo a tensão limite representada pela tensão de escoamento do aço (f_y ou f_{yp}) (Borges, 2022). Já os nós são regiões que conectam as bielas e tirantes, representando elementos onde ocorrem as transferências de cargas em direções anguladas e, apesar de calculado como um ponto, ele ocorre com uma determinada largura e comprimento do elemento analisado (Zhong *et al.*, 2017).

Os nós podem ser classificados e divididos conforme a força exercida sobre eles, sendo identificados como singulares ou contínuos. Os singulares ocorrem quando forças concentradas são aplicadas e desvios abruptos nos campos de tensões são observados, também conhecidos como nós críticos. Já para os contínuos, o desvio de forças ocorre em comprimentos razoáveis onde armaduras podem ser ancoradas; geralmente, não são críticos (Carvalho, 2018).

De acordo com a ABNT NBR 6118 (2023), os nós podem ser classificados em CCC, como aqueles que interligam somente as bielas de compressão, como CCT aqueles atravessados por apenas um tirante, enquanto os CTT ou TTT representam os nós atravessados por dois ou mais tirantes, como demonstrado na Figura 2.6.



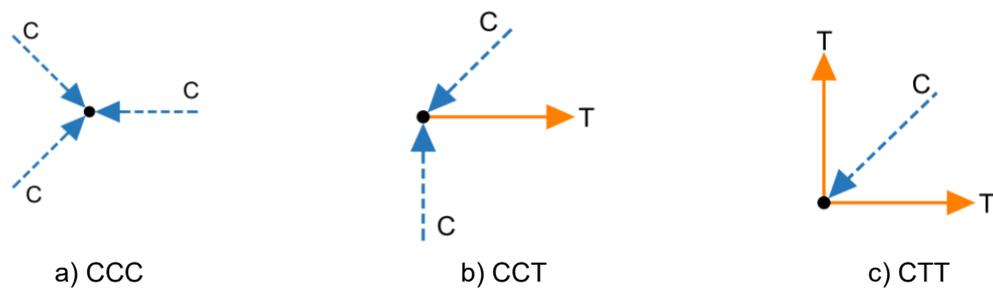


Figura 2.6 - Tipos de Nós (Adaptado de ACI 318, 2019).

Quando aplicados em consolos curtos, a idealização de um modelo de treliça consiste em um tirante na face superior, para resistir aos esforços de tração, e por uma biela inclinada, que parte do aparelho de apoio até a parte inferior na interface entre o consolo e o pilar. Todos os elementos são conectados por regiões nodais, como apresentado na Figura 2.7.

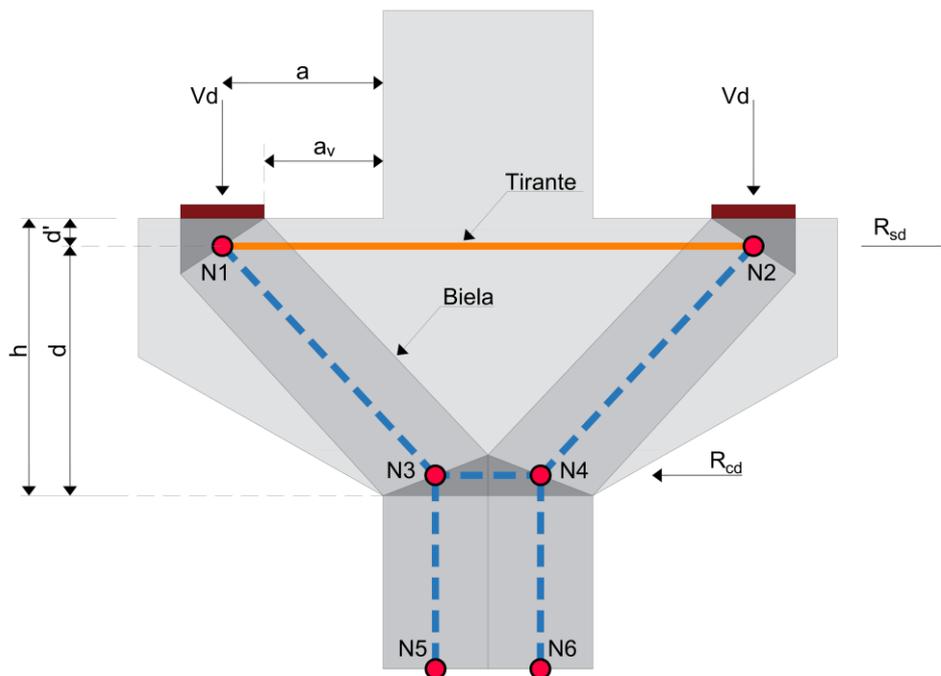


Figura 2.7 - Modelo de Bielas e Tirantes para Consolos Curtos de Concreto (Adaptado de ABNT NBR 6118 (2023)).



2.3. Técnicas de Reforço com PRFC

Obras de infraestrutura são compostas, em grande parte, por elementos de concreto armado, incluindo edifícios, pontes e grandes projetos. Apesar da boa capacidade de carga e segurança, algumas situações demandam um ajuste em sua resistência, como a mudança no uso da edificação, sobrecargas, exposição a cloretos ou falta de manutenções. Nesse cenário, os Polímeros Reforçados com Fibra (PRF) surgem como uma alternativa viável e promissora para o uso em novas estruturas e para o reforço de sistemas já existentes (Elchalakani *et al.*, 2023).

PRF's são materiais de alta resistência, não corrosivos e com massa leve. É um compósito formado pela combinação de dois ou mais elementos, com o objetivo de gerar um novo material com melhores qualidades. Entre eles, os Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono (PRFC) apresentam grande resistência e alta capacidade de uso em elementos estruturais (Amran *et al.*, 2018).

Segundo Askar *et al.* (2022) os PRFC's possuem uma resistência à tração elevada, sendo um material resistente e leve, possibilitando uma redução em massa de até 60%, quando em comparação ao aço convencional. Frhaan *et al.* (2021) ainda destaca outras vantagens deste material como a estabilidade de forma, mesmo com variações de temperatura, e instalação padronizada. Podem ser utilizados em forma de vergalhões, mantas ou laminados, como ilustrado na Figura 2.8.

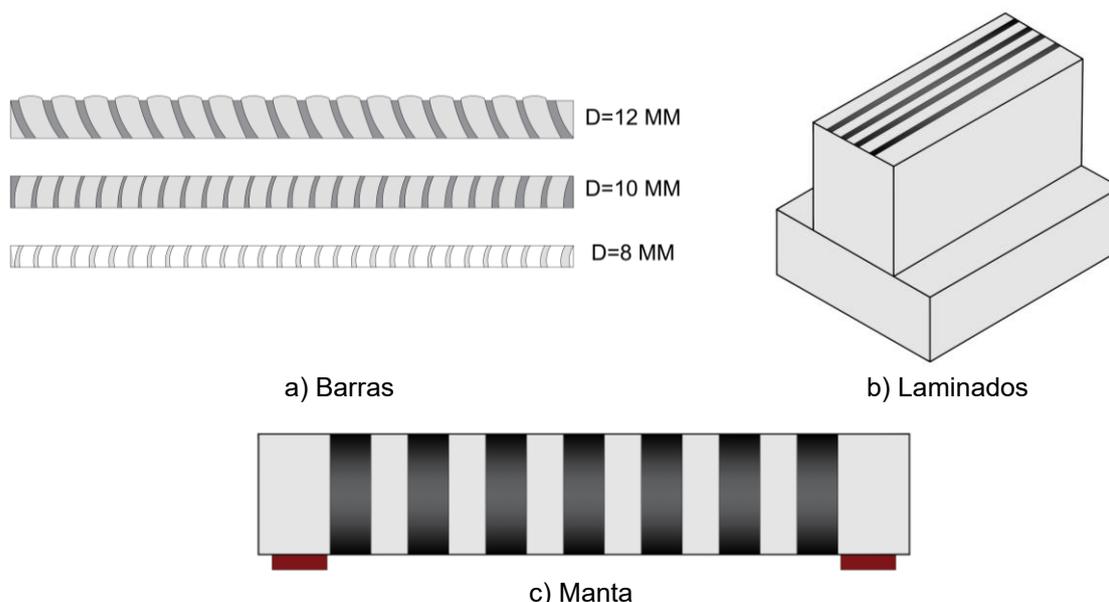


Figura 2.8 - Diferentes usos do PRFC's (Adaptado de Ke *et al.*, 2023).



Sen (2015) ressalta que os laminados de PRFC são fabricados por um processo conhecido como pultrusão, formado a partir de fios de fibra impregnados em resina, sendo moldadas para o formato desejado. Assim, a rigidez e resistência também são equivalentes a múltiplas fibras, sendo ideal para o reforço em diferentes estruturas.

Diversos estudos são realizados para entender o comportamento do reforço em diferentes situações, como a exposição a altas temperaturas, ambiente marítimo, diferentes carregamentos ou em caso de sismos (Costa *et al.*, 2023; Mejia *et al.*, 2024; Huang *et al.*, 2024). As aplicações típicas desse método correspondem ao aumento na capacidade ao cisalhamento e/ou a flexão do membro, buscando evitar ou retardar falhas e prolongar a vida útil do elemento.

Considerando o reforço à flexão, Codina *et al.* (2024) ensaiou sete vigas de concreto reforçadas com laminados de 50 mm x 1,4 mm, sendo uma delas de referência. A armadura de flexão foi dividida em dois grupos, três vigas com duas barras de 8 mm e as outras três com duas barras de 10 mm. O autor destaca a melhoria significativa na capacidade a flexão das vigas, com aumento de 22% a 46,5% na capacidade de carga final.

Assad *et al.* (2024) também aplicou um reforço a flexão em vigas com vão de 2 m e 200 mm de largura, sendo a armadura principal composta por duas barras de 12 mm. As folhas de PRFC tinham 150 mm de largura e 1,6 m de comprimento. Em suas conclusões destacam um aumento na capacidade de carga de 59,4% com as folhas apenas coladas.

Segundo Siddika *et al.* (2019) o desempenho do reforço a flexão depende da taxa de armadura existente, da qualidade dos materiais, da aderência entre as tiras de PRFC e o concreto, suas dimensões e posição. A aplicação do PRFC depende da geometria do elemento, sendo mais eficaz quando distribuído ao longo da face tracionada. Além disso, existem duas técnicas principais de instalação e fixação do reforço: *Externally Bonded Reinforcement* (EBR) e *Near Surface Mounted Reinforcement* (NSM).

A técnica *Near Surface Mounted Reinforcement* (NSMR) é baseada no posicionamento da fibra em rasgos abertos previamente e localizados no cobrimento do concreto, com a fixação realizada por adesivos epóxi (Cruz *et al.*, 2020). A fixação do reforço precisa garantir alinhamento e profundidade adequados, todos os resíduos



e poeira devem ser retirados e, após a fixação do reforço, deve ser retirado o excesso de material epoxídico, como demonstrado na Figura 2.9 (Silva, 2013).

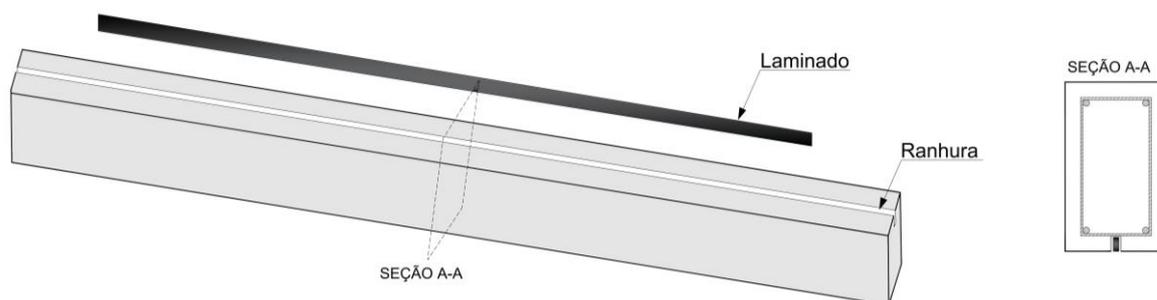


Figura 2.9 - Técnica *Near Surface Mounted* (Adaptado de Rezazadeh e Barros, 2015)

Já a técnica de reforço utilizando *Externally Bonded Reinforcement* (EBR) consiste na colagem de manta/laminado de PRFC nas faces externas do elemento, com auxílio da aplicação de uma resina epóxi. A aplicação pode ser de maneira completa, envolvendo a seção transversal do elemento, apenas nas superfícies laterais ou em formato de “U”, quando se tratando de mantas, como ilustrado na Figura 2.10 (Navaratnam *et al.*, 2023). Azevedo *et al.* (2022) destacam que, apesar das inúmeras vantagens, deve-se atentar aos típicos modos de ruptura e à necessidade de sistemas de ancoragem que garantam a plena utilização da capacidade de reforço, sendo este o método utilizado para o desenvolvimento deste estudo.

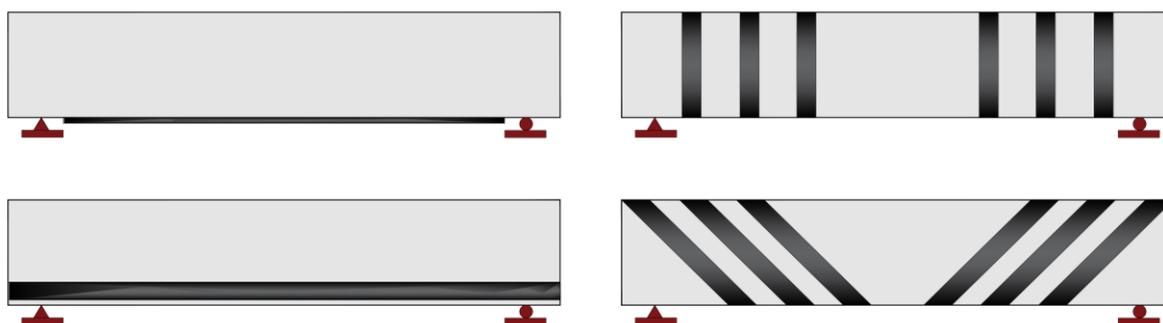


Figura 2.10 - Técnica *Externally Bonded* (Adaptado de Kotynia *et al.*, 2021).

Segundo Siddika (2020), os modos de ruptura predominantes nos sistemas EBR são o descolamento do laminado, ruptura das tiras de PRFC e esmagamento do concreto. Além disso, as ligações entre cada um dos componentes do sistema representam zonas de potencial falha, sendo essencial uma preparação correta da superfície e do uso do material epóxi.



De acordo com Hegde *et al.* (2019), o modo de ruptura mais comum em estruturas reforçadas com colagem de PRFC é o descolamento do laminado, podendo ocorrer por meio da separação do cobrimento do concreto, descolamento da extremidade do laminado ou induzido por tensões de flexão e cisalhamento, conforme ilustrado na Figura 2.11.

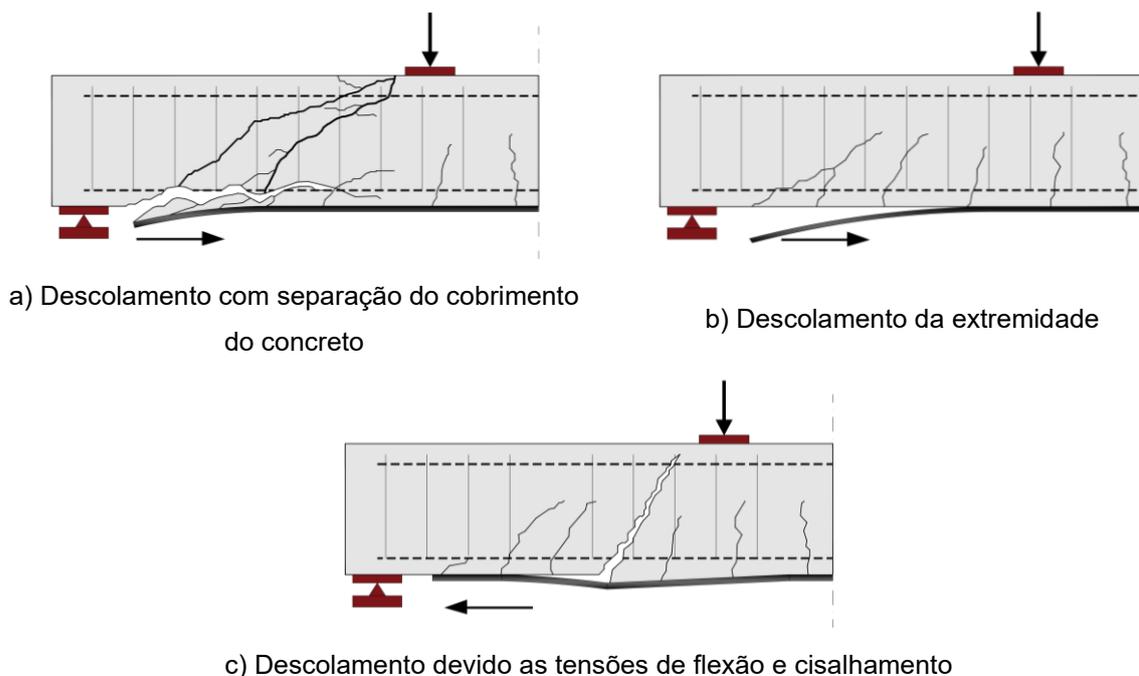


Figura 2.11 - Mecanismos de falha por descolamento (Adaptado de Buyukozturk *et al.*, 2006).

A separação do cobrimento do concreto ocorre quando a resistência a tração do concreto for menor que a aderência da interface concreto-adesivo. Já o descolamento da extremidade do laminado acontece quando há perda de aderência na interface ou pela preparação ineficaz da superfície.

Já a ruptura da manta/laminado de PRFC ocorre quando há boa resistência entre a ligação concreto-adesivo, utilização correta da tensão e da deformação da fibra, demonstrado na Figura 2.12. Conforme Siddika *et al.* (2019), o uso de múltiplas camadas da manta/laminado pode diminuir a possibilidade de uma ruptura frágil da fibra, em níveis menores que sua tensão efetiva.

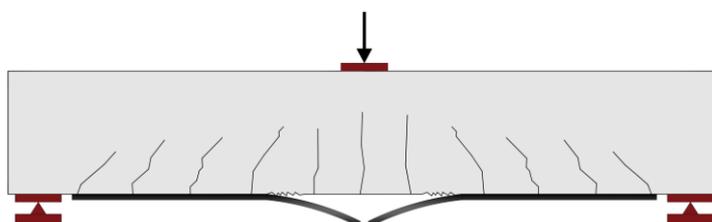


Figura 2.12 - Falha por ruptura do PRFC (Adaptado de Morgam, 2015).



Conforme Spadea *et al.* (2015), para evitar o modo de ruptura principal, é recomendado o uso de ancoragens externas para melhorar a resistência ao descolamento. Nesse sentido, o uso de sistemas de ancoragem tem como objetivo principal prevenir ou retardar essa ruptura prematura, melhorando a eficiência global do sistema reforçado. Sua utilização depende da geometria do elemento e da presença de uma zona crítica, permitindo uma melhor transferência de tensões para o PRFC (Kalfat *et al.*, 2018).

Segundo Grelle e Sneed (2013) e Wang *et al.* (2020), diversas soluções e metodologias foram estudadas para evitar o descolamento precoce do laminado, sendo os principais métodos de ancoragem: FRP *Spike*, U-Jackets, π -Anchor, Self-Locking, *U-Wrap*, ancoragem com parafusos (*Mechanically Fastened*), ancoragem com chapa de aço e parafusos (Hybrid Bonded), e ancoragem com aumento de seção e colagem transversal.

2.3.1. FRP Spike

Também conhecida como espigão, consistem em diversas fibras soltas agrupadas ou em uma folha de fibra enrolada, formando uma configuração em leque, com uma das extremidades inserida no elemento estrutural (pino) e a outra espalhada na folha de PRFC (leque). O pino pode ser embutido no concreto em diferentes angulações e os ventiladores podem variar em quantidade e configuração, podendo ser em gravata borboleta, de extremidade única ou de duas extremidades, como demonstrado na Figura 2.13 (Muciaccia *et al.*, 2022).

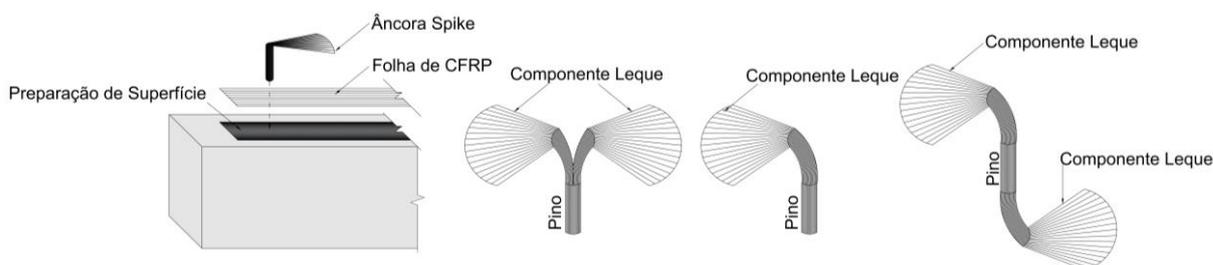


Figura 2.13 - FRP Spike (Adaptado de Sun *et al.*, 2020; Muciaccia *et al.*, 2022).

Assad *et al.* (2024) utilizou o sistema FRP *Spike* em vigas de concreto armado, considerando um vão de 2 metros e uma seção de 20 x 25 cm. Foram utilizadas diferentes configurações e tamanhos, resultando em um aumento na capacidade de



carga entre 60-104% em relação a amostra de referência, sem reforço, e de 14-28% quando comparadas as vigas reforçadas apenas com PRFC colado. Resultados positivos também foram apresentados por Abdalla *et al.* (2022), com um programa experimental composto por seis vigas T e obtendo um incremento de resistência de 18% em relação a técnica EBR.

No entanto, Castillo *et al.* (2019) ressalta que, deve-se atentar aos modos de ruptura da âncora, isolando cada componente, o pino e o leque. Uma falha particular desse sistema é o descolamento do leque, que depende de sua geometria, dimensão e ligação adequada ao laminado, podendo levar a perda na capacidade de carga. Já o desempenho do pino, dependendo do seu comprimento de embutimento no concreto, pode resultar em uma ruptura do cone de concreto (Muciaccia *et al.*, 2022).

2.3.2. FRP U-Jacket

Nesse sistema, são aplicadas tiras largas de manta em formato de U nas extremidades da folha de PRFC, reduzindo uma possível falha de separação do cobrimento do concreto ou descolamento induzido por fissuras intermediárias. Seu mecanismo pode variar em relação à quantidade, largura ou inclinação das tiras e o material pode ser o mesmo utilizado no reforço, Figura 2.14. Sua principal desvantagem está na instalação em sistemas reais, considerando as dimensões do elemento e o acesso aos seus lados adjacentes (Kalfat *et al.*, 2018).

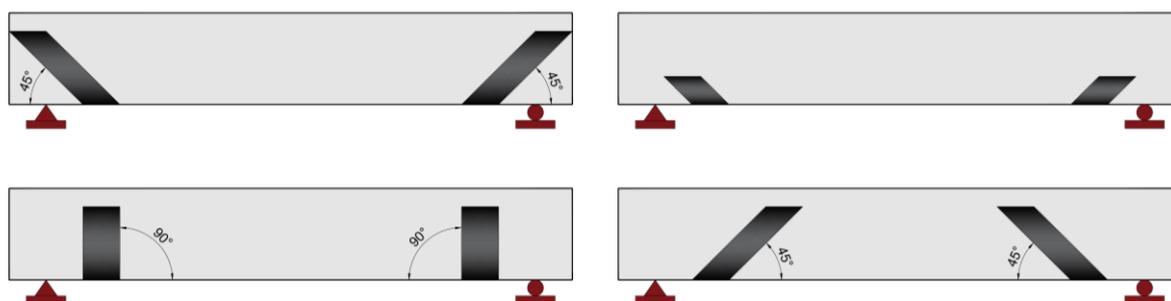


Figura 2.14 - Configuração de âncoras U-Jackets (Adaptado de Fu *et al.*, 2018).

Fu *et al.* (2017) e Fu *et al.* (2018) estudaram o efeito desse modo de ancoragem para o deslocamento do PRFC em vigas de concreto armado, utilizando uma configuração reta e com inclinações que variavam entre 45°, 90° e 135° em relação ao eixo da viga. Em seus resultados, destacam que, quando este sistema é



aplicado com ângulo de 45°, a capacidade de carga pode aumentar mais de 40% em relação a peça não reforçada, porém, com uma espessura de 400 mm de folha da âncora. Já para os ângulos de 90° e 135°, os resultados obtidos foram inferiores aos espécimes de referência. Dessa forma, conclui que sua eficiência é sensível a largura da tira e a sua altura na seção.

2.3.3. π -Anchor

Esse método de ancoragem é composto por uma placa formada integralmente de PRFC e duas pernas monolíticas, que podem ser posicionadas através ou sobre o laminado/manta. As pernas possuem 90 mm de comprimento e 10 mm de diâmetro, enquanto a placa tem 200 mm de comprimento, 50 mm de largura e 3 mm de espessura, Figura 2.15. Sua posição pode ser na extremidade da viga ou espaçadas ao longo do vão, buscando fornecer restrição ao reforço pela transferência de esforços pelo pino (Razaqpur *et al.*, 2020).

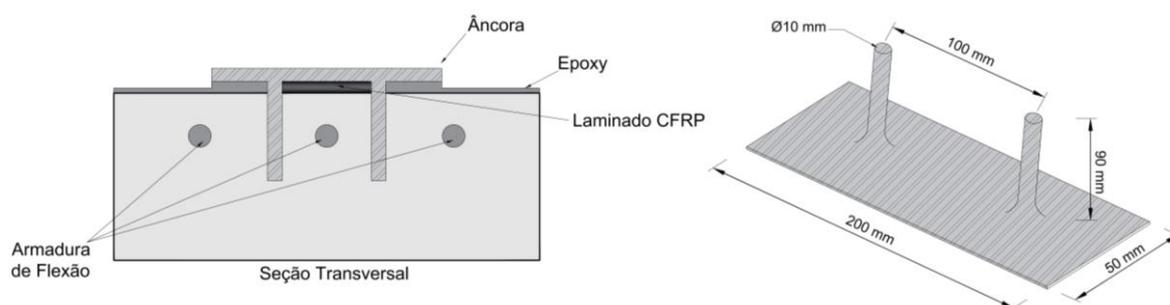


Figura 2.15 - Âncoras π -Anchor (Adaptado de Mostafa e Razaqpur, 2013).

Mostafa e Razaqpur (2013) avaliaram que o modo de ruptura e a capacidade de carga de vigas com essa ancoragem variam conforme o número de camadas do PRFC, a posição das placas ao longo do vão e seu espaçamento. Ainda segundo os autores, a utilização nas extremidades não afastou o descolamento induzido por fissuras intermediárias, obtendo melhores resultados distribuindo e espaçando das âncoras em 200 mm no vão. Além disso, a melhor eficácia foi obtida com o reforço posicionado entre as hastes.



2.3.4. Self-Locking

Denominado de auto travamento, esse método consiste em enrolar a extremidade do PRFC em torno de uma placa, através de uma ranhura pré-formada, considerando o princípio da fricção para obter um travamento automático, Figura 2.16. Em seguida, dois parafusos são utilizados para fixar as placas no concreto, permitindo maior força através de uma ancoragem mista que combina colagem e fixação (Zhou *et al.*, 2023). Apesar de compacto e de fácil instalação, as placas precisam ser bem determinadas, pois dependem da espessura e número de camadas da folha de PRFC, sendo geralmente utilizadas em reforços ultrafinos (Zhou *et al.*, 2020).

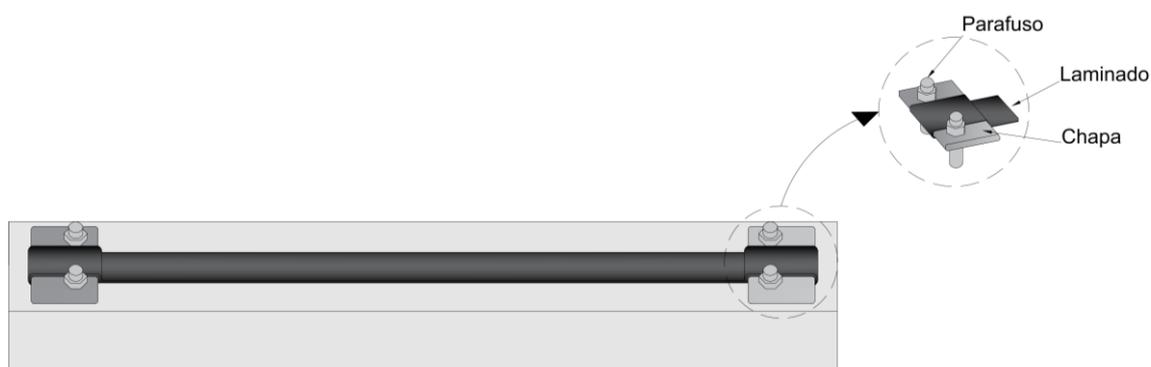


Figura 2.16 - Configuração do sistema auto travante (Adaptado de Zhou *et al.*, 2023).

Conforme He *et al.* (2023), a utilização desse sistema melhora a ductilidade e capacidade de carga das estruturas reforçadas, podendo retardar o descolamento das folhas de PRFC devido as fissuras intermediárias. Além disso, quando utilizado um tratamento de inclinação nas extremidades, é observado um maior alívio nas tensões concentradas. No entanto, deve ser realizado um cálculo otimizado das tensões interfaciais, considerando a possibilidade de arrancamento e deslizamento final.

2.3.5. FRP U-Wrap

Nessa ancoragem é utilizado um envoltório em U para fixar o material de reforço, instalados perpendicularmente à direção da força do PRFC e compostos pelo mesmo material, Figura 2.17. Suas vantagens envolvem a redução de etapas pré-operacionais, melhora no desempenho a flexão ou cisalhamento, evita ou retarda a propagação de fissuras e afasta a ruptura por descolamento do reforço. Alguns



parâmetros de projeto alteram o seu desempenho, como largura, espessura, módulo de elasticidade e sua distribuição ao longo do elemento (Al-Saawani *et al.*, 2024).

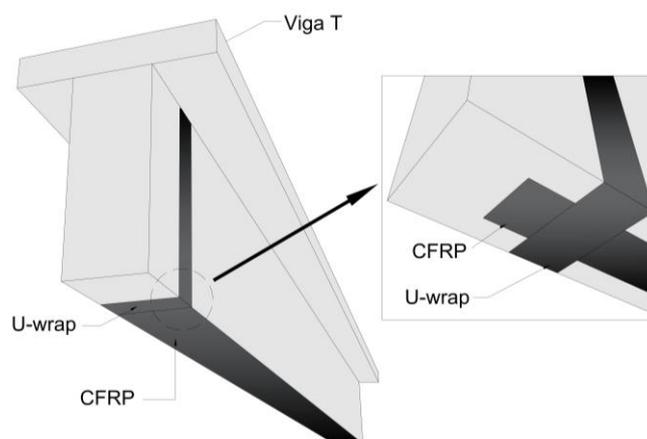


Figura 2.17 - Aplicação do sistema de ancoragem U-Wrap (Adaptado de Lee e Lopez, 2020).

À medida que o elemento é carregado, as tensões de reação do envoltório U começam a atuar sobre a superfície, conhecido como efeito de confinamento, e geram tensões de atrito. Conforme o deslizamento entre o PRFC e o concreto aumentam, o efeito desse atrito também cresce, aumentando a tensão máxima de descolamento. Dessa forma, o comportamento à fricção entre as superfícies é um fator determinante para sua capacidade de ancoragem (Raheem e Rasheed, 2021).

Abdalla *et al.* (2023) obteve um aumento de 36% na capacidade de carga com a aplicação de envoltórias em U em vigas de concreto, utilizadas na extremidade e com largura de 200 mm. No entanto, é importante fornecer uma área mínima para garantir a prevenção da falha por descolamento, assim como, em quantidades e espaçamentos adequados, considerando a distribuição das tensões.

2.3.6. Mechanically Fastened

Um dos métodos de ancoragem é fixação mecânica (*Mechanically Fastened*) através de âncoras de aço parafusadas ao substrato do concreto, atravessando o laminado/manta multidirecional, Figura 2.18. Suas principais vantagens são a rapidez na instalação, leveza dos materiais, maior rigidez e prevenção na delaminação da fibra. Além disso, não requer grandes preparações da superfície, permitindo uma instalação imediata na estrutura (Realfonzo *et al.*, 2013).



As ancoragens podem ser dispostas na extremidade, ao longo do vão, de maneira simétrica ou assimétrica. Dessa forma, os parâmetros geométricos são decisivos para a eficiência da âncora, assim como, o diâmetro do furo do parafuso, espessura e largura do laminado, distâncias entre si e com as bordas. Ademais, o uso de arruelas é importante para garantir uma melhor distribuição de pressão na interface da junta, quando aplicado um torque de aperto adequado (Kashaba, 2023).

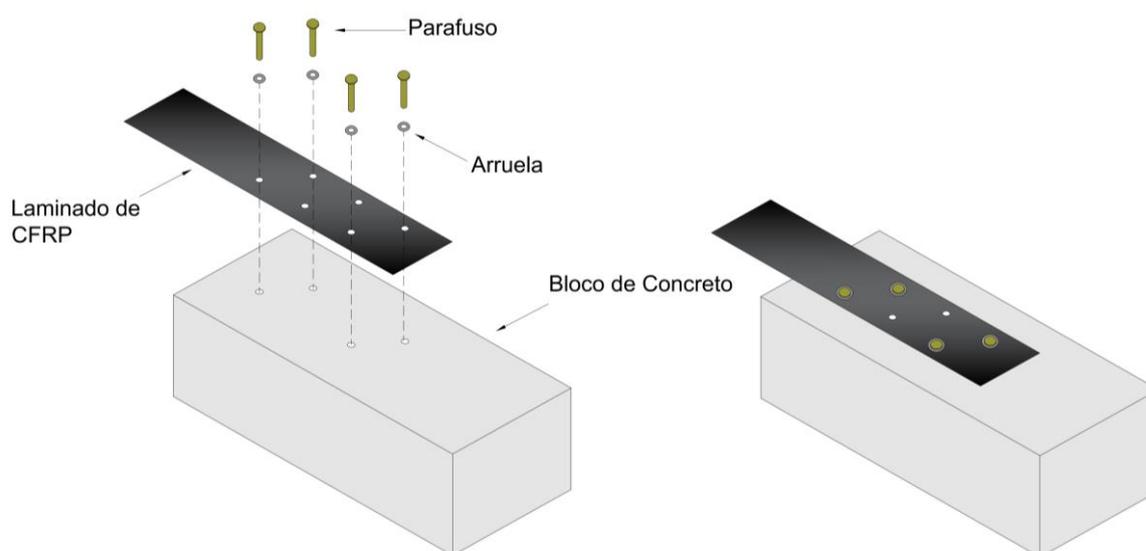


Figura 2.18 - Configuração da ancoragem mecânica com parafuso (Adaptado de Realfonzo *et al.*, 2013).

Segundo Zhang *et al.* (2021) e Xiaohe e Chao (2024), uma maior atenção deve ser direcionada para a quebra na continuidade da fibra, que pode gerar uma maior concentração de tensões em torno do furo, facilitando a propagação de microfissuras. Kim *et al.* (2021) descreve quatro modos de falha para esse tipo de fixação mecânica: ruptura na área líquida, quando o diâmetro do furo deixa uma distância insuficiente até a borda do laminado ou em baixa resistência a tração do reforço; ruptura por cisalhamento, ocorre em um sistema com pouca distância da borda livre; falha por esmagamento, quando é aplicada uma pressão local ao parafuso; ruptura por segmentação, pode ocorrer na concentração de altas tensões na ponta e na borda livre do furo (Figura 2.19).



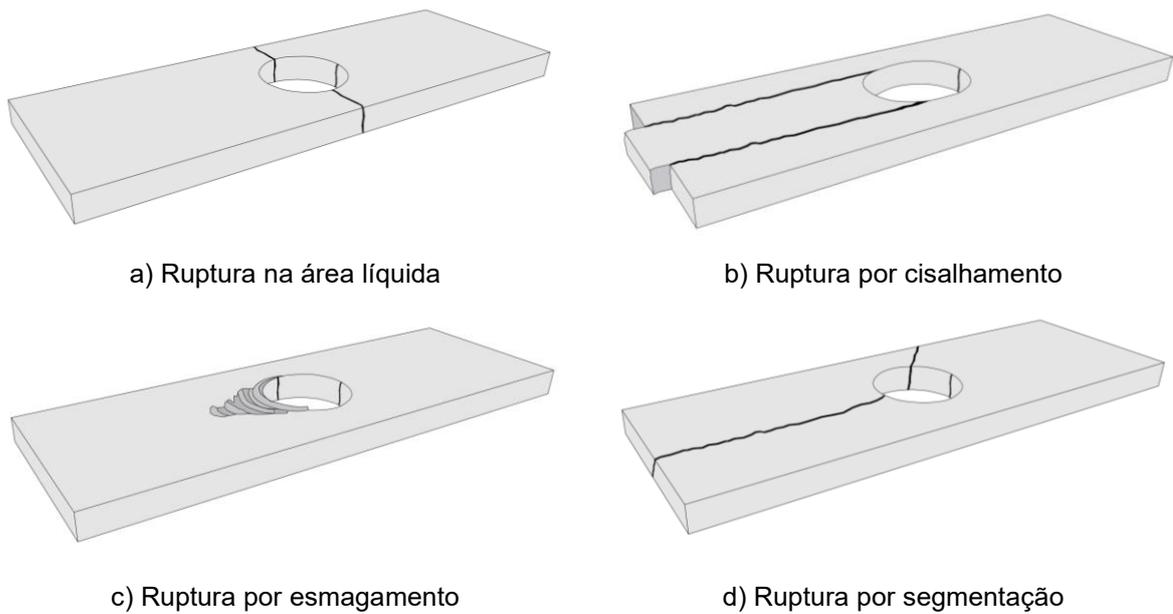


Figura 2.19 - Modos de falha de ancoragem com parafusos (Adaptado de Kim *et al.*, 2021).

2.3.7. Hybrid Bonded

Esse método é baseado na utilização de âncoras compostas por chapas de aço e parafusos, utilizadas sobre a folha/laminado de PRFC, Figura 2.20. Segundo Wu e Huang (2008), a capacidade de carga de uma viga reforçada com ligação híbrida pode ser 7,5 vezes maior que quando utilizado apenas a colagem (EBR). Gao *et al.* (2023) ainda comenta que alguns fatores são decisivos para a eficiência desse método, como o espaçamento entre as âncoras, o padrão de distribuição e a sua ligação com o PRFC.

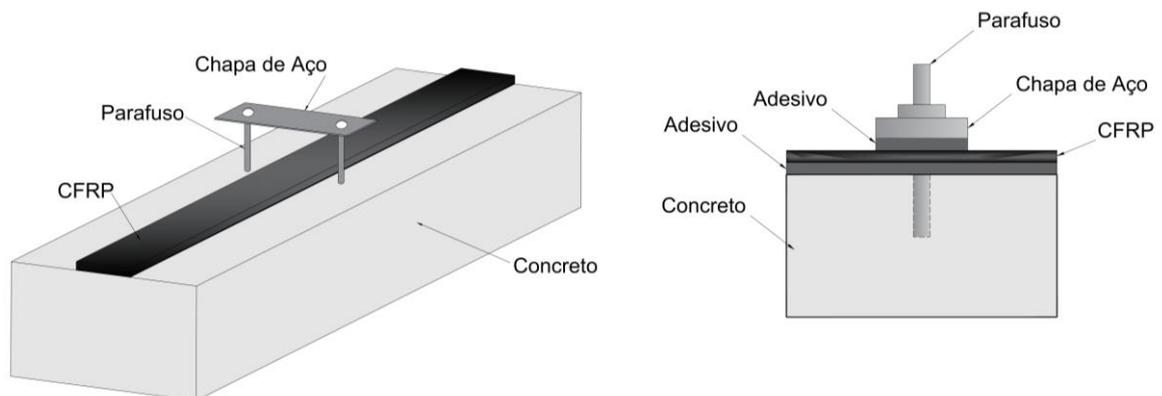


Figura 2.20 - Mecanismo da ligação híbrida (Adaptado de Chen *et al.*, 2019).



Zhang *et al.* (2021) comenta que a placa de aço deve ser maior que a largura do PRFC, o embutimento dos parafusos no concreto deve ser superior ao cobrimento da peça e deve ser realizado um cálculo para o número e espaçamento dos fixados, Figura 2.21. Chen *et al.* (2019) testou este sistema de ancoragem em dez vigas de concreto armado, ensaiadas sobre flexão de quatro pontos e variando o número de camadas de PRFC, obtendo um aumento na carga máxima de 26% para uma camada de laminado e até 75% para quatro camadas.

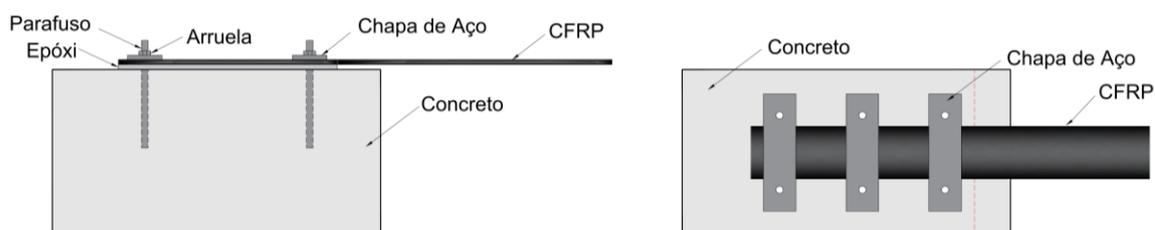


Figura 2.21 - Mecanismo da ligação híbrida (Adaptado de Liu *et al.*, 2023).

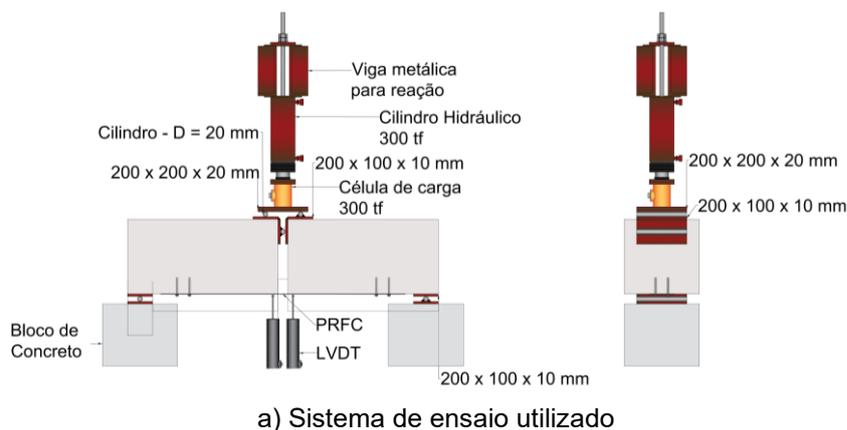
Wu *et al.* (2011) em seu programa experimental composto por vinte vigas de concreto armado, verificou que o número de camadas de PRFC e a taxa de armadura de flexão tem influência superior na capacidade de carga final, em comparação as variações de espaçamento das âncoras. Ainda segundo o autor, o modo de ruptura mudou de desprendimento da folha, para ruptura do PRFC, permitindo capacidade otimizada na utilização do reforço.

2.3.8. Ancoragem com Colagem Transversal

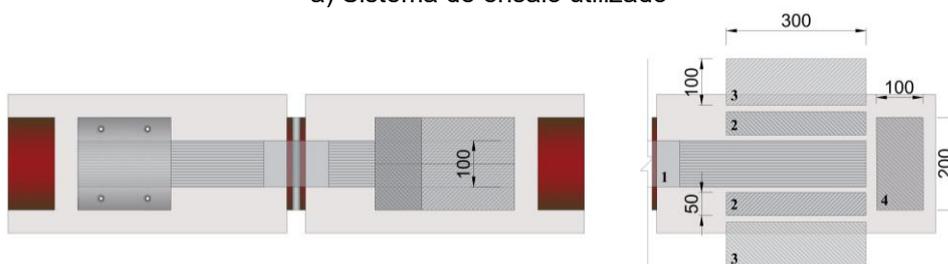
Abrantes *et al.* (2024) analisou experimentalmente o sistema de ancoragem com colagem transversal de laminados através do *Pull-Bending-Test*, que consiste na utilização de dois blocos de concreto unidos por uma junta rotulada de aço, no centro do vão. Como os blocos não possuem conexão entre si, a força de tração aplicada foi diretamente resistida pelo reforço.

O sistema consiste em três etapas principais: a primeira o aumento da seção, a segunda com a sobreposição de camada, e a terceira com colagem transversal. Os espécimes obtiveram um incremento de resistência de 66,7%, em relação ao modelo de referência, com laminado apenas colado. A Figura 2.22 demonstra o sistema de ensaio utilizado e as características desse sistema de ancoragem.





a) Sistema de ensaio utilizado



b) Características do sistema de ancoragem

Figura 2.22 – Sistema de ensaio com colagem transversal (Adaptado de Abrantes et al., 2024).

2.4. Consolos Reforçados com PRFC

2.4.1. Mohamad-Ali e Attiya (2012)

Os autores desenvolveram um estudo que teve por objetivo avaliar consolos reforçados com mantas de fibra de carbono, com variação na quantidade e altura das tiras. O programa experimental foi composto por oito espécimes, sendo uma de referência, quatro com colagem apenas nas faces e três com o envolvimento total do elemento (Full Wrap). Todos os modelos possuíam a mesma geometria, com uma projeção de 200 mm, altura de 150 mm e largura de 150 mm. A armadura de flexão foi composta por duas barras com bitola 12,7 mm. Um resumo das principais características é apresentado na Tabela 2.1 e ilustrado na Figura 2.23.



Tabela 2.1 - Características do programa experimental de Mohamad-Ali e Attiya, (2012)

Consolo	a/d (mm)	fc (MPa)	As (mm ²)	hf (mm)	tf (mm)	n ^o Camadas	n ^o Tiras	Pu (kN)	Modo de Ruptura
CONT1	0,700	47,57	253,35	-	-	-	-	292	Cisalhamento
CHS2	0,700	47,57	253,35	36	0,131	1	2	335	Cisalhamento
CHS3	0,700	46,56	253,35	18	0,131	1	3	370	Cisalhamento
CHS4	0,700	46,56	253,35	18	0,131	1	4	347	Cisalhamento
CHSR1	0,700	43,00	253,35	72	0,131	1	1	348	Cisalhamento
CHSR2	0,700	46,07	253,35	36	0,131	1	2	340	Cisalhamento
CHSR3	0,700	46,07	253,35	18	0,131	1	3	383	Cisalhamento
CHSR4	0,700	43,16	253,35	18	0,131	1	4	353	Cisalhamento

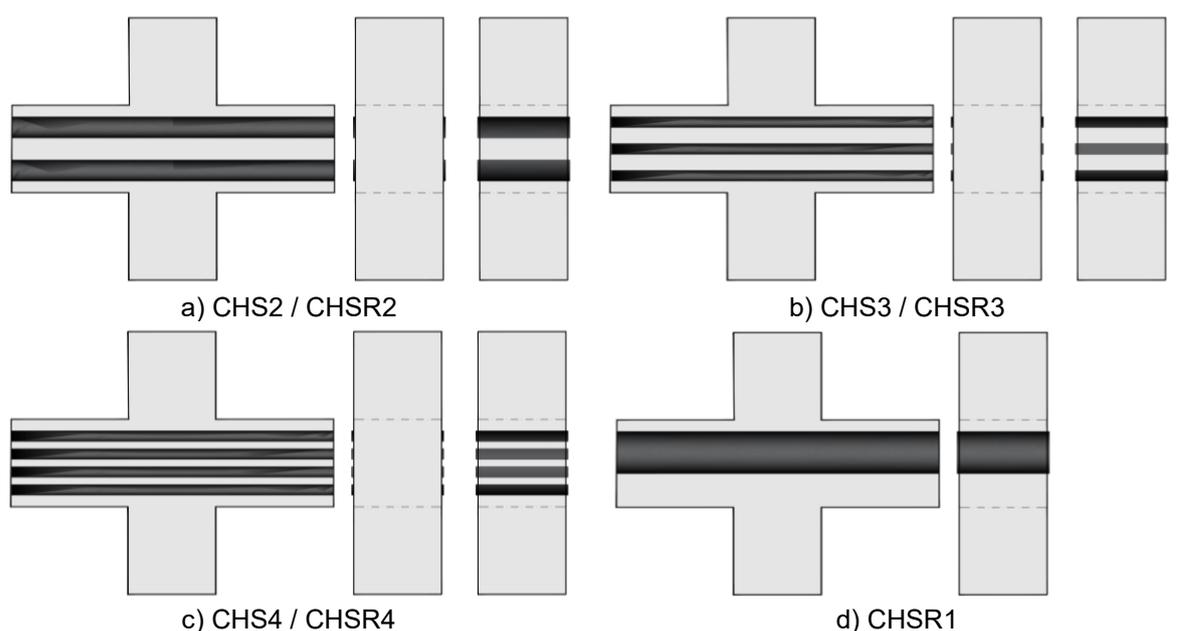


Figura 2.23 - Configuração dos consolos reforçados (Adaptado de Mohamad-Ali e Attiya, 2012)

O incremento de resistência variou entre 14,7% e 31,2%, com os melhores resultados para consolos reforçados com três tiras, principalmente aquele com envolvimento total, os valores detalhados são ilustrados na Figura 2.24, sendo representado pela linha vermelha o resultado do consolo de referência. Todos os modelos romperam por ruptura do PRFC, causada por fissuras diagonais que iniciaram na interface entre o consolo e o pilar. Os autores ainda destacam o efeito significativo na carga de primeira fissura, com um aumento de 18,75%, e diminuição na largura das fissuras de 24,3%.



Mohamad-Ali e Attiya (2012)

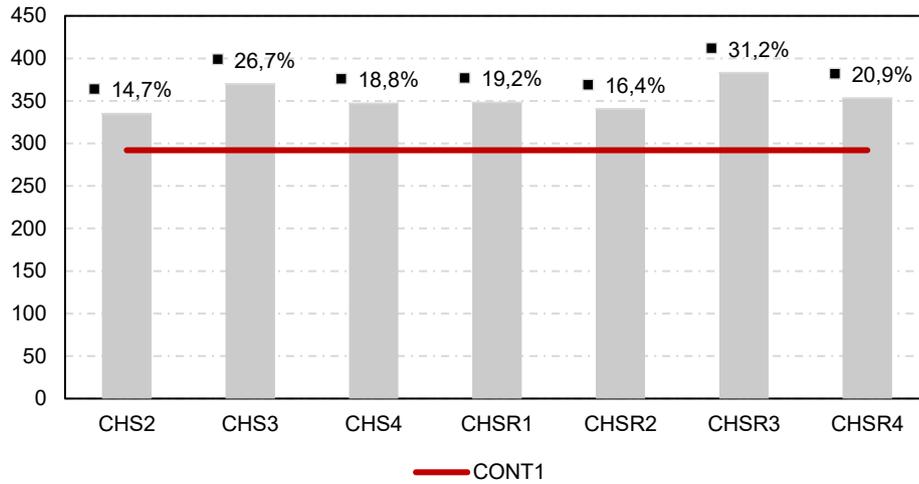


Figura 2.24 – Incremento de resistência em relação ao consolo referência

2.4.2. Ivanova *et al.* (2015)

Foram avaliados consolos reforçados com manta de fibra de carbono. Seu programa experimental foi constituído por oito espécimes, sendo um de referência, três com reforço nas duas faces e quatro com envolvimento total do consolo, ambos os grupos com variação no número de camadas. Os modelos possuíam uma geometria com projeção de 200 mm, altura total de 360 mm e largura de 150 mm. A armadura de flexão foi composta por duas barras de 10 mm, sendo apresentado as características gerais na Tabela 2.2 e a demonstração do reforço na Figura 2.25.

Tabela 2.2 - Características do programa experimental de Ivanova *et al.*, (2015)

Consolo	a/d (mm)	f_c (MPa)	A_s (mm ²)	hf (mm)	tf (mm)	n ^o Camadas	n ^o Tiras	Pu (kN)	Modo de Ruptura
CO	0,448	33,20	157,08	-	-	-	-	357	Cisalhamento
CP1u	0,448	33,20	157,08	150	1,000	1	1	532	Ruptura da manta
CP2u	0,448	33,20	157,08	150	1,000	2	1	552	Descolamento
CP3u	0,448	33,20	157,08	150	1,000	3	1	380	Descolamento
CB1u	0,448	33,20	157,08	150	1,000	1	1	488	Ruptura da manta
CB2u	0,448	33,20	157,08	150	1,000	2	1	508	Cisalhamento
CB3u	0,448	33,20	157,08	150	1,000	3	1	651	Cisalhamento
CB5u	0,448	33,20	157,08	150	1,000	5	1	626	Cisalhamento



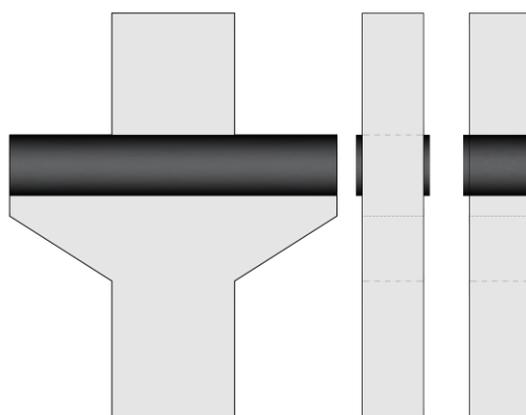


Figura 2.25 – Configuração dos consolos reforçados (Adaptado de IVANOVA *et al.*, 2015)

O aumento na capacidade resistente foi de 6,4% a 82,4%, com maiores valores obtidos no envolvimento total do elemento e reforçados com 3 e 5 camadas de manta, ilustrados na Figura 2.26. Os consolos com reforço colado nas duas faces apresentaram dois modos de falha, em um deles foi verificado a ruptura do PRFC e nos dois restantes o descolamento foi predominante. Já nos modelos com envolvimento total, apenas aquele com uma camada apresentou ruptura no PRFC, os demais elementos falharam na compressão, apresentando fissuras típicas de cisalhamento. Os autores complementam o aumento na rigidez da estrutura e o acréscimo de carga para primeira fissura de 1,5 vezes.

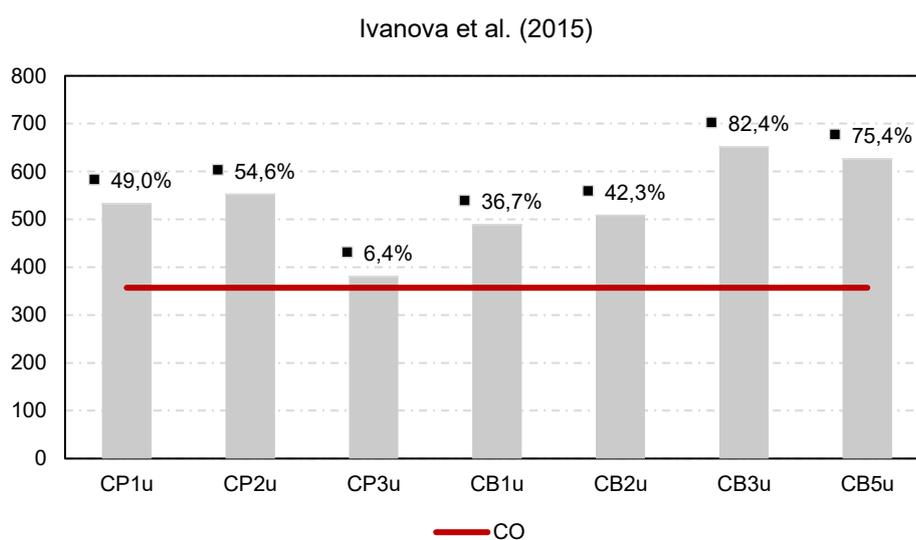


Figura 2.26 – Incremento de resistência em relação ao consolo referência



2.4.3. Shadhan e Kadhim (2015)

Nesse programa experimental foram reforçados doze consolos com manta de fibra de carbono. As variáveis presentes envolviam o envolvimento total do elemento, o número de tiras, o número de camadas e dois deles possuíam particularidades, um com tiras na horizontal e vertical e outro com um método de ancoragem composto pela fixação de parafusos sobre a manta. A geometria era de 200 mm na projeção do consolo, altura de 190 mm e largura de 150 mm. A armadura de flexão de todos os espécimes foi constituída por duas barras de 10 mm. As características gerais são apresentadas na Tabela 2.3 e na Figura 2.27.

Tabela 2.3 – Características do programa experimental de Shadhan e Kadhim (2015)

Consolo	a/d (mm)	f_c (MPa)	A_s (mm ²)	hf (mm)	tf (mm)	n ^o Camadas	n ^o Tiras	Pu (kN)	Modo de Ruptura
CON1	0,625	32,5	157,08	-	-	-	-	211	Cisalhamento
CON2	0,625	32,5	157,08	-	-	-	-	242	Cisalhamento
H1P	0,625	32,5	157,08	40	0,131	1	1	265	Descolamento
H2P	0,625	32,5	157,08	40	0,131	1	2	280	Descolamento
H3P	0,625	32,5	157,08	40	0,131	1	3	270	Descolamento
H1F	0,625	32,5	157,08	40	0,131	1	1	284	Descolamento
H2F	0,625	32,5	157,08	40	0,131	1	2	305	Descolamento
H3F	0,625	32,5	157,08	40	0,131	1	3	298	Ruptura da manta
H2A	0,625	32,5	157,08	40	0,131	1	2	294	Descolamento
2H2F	0,625	32,5	157,08	40	0,131	2	2	302	Descolamento
3H2F	0,625	32,5	157,08	40	0,131	3	2	312	Descolamento
H3V6F0	0,625	32,5	157,08	40	0,131	1	3	374	Ruptura da manta

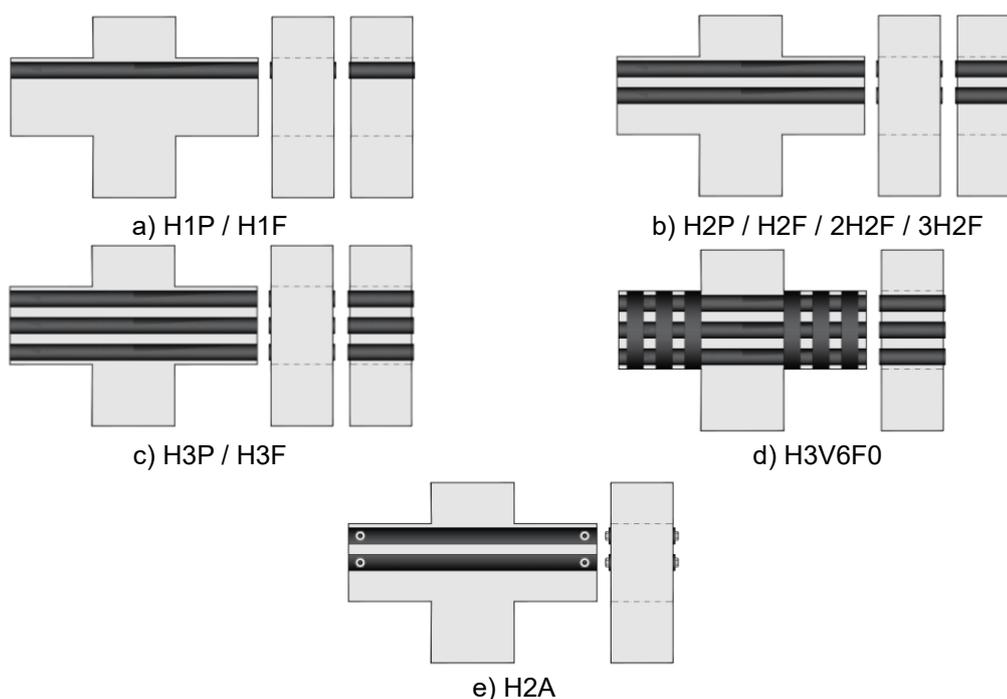


Figura 2.27 – Configuração dos consolos reforçados (Adaptado de Shadhan e Kadhim, 2015)



O aumento na resistência variou entre 17,0% e 65,1%, sendo este último obtido no reforço composto por manta na horizontal e vertical, um resumo dos valores de incremento são demonstrados na Figura 2.28. O modelo reforçado com ancoragem de parafusos (H2A) obteve um incremento de 29,8%. O modo de ruptura predominante foi de descolamento do PRFC, a ruptura da manta foi verificada apenas nos modelos H3F e H3V6F0.

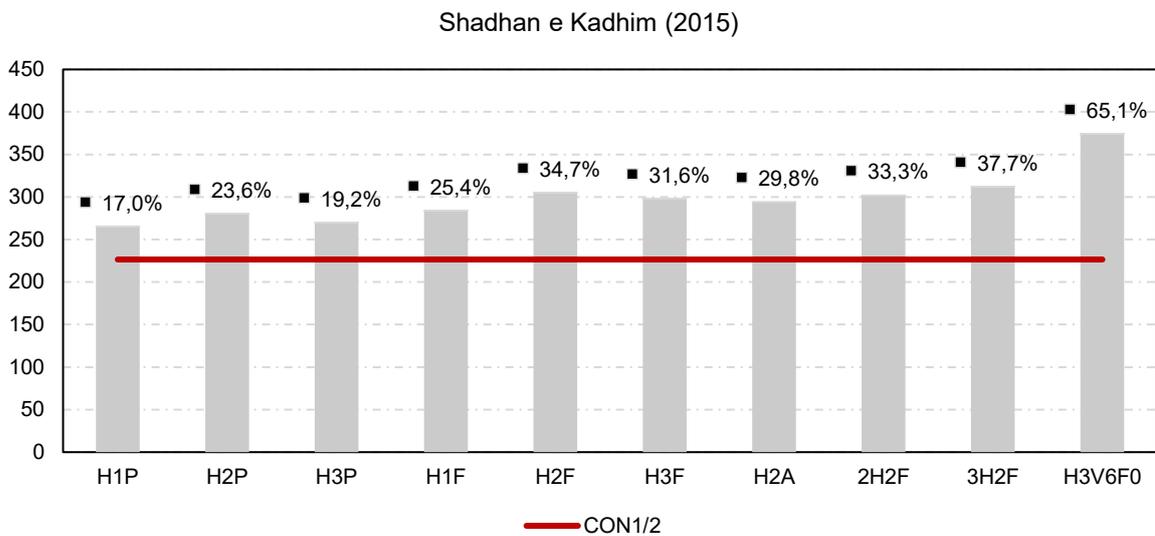


Figura 2.28 – Incremento de resistência em relação ao consolo referência

2.4.4. Al-Kamaki *et al.* (2018)

Foram verificados oito consolos reforçados com manta de fibra de carbono, buscando verificar a influência de estribos horizontais na capacidade resistente. O programa experimental foi composto por quatro consolos de referência, sendo dois com estribos horizontais e dois sem, e quatro com reforço, possuindo a mesma variável. O consolo possuía uma geometria composta por uma projeção de 200 mm, altura de 150 mm e largura de 150 mm. A armadura principal foi composta por duas barras de 10 mm e os estribos horizontais com barras de 12 mm. Na Tabela 2.4 é apresentado um resumo das principais características do programa experimental, assim como, a ilustração do reforço é demonstrado na Figura 2.29.



Tabela 2.4 – Características do programa experimental de Al-Kamaki et al. (2018)

Consolo	a/d (mm)	f_c (Mpa)	As (mm ²)	hf (mm)	tf (mm)	n ^o Camadas	n ^o Tiras	Pu (Kn)	Modo de Ruptura
CN-WO	0,846	25	157,08	-	-	-	-	90,65	Flexão
CN-WO	0,846	25	157,08	-	-	-	-	90,65	Flexão
CN-W	0,846	25	157,08	-	-	-	-	95,45	Flexão
CN-W	0,846	25	157,08	-	-	-	-	95,45	Flexão
HOR-WO	0,846	25	157,08	150	0,131	1	1	104,25	Ruptura da manta
HOR-WO	0,846	25	157,08	150	0,131	1	1	104,25	Ruptura da manta
HOR-W	0,846	25	157,08	150	0,131	1	1	115,10	Ruptura da manta
HOR-W	0,846	25	157,08	150	0,131	1	1	115,10	Ruptura da manta

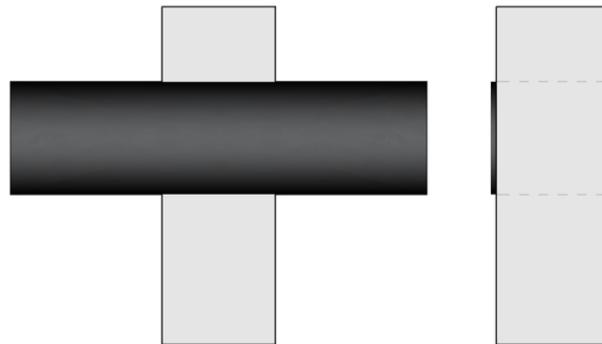


Figura 2.29 – Configuração dos consolos reforçados (Adaptado de Al-Kamaki et al., 2018)

O aumento na capacidade resistente foi 15,0% para os consolos sem estribos horizontais e de 20,6% na presença dos estribos, demonstrados na Figura 2.30. Foi observado que todos os modelos reforçados falharam por ruptura da manta, e demonstraram resultados favoráveis para limitação do alargamento e crescimento das fissuras.

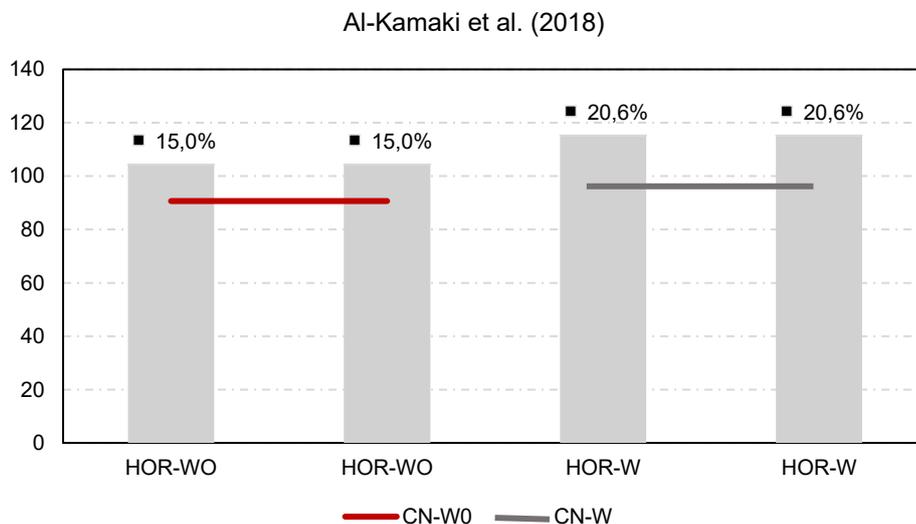


Figura 2.30 – Incremento de resistência em relação ao consolo referência

Escaneie a imagem para verificar a autenticidade do documento

Hash SHA256 do PDF original ee2dba1ceb080d85bfff576009081085495b1a73f3c9dead0aba183dba84ee01
<https://valida.ae/6058f61deb053cfbe4798933cc263396af04cecdad2ecb69>



2.4.5. Abdulqader *et al.* (2018)

Foi realizado um programa experimental com seis consolos de concreto, sendo um de referência e cinco reforçados com manta de fibra de carbono. Os modelos variavam pela quantidade de tiras coladas nas faces, com apenas um deles possuindo envolvimento total (C1H3W). A geometria retangular dos consolos era de uma projeção com 250 mm, altura de 250 mm e largura de 150 mm. A armadura de flexão foi composta três barras de 12 mm e todos possuíam estribos horizontais. Na Tabela 2.5 e na Figura 2.31 são detalhadas as principais particularidades do programa experimental.

Tabela 2.5 – Características do programa experimental de Abdulqader *et al.* (2018)

Consolo	a/d (mm)	f_c (MPa)	A_s (mm ²)	hf (mm)	tf (mm)	nº Camadas	nº Tiras	Pu (kN)	Modo de Ruptura
CONT1	0,650	30	339,29	-	-	-	-	482	Cisalhamento
C1H1F	0,650	30	339,29	40	0,166	1	1	570	Descolamento
C1H2F	0,650	30	339,29	40	0,166	1	2	600	Descolamento
C1H3F	0,650	30	339,29	40	0,166	1	3	650	Descolamento
C1H4F	0,650	30	339,29	40	0,166	1	4	660	Descolamento
C1H3W	0,650	30	339,29	40	0,166	1	3	710	Descolamento

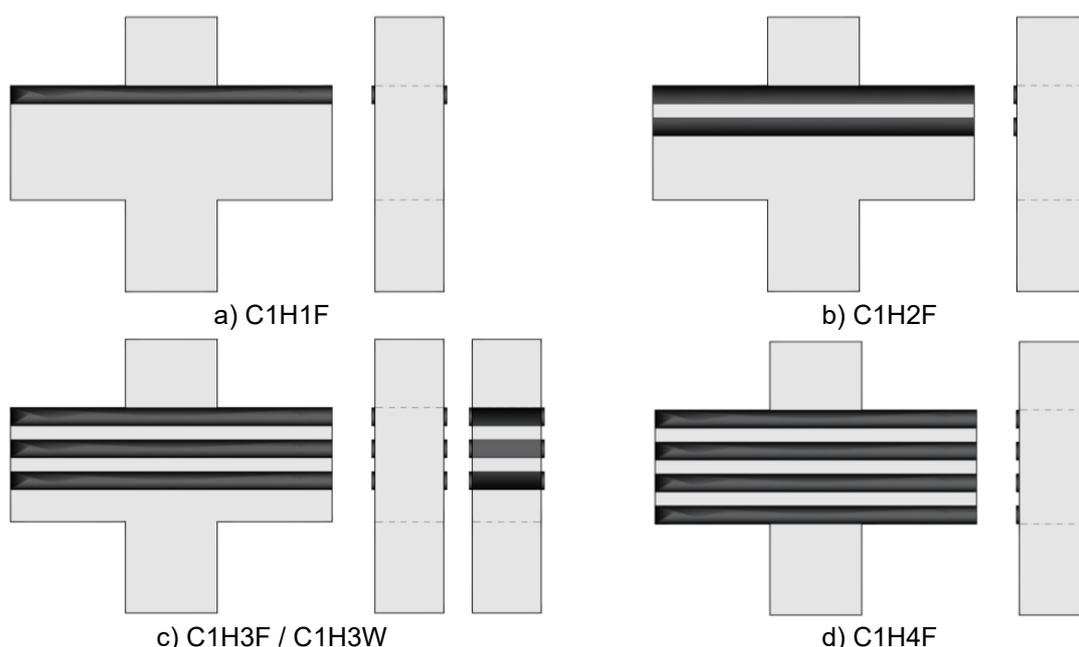


Figura 2.31 – Configuração dos consolos reforçados (Adaptado de Abdulqader *et al.*, 2018)

O incremento de resistência variou entre 18,8% e 47,9%, apresentando menor valor no consolo reforçado apenas com uma tira colocada nas duas faces e o melhor resultado para o modelo com envolvimento total, resultados apresentados na Figura



2.32. O espécime de controle rompeu por falha de cisalhamento, enquanto todos os reforçados demonstraram falha por descolamento, de forma repentina. Os autores destacam o aumento da rigidez nas amostras e maior carga de fissuração, em torno de 13%.

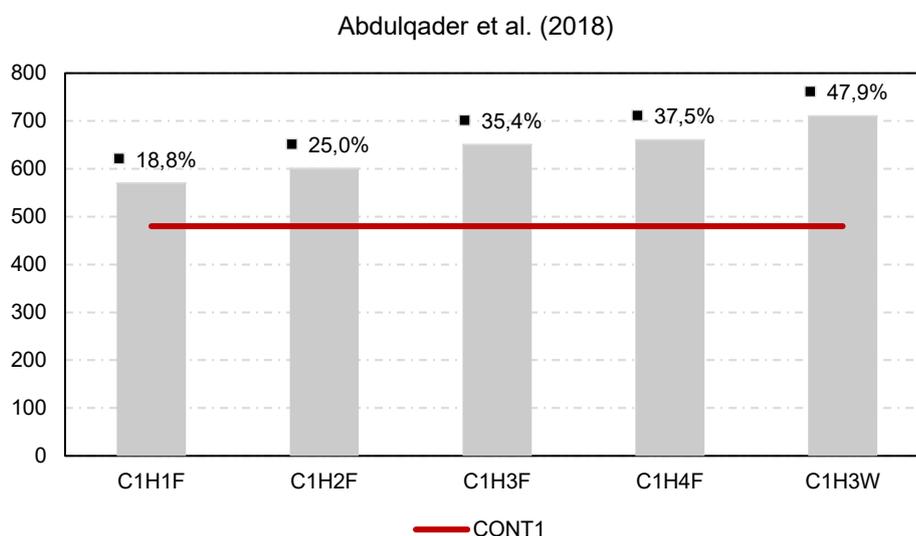


Figura 2.32 – Incremento de resistência em relação ao consolo referência

2.4.6. Abdulrahman et al. (2021)

Os autores avaliaram consolos reforçados com manta e laminado de PRFC. O programa experimental foi composto por cinco espécimes, sendo um de controle e quatro com presença de reforço. Neste estudo, foi utilizado um modelo com chapa de aço nas extremidades, correspondente ao único com laminado, no entanto, sem parafusos, apenas colagem. A geometria era composta por uma projeção de 250 mm do consolo, altura de 250 mm e largura de 150 mm. Uma de suas variáveis incluíam o uso de concreto de alta resistência, 72,59 MPa, e as armaduras de flexão eram constituídas por duas barras de 12 mm. As principais características desta verificação são mostradas na Tabela 2.6 e na Figura 2.33.

Tabela 2.6 – Características do programa experimental de Abdulrahman et al. (2021)

Consolo	a/d (mm)	f_c (MPa)	A_s (mm ²)	hf (mm)	tf (mm)	nº Camadas	nº Tiras	Pu (kN)	Modo de Ruptura
CON1	0,600	72,59	339,29	-	-	-	-	380	Cisalhamento
C1H1W	0,600	72,59	339,29	50	0,167	1	1	580	Descolamento
C1H2W	0,600	72,59	339,29	50	0,167	1	2	630	Descolamento
C1H3W	0,600	72,59	339,29	50	0,167	1	3	700	Descolamento
C1H1P	0,600	72,59	339,29	50	1,000	1	1	700	Descolamento



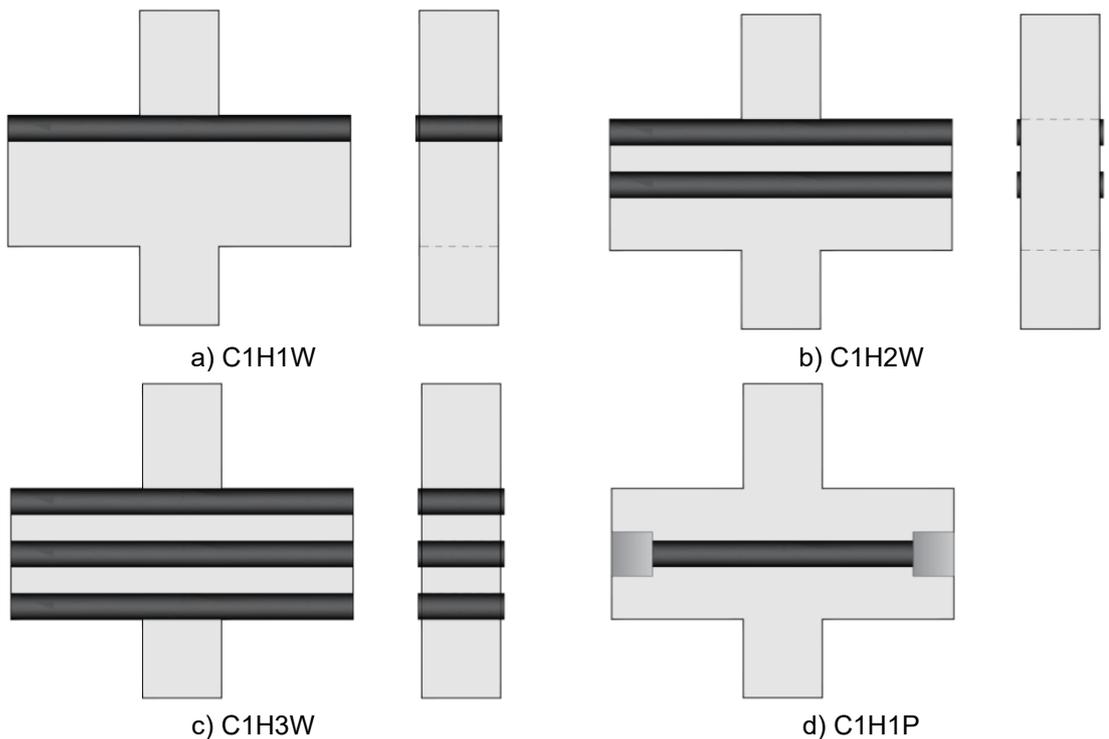


Figura 2.33 – Configuração dos consolos reforçados (Adaptado de Abdulrahman et al., 2021)

O aumento de resistência apresentou um intervalo de 52,6% a 84,2%, ilustrados na Figura 2.34. O maior valor foi para o consolo com três tiras e revestimento completo, no entanto, a mesma carga foi obtida no modelo com ancoragem, mesmo com apenas uma folha de laminado nas faces. O consolo de referência rompeu por falha na compressão, enquanto os reforçados apresentaram descolamento da manta, a partir de fissuras de cisalhamento.

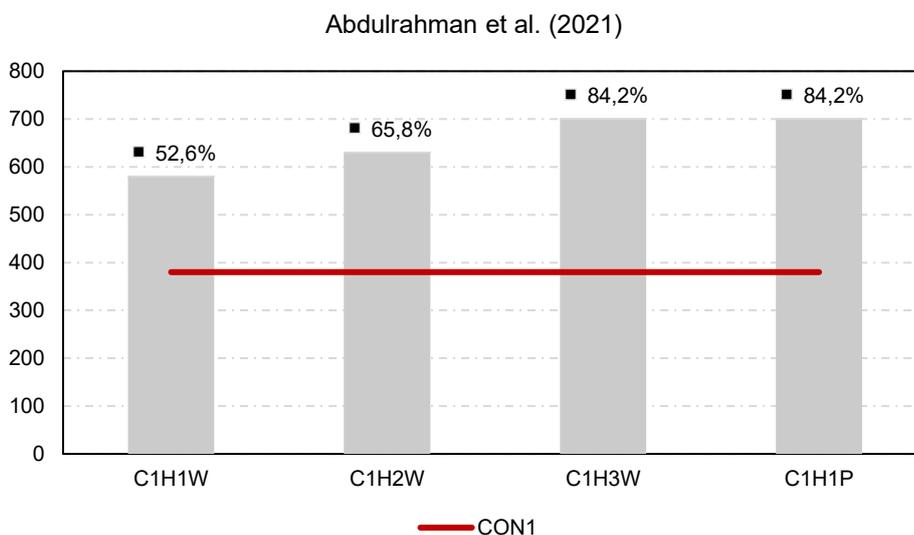


Figura 2.34 – Incremento de resistência em relação ao consolo referência



2.4.7. Discussão dos Trabalhos

Considerando os seis trabalhos apresentados envolvendo o reforço com EBR de consolos curtos de concreto, todos os modelos utilizaram a manta como material, devido a geometria e possibilidade do envolvimento total. A resistência a compressão normal utilizada nos consolos estudados variou entre 25 a 35 MPa, em sua maioria. Já a taxa de armadura de flexão de todos os ensaios ficou entre 0,2% e 1,4%. Os resultados demonstram um aumento na capacidade resistente, alcançada pelo reforço, que varia de 6% a 84%, com uma média de 36%.

Os métodos de reforço possuíam algumas variações como a espessura, o número de camadas ou a quantidade de tiras. A Figura 2.35 ilustra a relação entre o incremento de resistência e a taxa de reforço, sendo essa obtida pela razão entre a área de manta pela área de concreto dos consolos. Embora tenha sido alcançada maior resistência em alguns pontos, aumentando o número de camadas, a eficácia do reforço demonstra estar relacionada com outros fatores, como o posicionamento das tiras, aderência entre o concreto e a fibra, ou a utilização de ancoragens.

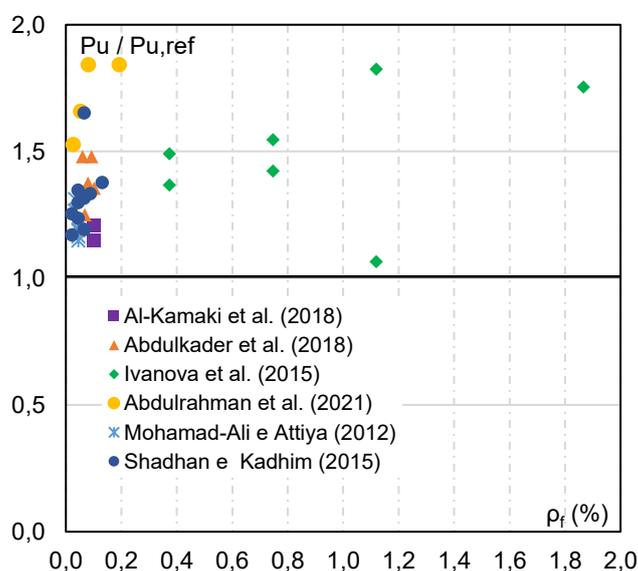


Figura 2.35 – Aumento na capacidade de carga em relação a taxa de reforço.

Realizar uma comparação direta do incremento de resistência em função de variáveis como o a/d, taxa de armadura de flexão ou resistência a compressão do concreto se mostrou pouco eficiente, devido os aspectos muito particulares de cada trabalho. A correlação deveria ser separada em diversos agrupamentos, como número



de camadas ou a posição das tiras. Devido ao pequeno espaço amostral, optou-se por não apresentar uma discussão referente a esses pontos.

Em relação aos modos de ruptura, o descolamento do PRFC foi o modo predominante das estruturas reforçadas, correspondendo a 51,4% de todos os consolos, como demonstrado na Figura 2.36a. Duas formas distintas foram identificadas, sendo uma com desprendimento na extremidade e outra com separação do cobrimento do concreto.

No caso do sistema com utilização de chapa de aço, além do deslocamento do laminado, houve o desprendimento total das chapas de aço em ambos os lados, demonstrando que a ligação com epóxi é uma possível zona de fragilidade, Figura 2.36b. O uso de parafusos, em conjunto com chapa, poderia evitar ou atrasar a falha por descolamento.

A ruptura da manta foi o segundo tipo de falha mais relatado entre os modelos estudados, exemplificado na Figura 2.37a e Figura 2.37b. Segundo Siddika et al. (2019), esse modo de falha ocorre quando há boa resistência entre a ligação concreto-adesivo, utilização otimizada da tensão e da deformação da fibra.

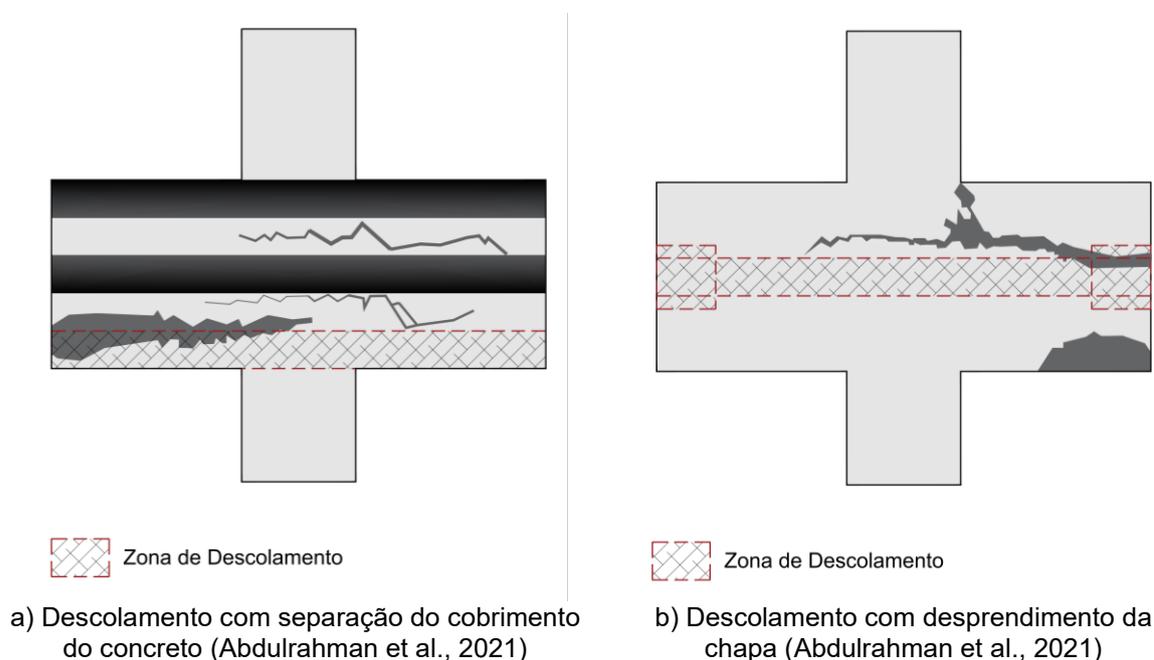
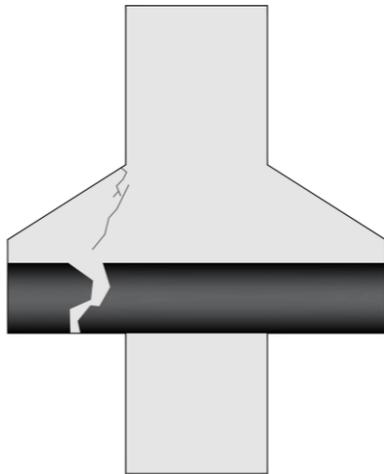
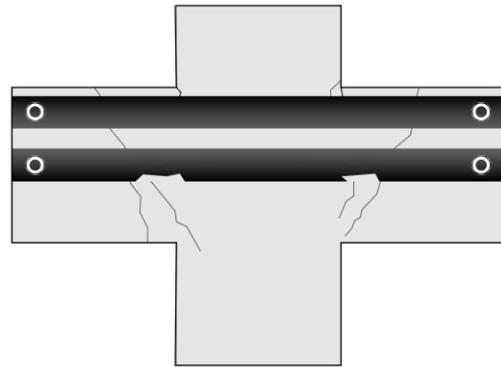


Figura 2.36 – Modos de ruptura de consolos reforçados.





a) Ruptura do PRFC (Ivanova et al., 2015)



b) Ruptura do PRFC (Shadhan e Kadhim, 2015)

Figura 2.37 – Modos de ruptura de consolos reforçados.

2.5. Prescrições Normativas

2.5.1. ACI 318 (2019) - Dimensionamento

O ACI 318 (2019) determina que consolos com relação $a/d < 2,0$, devem ser dimensionados e analisados pelo Método de Bielas e Tirantes. Algumas recomendações são descritas para o comprimento de ancoragem, o correto posicionamento das armaduras de reforço horizontal, tensão admissível em bielas e nós. Os principais elementos e armaduras constituintes são ilustrados na Figura 2.38.

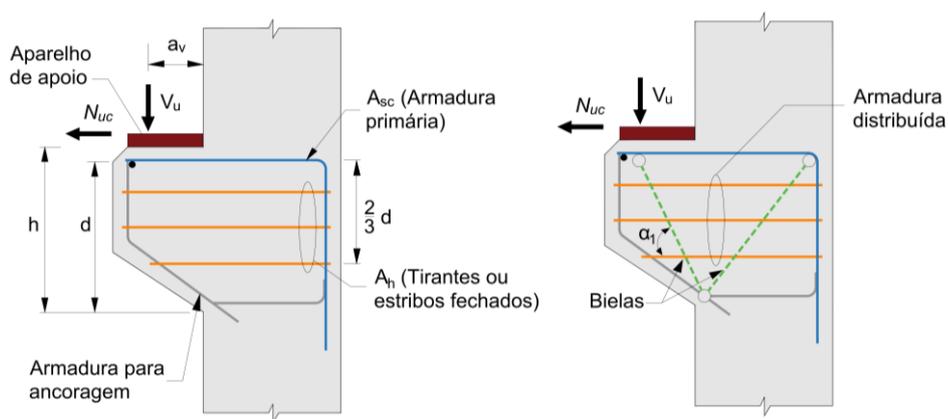


Figura 2.38 – Principais componentes de consolos de concreto (Adaptado de ACI 318, 2019).

A tensão admissível nas bielas (f_{ce}) deve ser calculada de acordo com a Equação 2.1. O fator de modificação de confinamento β_c é comentado na Tabela 2.7,



onde o A1 corresponde a área carregada e o A2 é uma medida no plano, considerando o limite de espraiamento da carga. Já na Tabela 2.8 é detalhado o coeficiente correspondente ao fator de eficiência da biela β_s .

$$f_{ce} = 0,85 \times \beta_c \times \beta_s \times f'_c \quad (2.1)$$

Tabela 2.7 - Fator de confinamento da biela (ACI 318, 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; 	O menor entre:	$\sqrt{A1/A2}$, onde A1 é definido pela face carregada do aparelho de apoio.
		2.0
Outros casos	1.0	

Tabela 2.8 - Fator de eficiência da biela (ACI 318, 2019).

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

Para as bielas internas, as verificações quanto a taxa de armadura mínima, são detalhados na Tabela 2.9, dependendo do arranjo das armaduras e da contenção lateral.

Tabela 2.9: Taxa de armadura mínima das bielas (ACI 318, 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_1	$\frac{0,0025}{\sin^2 \cdot \alpha_1}$	(b)
Contida	Não necessariamente distribuída		(c)

De maneira semelhante, a tensão resistente dos nós (f_{ce}) pode ser conhecida pela Equação 2.2, onde β_c corresponde ao fator de confinamento comentado na



Tabela 2-7 e β_n depende da posição do elemento e a presença ou não de tirantes, conforme a Tabela 2.10.

$$f_{ce} = 0,85 \times \beta_c \times \beta_n \times f'_c \quad (2.2)$$

Tabela 2.10 - Configuração da região nodal (ACI 318, 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)

Para os tirantes, a área de aço necessária (A_{ts}) depende da força de tração (F_{nt}) e a resistência ao escoamento do aço (f_y). A Equação 2.3 detalha o cálculo necessário.

$$A_{ts} = \frac{F_{nt}}{f_y} \quad (2.3)$$

Em relação a verificação de ancoragem reta, o comprimento necessário (l_d) corresponde ao maior valor obtido pela Tabela 2.11 ou 300 mm, sendo db o diâmetro da barra e ψ_t , ψ_e , ψ_g e λ os fatores de modificação detalhados na Tabela 2.12.

Tabela 2.11: Comprimento de ancoragem reto (ACI 318, 2019).

Espaçamento e Cobrimento	$\theta \leq 20.0$ mm	$\theta > 20.0$ mm
Distância livre entre as armaduras sendo ancoradas ou emendas não menores que db , cobrimento de no mínimo db , 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 $2db$ e cobrimento mínimo de db	$\left(\frac{f_y \times \psi_t \times \psi_e \times \psi_g}{2,1 \times \lambda \times \sqrt{f'_c}} \right) \times db$	$\left(\frac{f_y \times \psi_t \times \psi_e \times \psi_g}{1,7 \times \lambda \times \sqrt{f'_c}} \right) \times db$
Outros casos	$\left(\frac{f_y \times \psi_t \times \psi_e \times \psi_g}{1,4 \times \lambda \times \sqrt{f'_c}} \right) \times db$	$\left(\frac{f_y \times \psi_t \times \psi_e \times \psi_g}{1,1 \times \lambda \times \sqrt{f'_c}} \right) \times db$



Tabela 2.12 - Fatores de modificação para ancoragem de barras (ACI 318, 2019).

Fator de Modificação	Condição	Valor do Fator
Peso λ	Concreto leve	0,75
	Concreto de peso normal	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
Epoxi ψ_e	Reforço revestido com epóxi ou zinco-epóxi com revestimento duplo com tampa transparente menor que 3 <i>db</i> ou espaçamento claro menor que 6 <i>db</i>	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 Fundação ψ_t	Mais de 12 polegadas (30 mm) de concreto fresco abaixo do reforço horizontal	1,30
	Outros	1,00

Vale ressaltar que, neste estudo, foram verificados casos apenas com ancoragem reta, em casos de ancoragem com gancho devem ser analisados os itens 25.4.3.1 e 25.4.3.2 da referida norma.

2.5.2. ACI 318 (2019) – Ancoragem com Parafusos

Neste capítulo é apresentado os principais requisitos para o detalhamento de ancoragens com parafusos individuais ou em grupo. Inicialmente, considerando o comprimento de embutimento do parafuso, é recomendado um intervalo limite de $4d_a \leq h_{ef} \leq 20d_a$, sendo d_a o diâmetro do parafuso. Além disso, as âncoras devem atender aos critérios de distância de borda, espaçamentos e espessuras, como demonstrado na Figura 2.39.

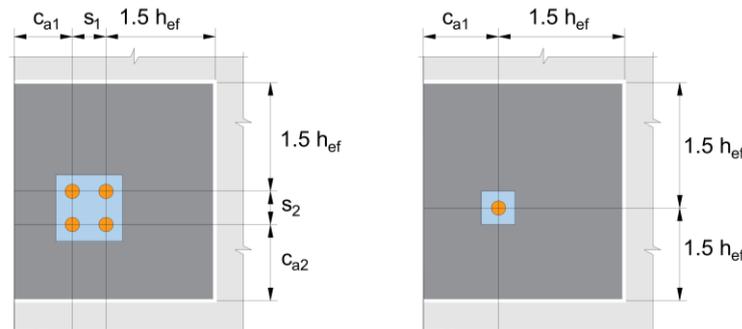


Figura 2.39 – Critérios de detalhamento de ancoragens com parafuso (ACI 318, 2019)



Na Tabela 2.13 são apresentados os requisitos mínimos para espaçamento e distância de borda, sendo considerado a força e o torque para a instalação, pois podem causar rachaduras no concreto. Caso não seja possível atender a essas recomendações, é necessário diminuir o diâmetro do parafuso, até que todos as análises sejam atendidas.

Tabela 2.13 - Requisitos mínimos de espaçamento e distância entre bordas (ACI 318, 2019)

Parâmetro de Espaçamento	Tipo de Âncora			
	Âncora pré-instalada		Expansão e âncoras pós-instaladas	Ancoragem aparafusada pós-instalada
	Sem aperto	Com aperto		
Espaçamento mínimo entre âncoras	$4d_a$	$6d_a$	$6d_a$	Maior valor entre $0,6h_{ef}$ e $6d_a$
Distância mínima das bordas	Requisitos especificados para armadura, conforme Item 20.5.1.3 da norma	$6d_a$	O maior valor entre (a), (b) e (c): (a) Requisitos especificados para armadura, conforme Item 20.5.1.3; (b) Duas vezes o tamanho máximo do agregado; (c) Requisitos mínimos de distância entre bordos do ACI 355.2 ou 355.4M, ou com o Quadro 17.9.2(b) quando não houver informação sobre o produto;	

Para fins de análise, é detalhado na Tabela 2.14 os requisitos do Item 20.5.1.3 da norma e na Tabela 2.15 as recomendações presentes no Quadro 17.9.2(b).

Tabela 2.14 - Recobrimento de concreto para elemento fabricados *in loco* (ACI 318, 2019).

Exposição do concreto	Membro	Armadura	Espaçamento especificado (mm)
Expostos a intempéries e em contato permanente com o solo	Todos	Todas	75
Expostos a intempéries ou em contato com o solo	Todos	Barras do N°19 ao N°57	50
		Barra de N°16, fio MW200 ou MD200, e mais pequeno	40
Não expostos a intempéries e sem contato com o solo	Lajes, vigas e paredes	Barras N°43 e N°47	40
		Barra N°36 ou menor	20
	Vigas, colunas, pilares e tirantes	Armadura principal, estribos, tirantes, espirais e arcos	40



Tabela 2.15 - Distância entre bordas na ausência de informações da âncora (ACI 318, 2019).

Tipo de âncora pós-instalada	Distância mínima da borda c_{al}	Distância crítica da borda c_{ac}
Torque controlado	$8d_a$	$4h_{ef}$
Deslocamento controlado	$10d_a$	$4h_{ef}$
Parafuso	$6d_a$	$4h_{ef}$
Rebaixamento	$6d_a$	$2,5h_{ef}$
Adesivo	$6d_a$	$2h_{ef}$

Para este trabalho, serão verificados dois modos de falha relacionados a carga vertical: a ruptura do aço antes do esmagamento do concreto e arrancamento do concreto para ancoragens afastadas de uma borda livre (*pryout*), como ilustrado na Figura 2.40. Para isso, deve ser calculada a resistência nominal ao cisalhamento para os dois modos.

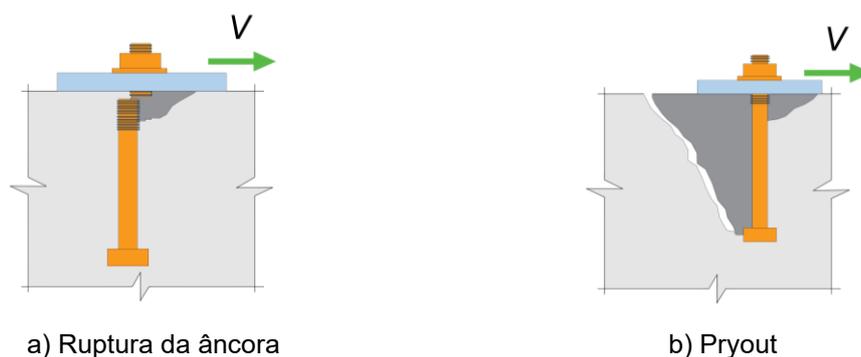


Figura 2.40 – Modos de ruptura para carga de cisalhamento (Adaptado de ACI 318, 2019).

Para o primeiro caso, a resistência ao cisalhamento do aço das ancoragens, V_{Sa} , deve ser avaliada com base nas propriedades do material e em duas dimensões, como demonstrado na Equação 2.4 para o caso de parafusos.

$$V_{Sa} = 0,6 \times A_{se,V} \times f_{uta} \quad (2.4)$$

Onde:

$A_{se,V}$ é a área efetiva da seção transversal de uma âncora, mm²;



f_{uta} é o menor valor entre $0,9f_{ya}$ ou 860 MPa, sendo f_{ya} a tensão de escoamento do aço dos parafusos;

Para a força cortante de arrancamento do concreto (*pryout*), devem ser respeitados os valores para âncoras individuais e em grupo, calculadas através das Equações 2.5 e 2.6, respectivamente.

$$V_{cp} = k_{cp} \times N_{cb} \quad (2.5)$$

$$V_{cpg} = k_{cp} \times N_{cbg} \quad (2.6)$$

Para o cálculo da resistência nominal ao esmagamento do concreto, N_{cb} ou N_{cbg} , é necessário calcular a área máxima projetada para uma ancoragem individual ou em grupo, A_{Nco} e A_{Nc} , como detalhado na Equação 2.7, 2.8, 2.9, 2.10. Além disso, a resistência básica à compressão, N_b , é previsto pela Equação 2.11 e os fatores de modificação são detalhados na Tabela 2.16.

$$N_{cb} = \frac{A_{Nc}}{A_{Nco}} \times \psi_{ed,N} \times \psi_{c,N} \times \psi_{cp,N} \times N_b \quad (2.7)$$

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

$$A_{Nc} = (c_{a1} + s_1 + 1,5 \times h_{ef}) \times (c_{a2} + s_2 + 1,5 \times h_{ef}) \quad (2.9)$$

$$A_{Nco} = (2 \times 1,5 \times h_{ef}) \times (2 \times 1,5 \times h_{ef}) = 9 \times h_{ef}^2 \quad (2.10)$$

$$N_b = k_c \times \lambda_a \times \sqrt{f'_c} \times h_{ef}^2 \quad (2.11)$$

Onde:



k_c é um coeficiente de valor 10 para ancoragem embutida e 7 para aparafusadas;

$\lambda_a = 0,8 \times \lambda$ é um fator de modificação que, para concreto de peso normal $\lambda = 1$, possui um valor de 0,8;

$$k_{cp} = 1 \text{ : } h_{ef} < 65\text{mm}$$

$$k_{cp} = 2 \text{ : } h_{ef} \geq 65\text{mm}$$

Tabela 2.16 - Fatores de modificação (ACI 318, 2019)

Fator de modificação	Valores mínimos
Fator de efeito de borda $\psi_{ed,N}$	$1,0, \text{ se } c_{a1} \geq 1,5 \times h_{ef}$ $0,7 + 0,3 \times \frac{c_{a1}}{1,5 \times h_{ef}}, \text{ se } c_{a1} < 1,5 \times h_{ef}$
Fator de fissuração $\psi_{c,N}$	1,25 para âncoras embutidas 1,4 para ancoragem pós-instalada 1,0 para elementos sem fissuração
Fator de fendilhamento $\psi_{cp,N}$	$1,0, \text{ se } c_{a1} \geq c_{ac}$ $\frac{c_{a1}}{c_{ac}} \geq \frac{1,5 \times h_{ef}}{c_{ac}}, \text{ se } c_{a1} < c_{ac}$
Fator de excentricidade $\psi_{ec,N}$	$\psi_{ec,N} = \frac{1}{\left(1 + \frac{2e'_N}{3h_{ef}}\right)} \leq 1,0$ <p>e'_N é a excentricidade entre o centroide das ancoragens e a carga resultante.</p>

2.5.3. ACI 440.2R (2017) – Verificação do Laminado

Esta norma trata das disposições gerais e principais verificações para sistemas reforçados com PRFC. É considerado que o concreto esmaga quando atingida a deformação máxima utilizável ($\epsilon_c = \epsilon_{cu} = 0,003$). É assumido que a ruptura do PRFC ocorre se a deformação do reforço atingir sua tensão de ruptura ($\epsilon_y = \epsilon_{fu}$), antes que o concreto atinja a deformação máxima. Além disso, para evitar uma falha controlada pelo descolamento, a deformação do reforço deve ser limitada a deformação a qual o descolamento pode ocorrer, sendo determinada pela Equação 2.12.



$$\varepsilon_{fd} = 0,41 \times \sqrt{\frac{f'_c}{n \times E_f \times t_f}} \leq 0,9 \times \varepsilon_{fu} \quad (2.12)$$

Onde:

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

n é o número de camadas de reforço;

E_f é o módulo de elasticidade do PRFC;

t_f é a espessura da manta/laminado;

ε_{fu} é a deformação de ruptura de projeto do reforço;

Considerando que a tensão máxima também pode ser alcançada pela ruptura do PRFC, é necessário determinar a deformação no estado limite último, denominada de deformação efetiva do reforço, sendo calculada pela Equação 2.13.

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \times \left(\frac{d_f - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd} \quad (2.13)$$

Sendo:

ε_{cu} é a deformação máxima utilizável no concreto, 0,003;

d_f é a altura útil efetiva do reforço;

c é a distância estimada da fibra mais comprimida ao eixo neutro;

ε_{bi} é a deformação no concreto no momento da instalação, em casos de reforço;

A tensão efetiva no reforço é calculada para verificar o nível máximo de tensão que pode ser desenvolvida antes da falha por flexão na seção. Esse resultado é obtido pela Equação 2.14, sabendo que $\varepsilon_{fe} \leq \varepsilon_{fd}$.

$$f_{fe} = E_f \times \varepsilon_{fe} \quad (2.14)$$

Para os cálculos de resistência máxima, faz-se necessário conhecer a distribuição interna de deformações e tensões. Para isso, a compatibilidade e o



equilíbrio de forças devem ser satisfeitos, como ilustrado na Figura 2.41. Nesta norma é utilizado um método iterativo que envolve um valor estimado para a profundidade da linha neutra, c , calculando a tensão e deformação de cada material e verificando o equilíbrio das forças internas.

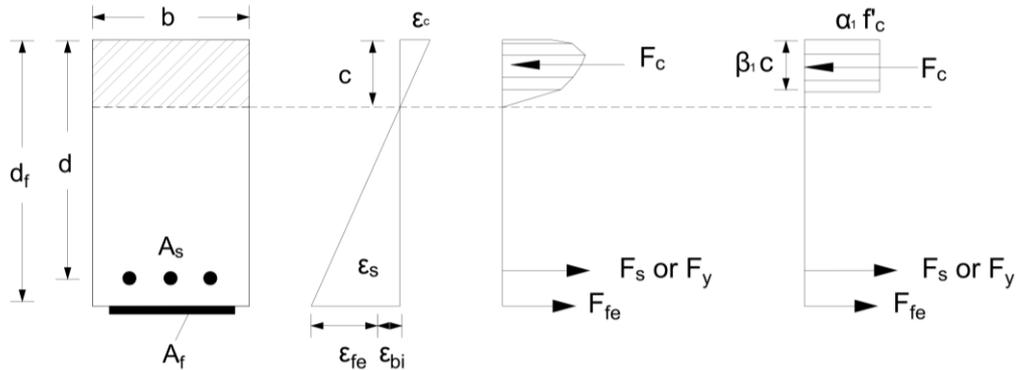


Figura 2.41 – Deformação e distribuição de tensões para uma seção retangular (ACI 440.2R, 2017).

Também utilizando a compatibilidade de deformação, pode ser verificada a deformação no aço, com base na Equação 2.15. Com isso, é determinada a tensão efetiva do aço, utilizando sua suposta curva tensão deformação por meio da Equação 2.16.

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \times \left(\frac{d-c}{d_f - c} \right) \quad (2.15)$$

$$f_s = E_s \times \varepsilon_s \leq f_y \quad (2.16)$$

Sendo:

d é a altura útil do aço;

E_s é o módulo de elasticidade do aço;

f_y é a tensão de escoamento do aço;

Com a tensão do PRFC e do aço, pode ser determinada a profundidade da linha neutra final, c , utilizando a Equação 2.17.



$$c = \frac{A_s \times f_s + A_f \times f_{fe}}{\alpha_1 \times f'_c \times \beta_1 \times b_w} \quad (2.17)$$

Onde:

$A_f = w_f \cdot t_f \cdot n$ é o produto da largura do reforço, espessura e número de camadas;

A_s é a área de aço a flexão;

α_1 é um parâmetro associado ao esmagamento do concreto, usualmente é utilizado 0,85;

$$\beta_1 = \begin{cases} 17 \leq f'_c \leq 28 \rightarrow 0,85 \\ 28 < f'_c < 55 \rightarrow 0,85 - \frac{0,05 \times (f'_c - 28)}{7} \\ f'_c \geq 55 \rightarrow 0,65 \end{cases}$$

b_w é a largura do consolo.

Vale ressaltar que, por se tratar de um processo iterativo, o valor de c estimado no início da verificação deve ser aproximadamente igual ao valor encontrando na Equação 2.17, caso contrário, as etapas devem ser refeitas, para que essa condição seja atendida. Além disso, pode ser calculado o momento nominal da seção através da Equação 2.18, utilizando o fator de redução ψ_f aplicado pela contribuição de resistência a flexão do PRFC.

$$M_n = A_s \times f_s \times \left(d - \frac{\beta_1 \times c}{2} \right) + \psi_f \times A_f \times f_{fe} \times \left(d_f - \frac{\beta_1 \times c}{2} \right) \quad (2.18)$$

2.5.4. ABNT NBR 8800 (2024) – Verificação da Chapa de Aço

Neste tópico da norma é avaliado os estados-limites últimos de escoamento da seção bruta e ruptura da seção líquida para elementos de aço. Para isso, é necessário calcular a força resistente de cálculo para ambos os casos, como detalhado nas Equação 2.19 e 2.20.



$$N_{t,Rd} = \frac{A_g \times f_y}{\gamma_{a1}} \quad (2.19)$$

$$N_{t,Rd} = \frac{A_e \times f_u}{\gamma_{a2}} \quad (2.20)$$

Onde:

A_g é a área bruta da seção transversal;

A_e é a área líquida da seção transversal;

f_y é a resistência ao escoamento do aço;

f_u é a resistência a ruptura do aço;

γ_{a1} é um fator de ponderação do aço estrutural, relacionado ao escoamento, flambagem e instabilidade;

γ_{a2} é um fator de ponderação do aço estrutural, relacionado a ruptura.

A área bruta é obtida pelo produto da largura da chapa, b_g , pela espessura, t , ilustrada na Figura 2.42. Já a área líquida efetiva é obtida pela multiplicação da área A_n pelo coeficiente de redução C_t . A área líquida depende da posição dos furos, sendo calculada através da Equação 2.21 para seções com furos alinhados ou pela 2.22 para seções em zigue zague e ilustrados na Figura 2.43. O coeficiente de redução C_t é considerado 1 quando a força é transmitida diretamente para cada elemento, seja por soldas ou parafusos.

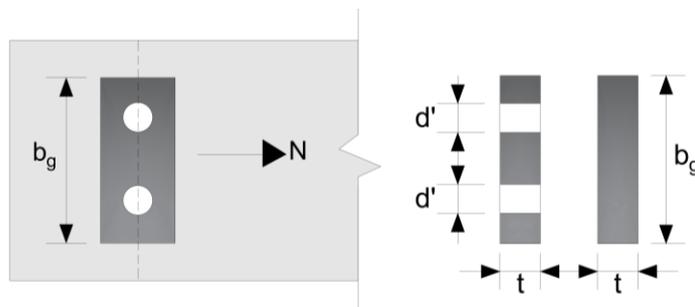


Figura 2.42 – Área bruta da seção transversal de uma chapa (Adaptado de ABNT NBR 8800, 2024).

$$A_n = A_g - (d_b + 2\text{mm} + 1,5\text{mm}) \times t \quad (2.21)$$

$$A_n = A_g - (d_b + 2\text{mm} + 1,5\text{mm}) \times t + \sum \frac{s^2}{4 \times g} \times t \quad (2.22)$$

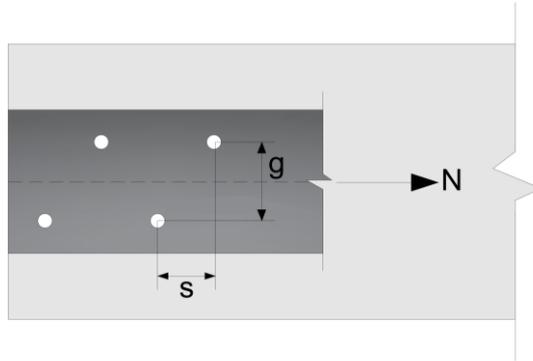


Figura 2.43 – Área líquida para uma seção em zigue zague (Adaptado de ABNT NBR 8800, 2024).

Os coeficientes de ponderação de resistência, γ_{a1} e γ_{a2} , são apresentados na Tabela 2.17 e dependem da combinação última de ações escolhida para o cálculo.

Tabela 2.17 - Valores dos coeficientes de ponderação da resistência (ABNT NBR 8800, 2024).

Combinações	Aço estrutural γ_a	
	Escoamento, flambagem e instabilidade γ_{a1}	Ruptura γ_{a2}
Normais	1,10	1,35
Especiais ou de construção	1,10	1,35
Excepcionais	1,00	1,15



3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este programa experimental consiste em seis ensaios de consolos curtos de concreto armado reforçados à flexão com laminados de PRFC. A avaliação do desempenho do reforço foi realizada considerando a influência da taxa de armadura de flexão e o uso de diferentes sistemas de ancoragem empregados.

O programa experimental foi dividido em dois grupos, sendo três com armadura principal de 10 mm e os demais com 16 mm. A preparação dos espécimes, bem como os ensaios, foi conduzida no laboratório de estruturas do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia (NDAE) do Campus de Tucuruí (CamTuc) da Universidade Federal do Pará (UFPA).

3.1. Características dos Consolos

Foram confeccionados seis consolos curtos duplos de concreto armado, dimensionados segundo as recomendações normativas do ACI 318 (2019). Todas as peças possuem o mesmo arranjo geométrico, sendo 250 mm de largura, altura de engastamento de 400 mm, altura na face externa de 200 mm e comprimento de 350 mm. Os pilares foram definidos com dimensão transversal de 250 x 300 mm, com altura de 950 mm, como detalhado na Figura 3.1.

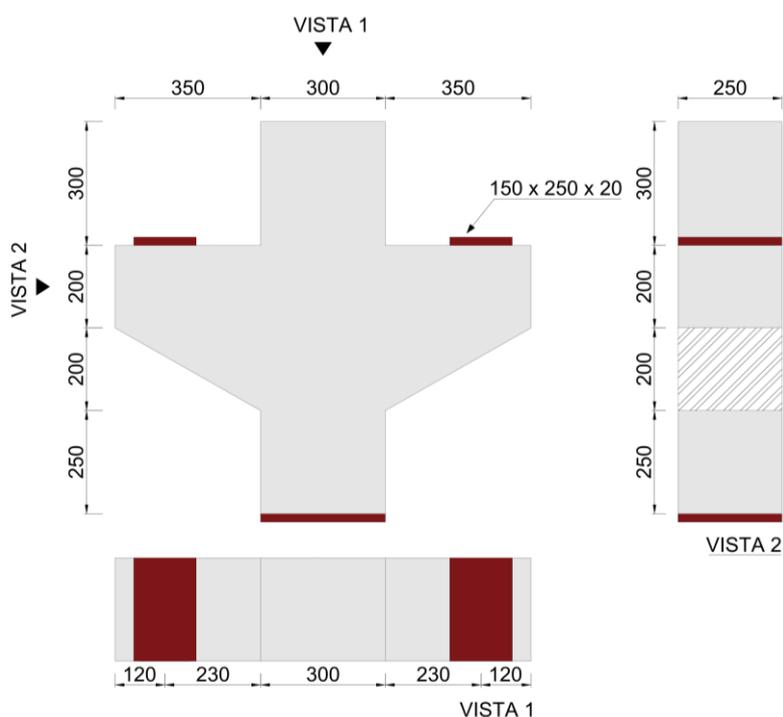


Figura 3.1- Geometria dos consolos.



A Tabela 3.1 apresenta um resumo das características dos seis consolos ensaiados. São apresentadas a altura útil real dos consolos (d), a distância entre a linha de aplicação da força e o pilar (a), resistência média a compressão do concreto (f_c), diâmetro das barras de flexão (ϕ_f), tensão de escoamento (f_{ys}), módulo de elasticidade (E_s) e taxa de armadura de flexão (ρ).

Tabela 3.1 - Resumo das características dos consolos

Consolos	d (mm)	a (mm)	a/d	f_c (MPa)	ϕ_f (mm)	f_{ys} (mm)	E_s (GPa)	ρ (%)
CR-0,18	347	230	0,66	33±2	10	590,3	212,8	0,18
CS-0,18-A	347		0,66					
CS-0,18-B	340		0,68					
CR-0,47	355		0,65	33±2	16	576,0	191,4	0,47
CS-0,47-A	353		0,65					
CS-0,47-B	356		0,65					

A Figura 3.2 ilustra o detalhamento das armaduras dos consolos. Todos os modelos possuem dois estribos horizontais com barras de 6,3 mm, que foram dispostos em 2/3 da altura útil da peça. Os estribos verticais foram confeccionados com barras de 10 mm e espaçados entre si com uma distância de 60 mm. A armadura construtiva foi elaborada com barra de 10 mm. O pilar foi composto por quatro barras de 12,5 mm e estribos de 5 mm. Foi considerado um cobrimento de 30 mm.

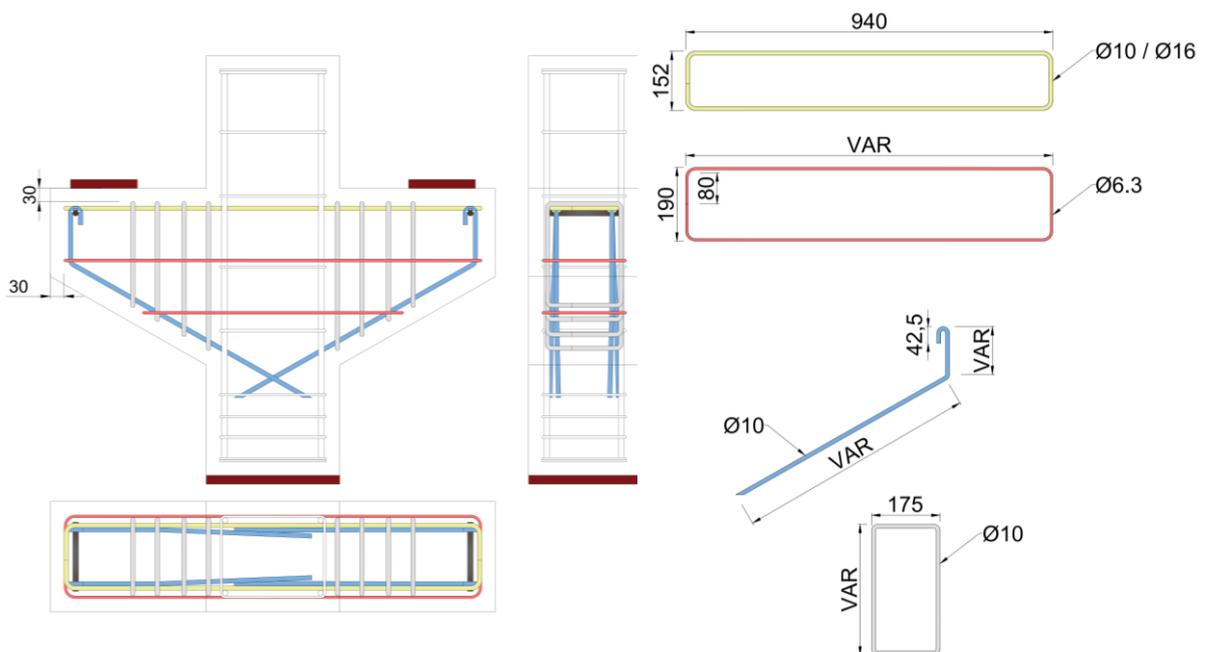


Figura 3.2 - Detalhamento das armaduras.



3.2. Características do Reforço

O reforço foi aplicado à flexão, por meio da técnica *Externally Bonded Reinforcement*. Todos os elementos foram reforçados em ambas as faces, utilizando laminado de PRFC com espessura (t_f) de 1,2 mm e uma largura (w_f) de 50 mm, colados ao longo de toda a face. Para a ancoragem das extremidades foram utilizados dois sistemas: o primeiro do tipo híbrido, com chapas de aço e parafusos; e o segundo utilizando aumento da seção nas extremidades e colagem transversal com o mesmo material do reforço.

Para o primeiro sistema, foram utilizadas as prescrições da ABNT NBR 8800 (2024) no dimensionamento das chapas de aço e parafusos. Nesse sentido, foi obtido um conjunto composto por chapas de 8 mm, quatro parafusos de 12,5 mm, em cada extremidade, e um embutimento de 70 mm, como ilustrado na Figura 3.3.

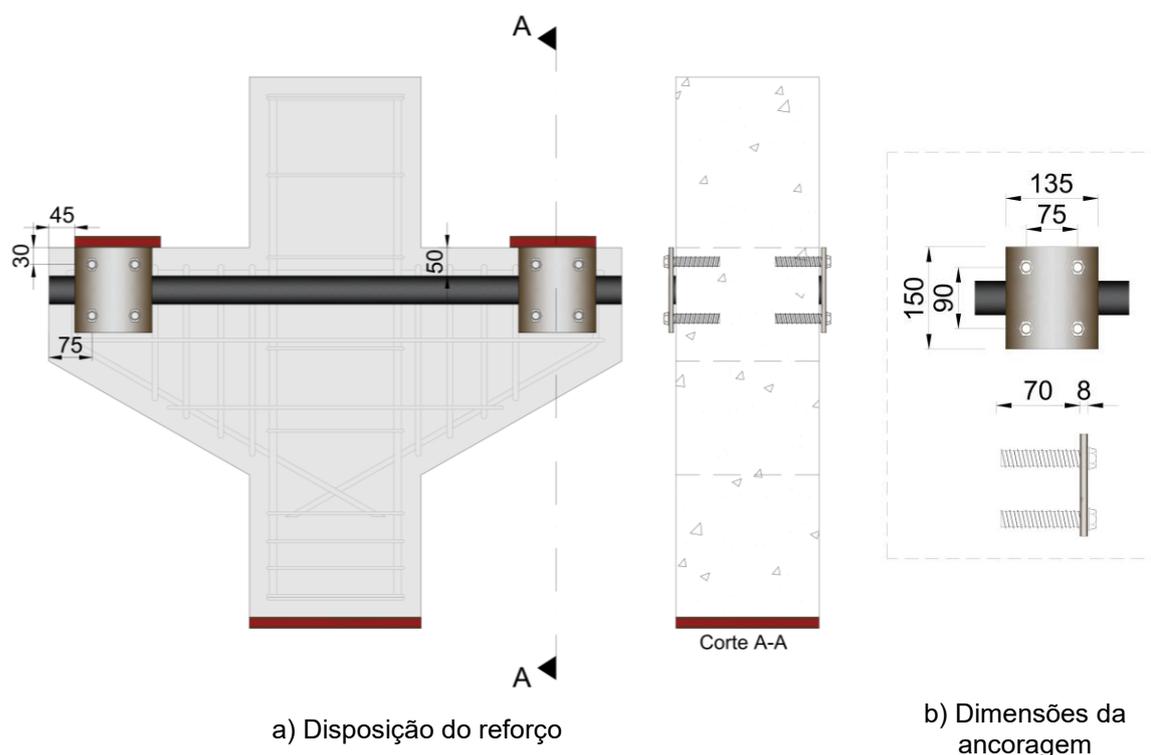


Figura 3.3 – Detalhamento do reforço com sistema híbrido de ancoragem.

Já o segundo método de ancoragem utiliza apenas os laminados de PRFC e consiste no aumento da seção em cada uma das extremidades e colagem transversal de laminados na última camada. O detalhamento desse conjunto foi dividido em três etapas principais.



Para o consolo CS-0,18-B, a primeira delas foi realizada com um laminado de 200x25 mm, para aumentar a seção e uniformizar a altura do sistema com o reforço principal. Em seguida, são utilizadas duas tiras de 200x50 mm para compor uma segunda camada e fechar todo o sistema. Por fim, no sentido transversal e na terceira camada, são coladas quatro tiras de 50x100 mm. As dimensões e disposição desse método de ancoragem é detalhado na Figura 3.4.

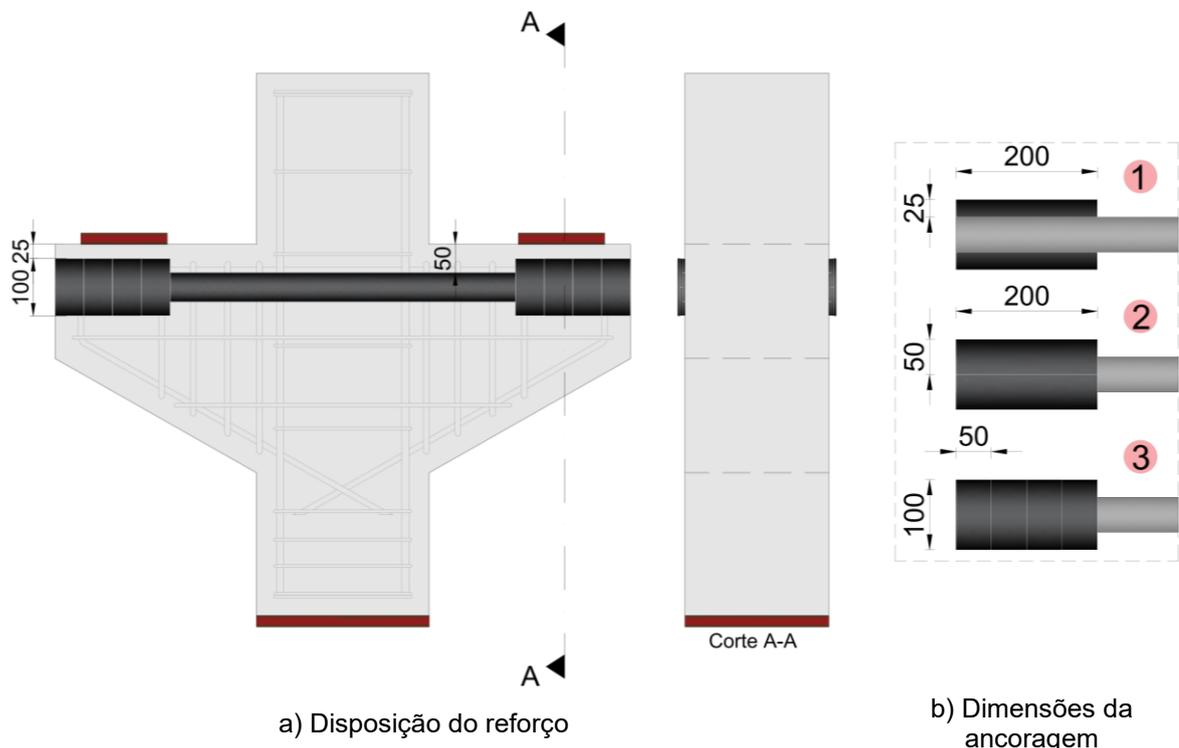


Figura 3.4– Sistema de ancoragem com colagem transversal (menor taxa de flexão)

Já para o CS-0,47-B, em decorrência da maior taxa de armadura de flexão e visando maiores incrementos de resistência, optou-se por aumentar a seção em cada uma das etapas. Na primeira camada, foram utilizadas duas tiras de 200x50 mm, enquanto na segunda camada duas tiras de 200x50 mm e duas de 200x25 mm. Por fim, transversalmente, quatro laminados de 200x150 mm, como ilustrado na Figura 3.5.



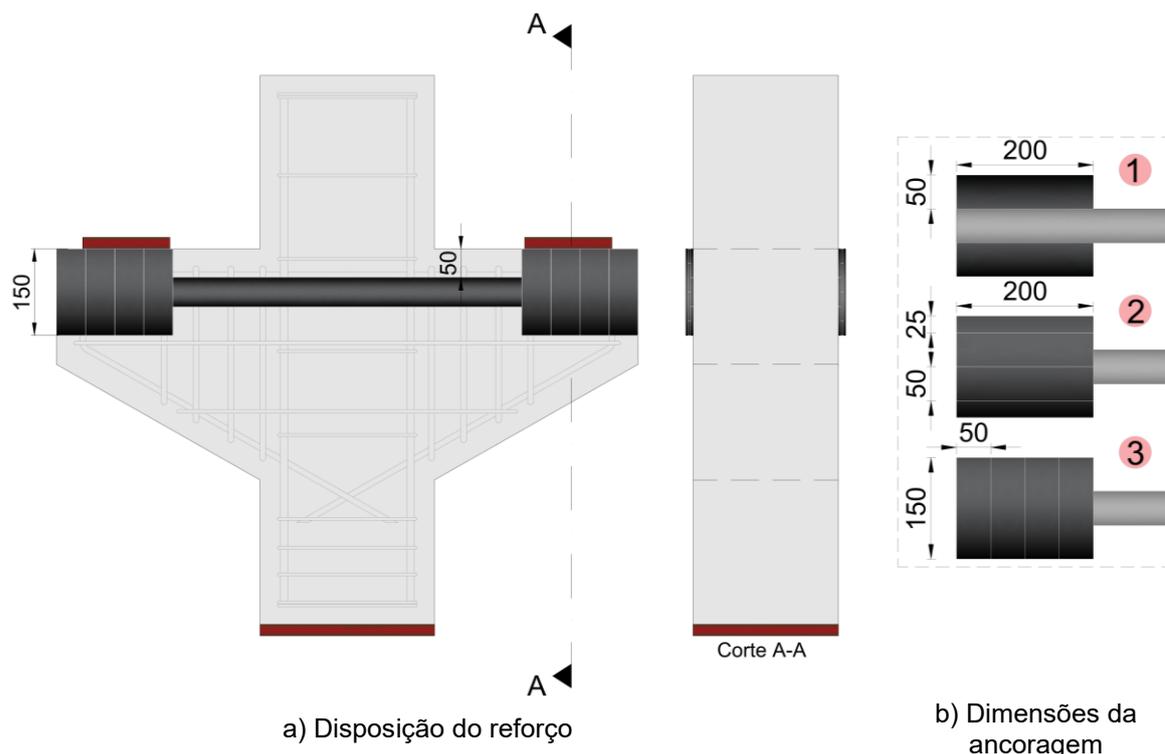


Figura 3.5– Sistema de ancoragem com colagem transversal (maior taxa de flexão)

3.3. Sistema de Ensaio

Os ensaios foram realizados em um sistema composto por uma prensa hidráulica com capacidade de carregamento máximo de 300 toneladas, no Laboratório de Estruturas do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia (NDAE) – UFPA Tucuruí. Todos os consolos foram ensaiados e posicionados da mesma maneira, utilizando chapas de aço soldadas como apoio de reação.

O ensaio foi caracterizado por três pontos: primeiro o carregamento aplicado pela prensa, em passos de carga de 10 kN, enquanto os outros dois serão apoios de 1º e 2º gênero. Para aplicação de carga, será adotada uma chapa de aço quadrada, nas dimensões do pilar, com espessura suficiente para evitar uma ruptura localizada neste ponto. A Figura 3.6 apresenta o sistema de ensaio utilizado.



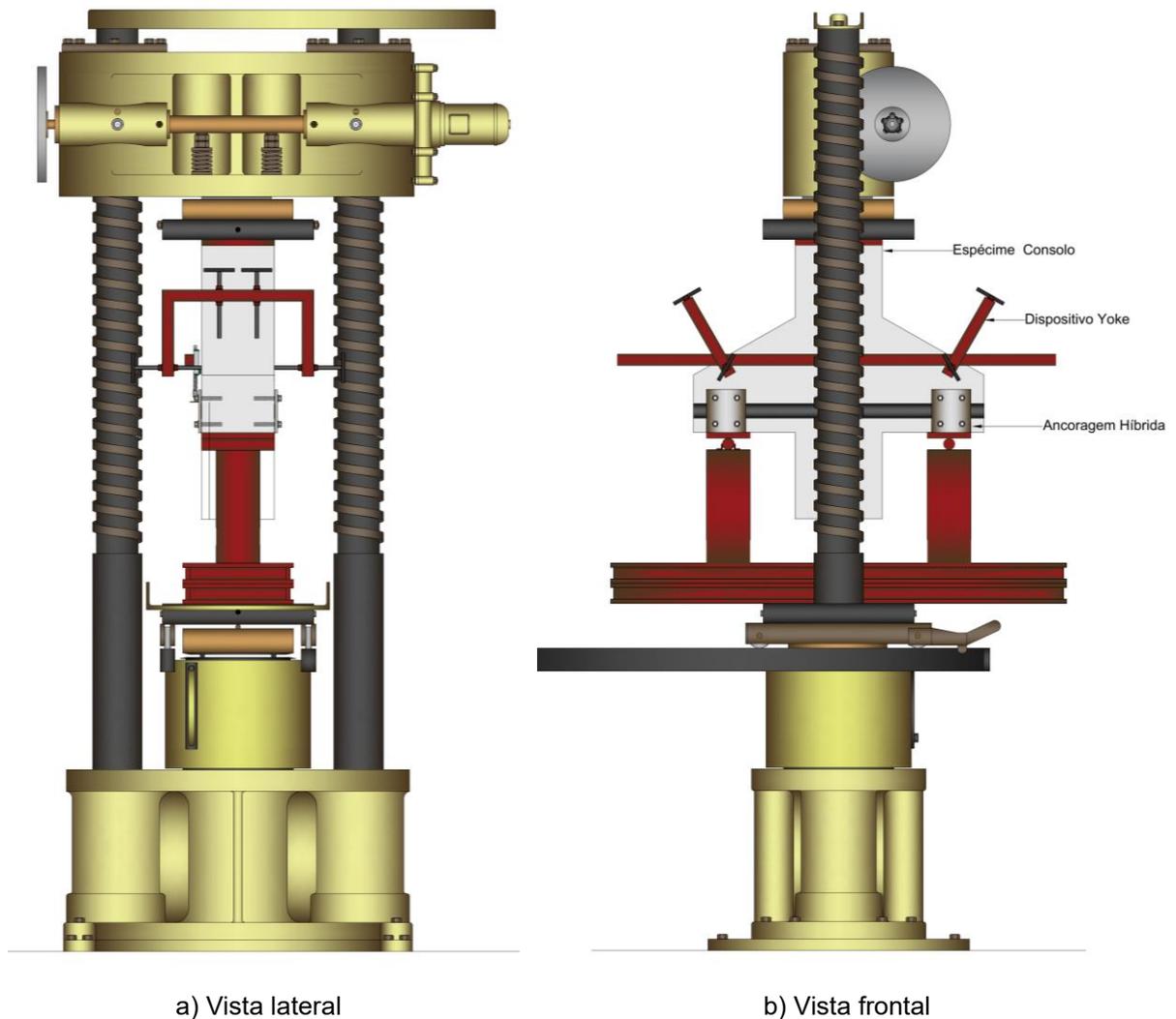


Figura 3.6 - Sistema de ensaio dos consolos.

3.4. Instrumentação

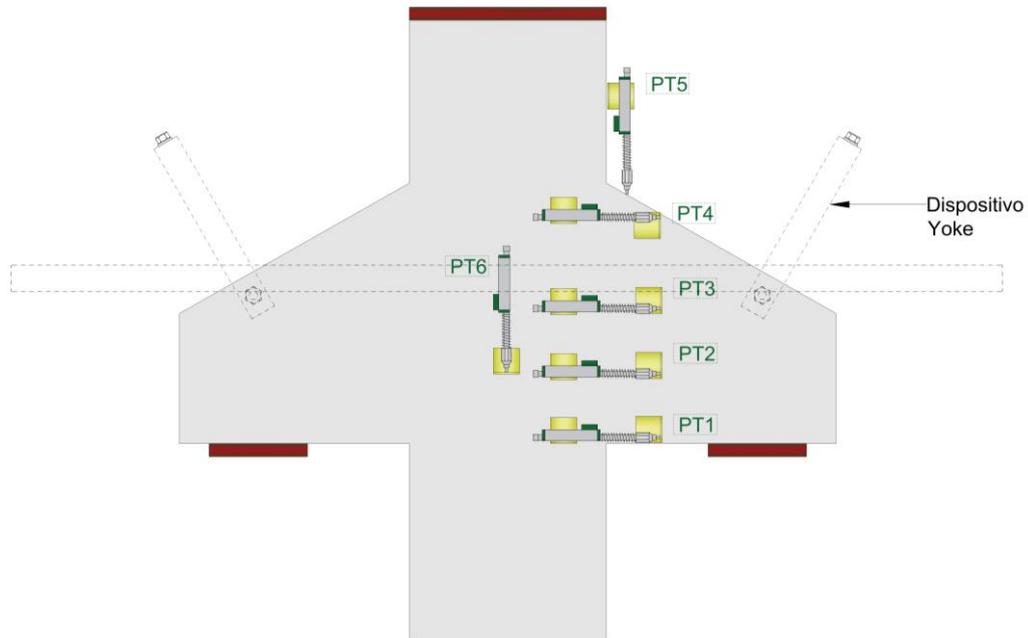
3.4.1. Deslocamentos Verticais

A medição dos deslocamentos verticais nos consolos foi realizada por meio de potenciômetros. Os potenciômetros (PT) 1 a 4 foram posicionados na interface entre o pilar e o consolo, visando monitorar a abertura de fissuras nessa região. O PT5 foi estabelecido para acompanhar a resposta ao cisalhamento no chanfro, próximo a face do pilar. Já para medir o deslocamento, considerando à resposta a flexão do modelo, foi utilizado o monitoramento com o PT6. A Figura 3.7, ilustra a posição dos pontos de monitoramento nos consolos de referência e reforçados.

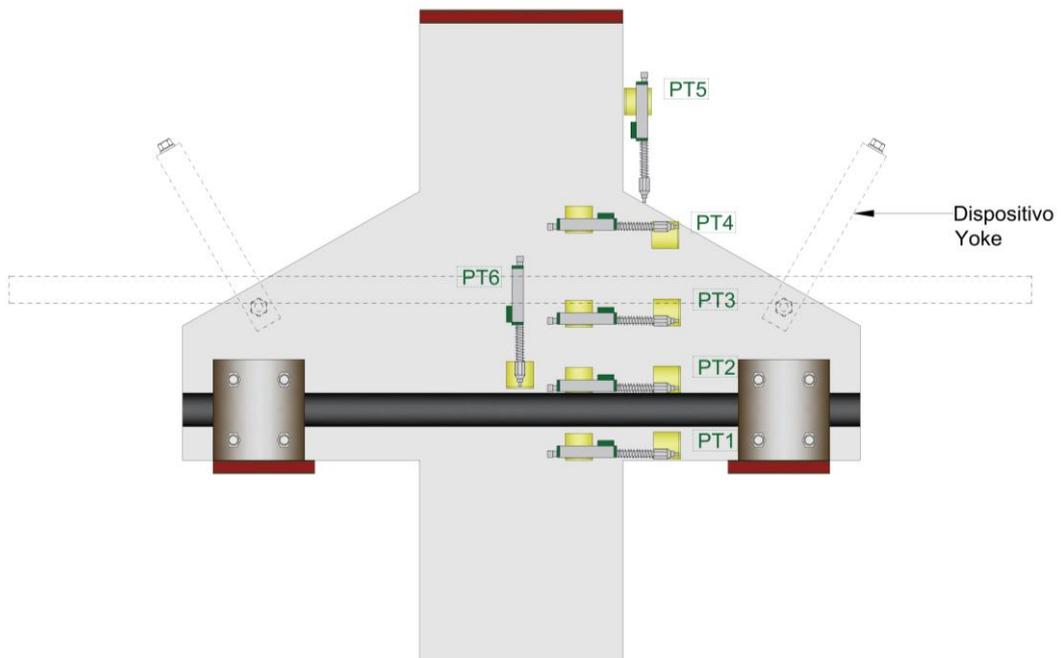
Para a verificação do escorregamento do laminado de PRFC, em ambos os sistemas de ancoragem, foram posicionados quatro potenciômetros (PR), dois



próximos ao sistema de ancoragem (PR1 e PR4), um na direção da face do pilar (PR3) e um na região intermediária (PR2). A Figura 3.8 detalha a posição de cada potenciômetro.



a) Potenciômetros utilizados no consolo de referência



b) Potenciômetros utilizados no consolo reforçado

Figura 3.7– Instrumentação para medição de deslocamentos verticais.



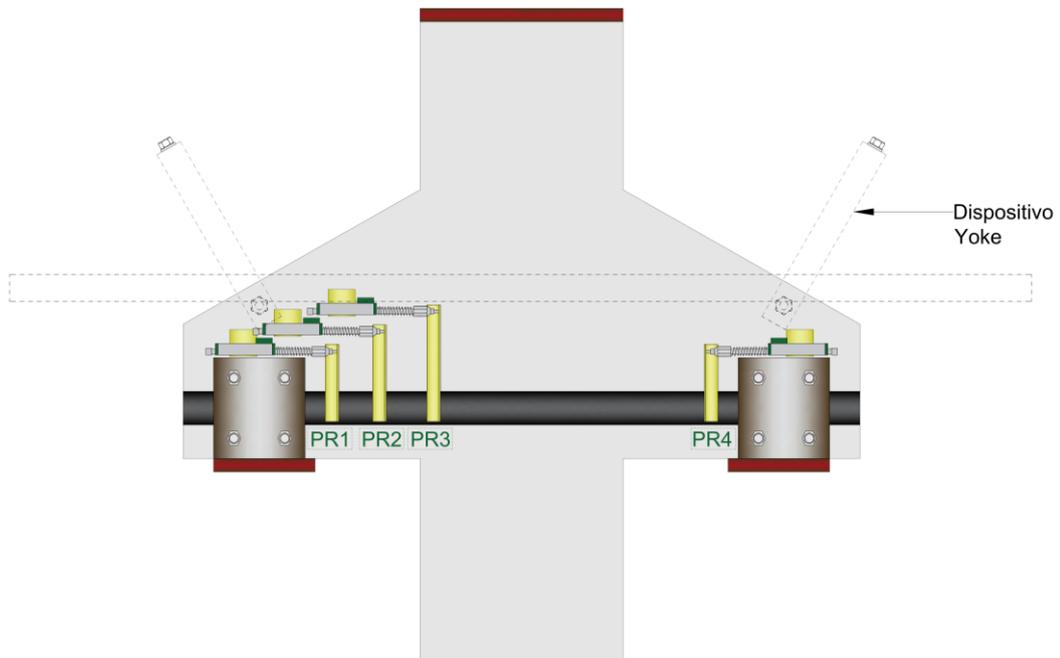


Figura 3.8 – Instrumentação do laminado para medição de deslocamentos.

3.4.2. Deformação no Concreto e nas Armaduras

O monitoramento das deformações foi realizado por meio de extensômetros elétricos de resistência (EER). Nos modelos de referência, os extensômetros foram posicionados apenas no tirante, nos dois lados, pois consiste na armadura mais solicitada dos consolos. Já para o restante dos espécimes, modelos reforçados, também foram fixados dispositivos nos estribos horizontais e na armadura construtiva. O posicionamento detalhado é mostrado na Figura 3.9 e na Figura 3.10.

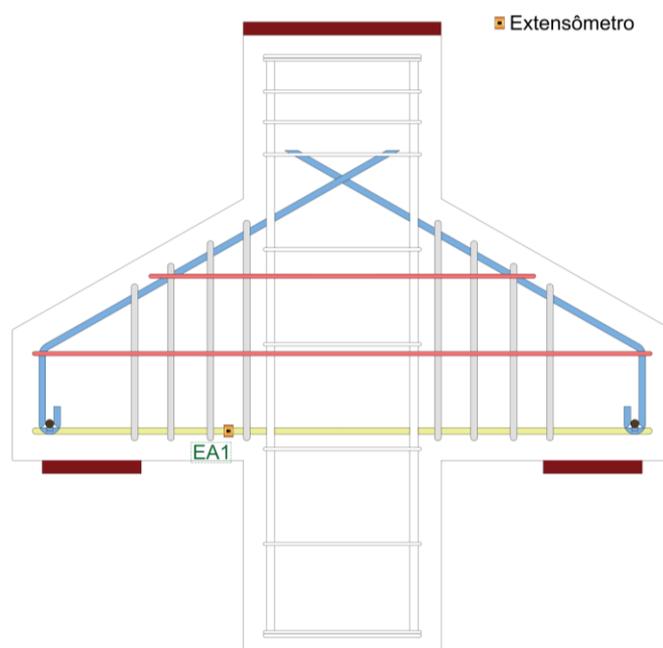


Figura 3.9– Instrumentação da armadura dos consolos de referência.



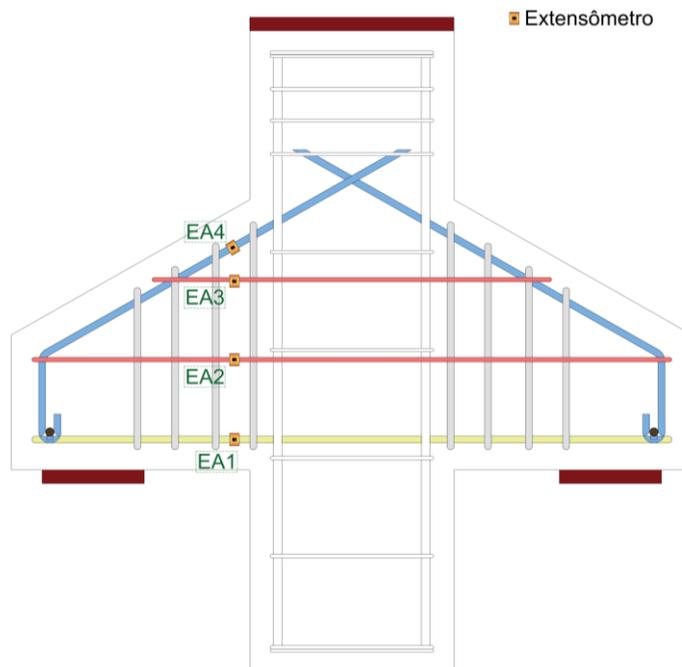


Figura 3.10– Instrumentação da armadura dos consolos reforçados.

A leitura das deformações no concreto foi realizada por meio de extensômetros fixados externamente na superfície das peças. A posição monitorada foi a região de encontro consolo/pilar. A Figura 3.11 apresenta a posição desses extensômetros de concreto. Nessa etapa, o primeiro consolo testado, não era composto pelo ponto EC6, que foi acrescentado para o segundo consolo de referência, para verificar o comportamento do bloco de compressão. Já para os reforçados, analisando as deformações obtidas nos dois primeiros, foram excluídos os pontos EC1 e EC2.

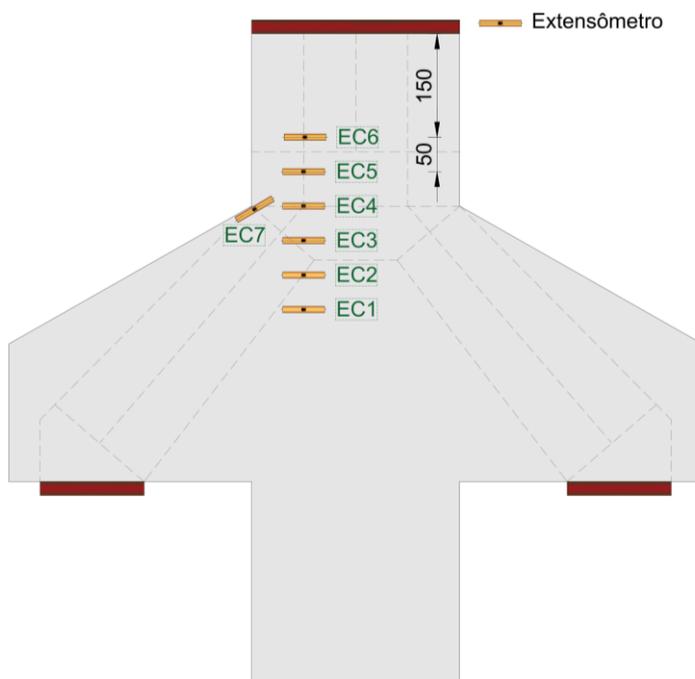


Figura 3.11- Instrumentação no concreto dos consolos.



3.4.3. Deformação no Reforço

Foram verificadas as deformações no laminado de PRFC utilizado para o reforço. Os extensômetros estavam posicionados em cinco pontos: um próximo a cada ancoragem, totalizando quatro monitoramentos (EF1, EF3, EF4 e EF5), e um na região de encontro consolo/pilar (EF2). A localização de cada extensômetro utilizado é demonstrado na Figura 3.12.

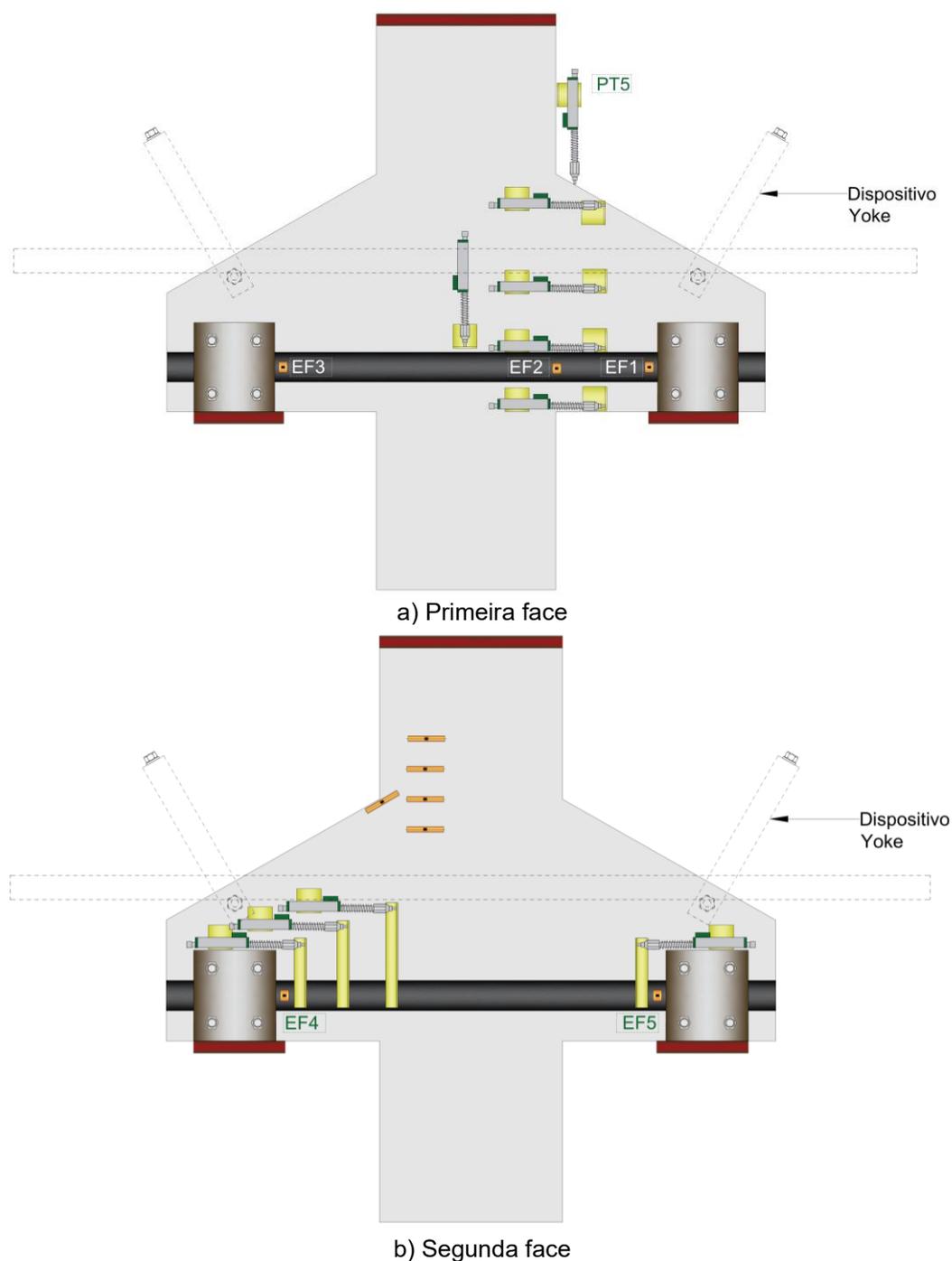


Figura 3.12 - Instrumentação no reforço.



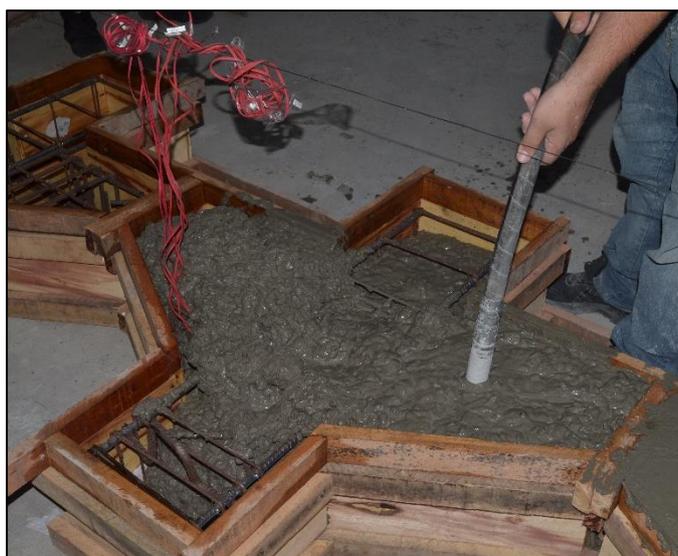
3.5. Propriedades e Características dos Materiais

3.5.1. Concreto

O concreto utilizado nos consolos foi produzido no Laboratório de Estruturas do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia (NDAE) – UFPA Tucuruí. Foi utilizado cimento Portland com adição de escória, areia natural e agregado graúdo do tipo brita. O ensaio *Slump Test* foi realizado conforme as recomendações normativas da ABNT NBR NM 67 (1996), com resultados de abatimento no intervalo de 13 ± 1 cm, demonstrado na Figura 3.13a. Além disso, durante o processo da concretagem, foi utilizado adensamento com auxílio de vibradores mecânicos de imersão, ilustrado na Figura 3.13b. Cerca de quatro horas após o término da concretagem, foi iniciado o processo de cura dos consolos e dos corpos-de-prova.



a) Slump test



b) Adensamento do concreto

Figura 3.13 - Procedimentos realizados durante a concretagem.

A Tabela 3.2 apresenta o traço e a quantidade de materiais consumidos na confecção do concreto. Para cada consolo foram moldados nove corpos de prova cilíndricos de 100x200 mm para ensaios de determinação de resistência média à tração ($f_{ct,med}$), compressão ($f_{c,med}$) e módulo de elasticidade ($E_{c,med}$). A Tabela 3.3 apresenta resultados desses ensaios de caracterização para cada consolo. Vale ressaltar que, todos os corpos-de-prova foram ensaiados no mesmo período da realização dos ensaios dos consolos.



Tabela 3.2 - Composição do traço adotado.

Materiais	Traço Unitário	Quantidade (kg/m ³)
Cimento CP II E 32	1	330
Areia	1,6	525
Brita	2,4	791
Relação água/cimento (<i>a/c</i>)	0,43	141,8

Tabela 3.3- Propriedades mecânicas do concreto.

Consolo	$f_{c,med}$ (MPa)	$f_{ct,med}$ (MPa)	$E_{c,med}$ (GPa)
CR-0,2	33±2	3,80	23,32
CS-0,2-A			
CS-0,2-B			
CR-0,5			
CS-0,5-A			
CS-0,5-B			

3.5.2. Aço

As propriedades mecânicas das barras de aço foram caracterizadas através de ensaios de tração axial realizados no Laboratório de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pará (UFPA), no campus de Tucuruí. Foram utilizadas as recomendações da ABNT NBR 6892 (2024), com a retirada de três corpos para cada diâmetro (6,3 mm, 10 mm e 16 mm). Os resultados obtidos nos ensaios são detalhados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4- Propriedades mecânicas do aço.

ϕ (mm)	f_{ys} (MPa)	ε_{ys} (‰)	f_u (MPa)	E_s (GPa)
6,3	410,00	2,00	789,53	209,30
10,0	590,30	2,78	790,72	212,80
16,0	576,00	3,02	673,07	191,40

3.5.3. Polímero Reforçado com Fibra de Carbono (PRFC)

O laminado de fibra de carbono utilizado para o reforço dos consolos é produzido pela *MC Bauchemie*. O material consiste em um compósito de matriz em resina epóxi, reforçados com fibra de carbono unidirecional por pultrusão. O ensaio de caracterização do material foi realizado seguindo as recomendações da ASTM D3039 (2021) e executado no Laboratório de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pará (UFPA), no campus de Tucuruí. Para isso, foram confeccionados cinco corpos de prova, com dimensões estabelecidas, e ilustrados na Figura 3.14.



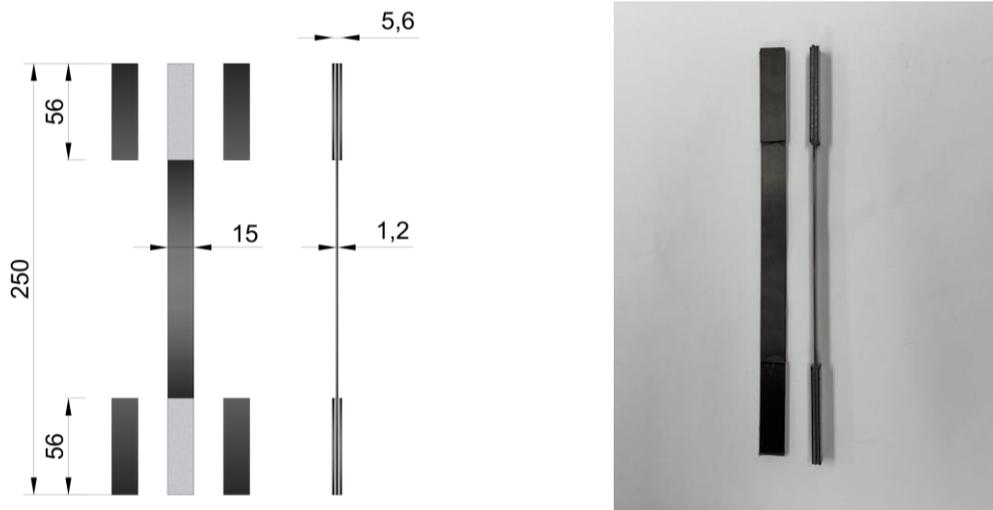


Figura 3.14 – Características do corpo de prova.

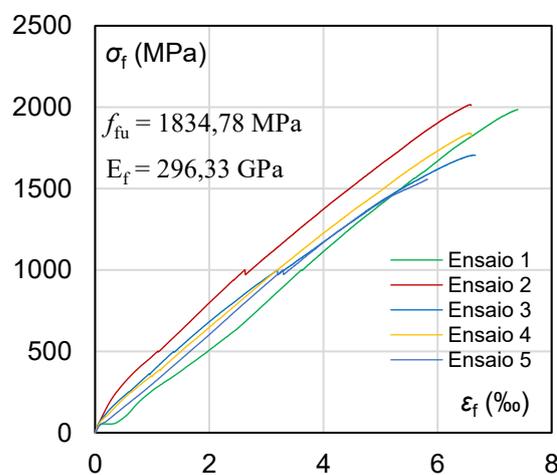
Os resultados de cada ensaio são detalhados na Tabela 3.5. Já na Figura 3.15, é possível observar o comportamento tensão x deformação dos ensaios e os valores médios obtidos, sendo de 1834,78 MPa para a tensão última e de 296,33 GPa para o módulo de elasticidade. Vale ressaltar que, os valores encontrados foram muito diferentes das especificações do fabricante e dos encontrados na literatura.

Tabela 3.5- Propriedades mecânicas do PRFC.

Ensaio	f_{fu} (MPa)	ϵ_f (‰)	E_f (GPa)
1	2002,22	6,58	280,38
2	2015,00	6,58	333,11
3	1705,00	6,64	283,83
4	1893,89	6,52	297,80
5	1557,78	5,81	286,51
Média	1834,78	6,43	296,33



a) Ensaio



b) Propriedades mecânicas

Figura 3.15 – Valores médios para a caracterização do PRFC.



3.5.4. Resina

A resina utilizada para o reforço dos consolos é produzida pela *Clever Solutions*, comercializada pelo nome S&P 220 PL, ilustrada na Figura 3.16. Esse adesivo é indicado pelo fabricante para a colagem dos laminados e consiste em um adesivo estrutural, bicomponente, a base de epóxi. Esse material não foi ensaiado, sendo considerada as especificações do fabricante.



Figura 3.16– Resina epóxi utilizada.

3.6. Processo Executivo do Reforço

3.6.1. Preparação da Superfície

A execução do reforço iniciou com a preparação de superfície dos quatro consolos a serem reforçados. A primeira etapa foi a limpeza e uniformização das duas faces de cada elemento, utilizando uma lixa rebolo de tipo copo cônico, de maneira superficial, como ilustrado na Figura 3.17a. Em seguida, para os dois consolos com ancoragem híbrida, foi realizado o processo de execução dos furos, sendo realizado quatro furos de 14 mm em cada uma das extremidades, com profundidade de 70 mm, conforme Figura 3.17b.

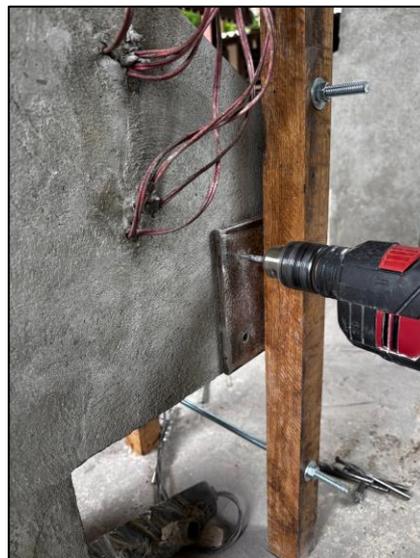
Posteriormente, os quatro consolos passaram por uma remoção da camada superficial do concreto na área que iria receber o reforço, utilizando uma escova rotativa copo de aço, visando melhorar a rugosidade e aderência na região,



demonstrado na Figura 3.17c. Essa etapa de preparação da superfície finalizou com a limpeza e lavagem dos consolos, utilizando jato de água nos furos e em toda a face, como na Figura 3.17d.



a) Limpeza e uniformização utilizando rebolo



b) Furo para a ancoragem híbrida



c) Remoção da camada superficial com escova copo de aço



d) Lavagem da superfície e furos da ancoragem híbrida

Figura 3.17– Processo de preparação da superfície.

Com a superfície limpa, regularizada e seca, foram demarcadas as áreas dos consolos que receberiam reforço. Toda a região foi delimitada com fita, buscando um posicionamento adequado e preciso do laminado e das ancoragens, além disso, essa mesma área foi limpa com acetona para receber a resina, conforme mostra a Figura 3.18a. Em seguida, uma fina camada de resina foi aplicada para uniformizar a superfície e receber o laminado de PRFC, como ilustra a Figura 3.18b.





a) Demarcação e limpeza com acetona



b) Regularização da superfície com resina

Figura 3.18– Limpeza e regularização da superfície.

3.6.2. Aplicação do Laminado de PRFC

Para a aplicação do reforço, o laminado de PRFC foi cortado e limpo com acetona em toda sua extensão. Enquanto isso, os componentes da resina epóxi eram misturados conforme as especificações do fabricante, visando obter uma quantidade suficiente para formar uma camada de aproximadamente 2 mm, para posteriormente, espriar durante o posicionamento e finalizar com 1 mm. Com isso, a resina foi aplicada em toda a face do laminado, uniformemente e sem vazios, demonstrados na Figura 3.19.



a) Demarcação e limpeza com acetona



b) Regularização da superfície com resina

Figura 3.19– Limpeza e aplicação da resina no laminado de PRFC.



Com a resina devidamente aplicada, o laminado de PRFC foi posicionado nos consolos, conforme marcações previamente realizadas. Uma leve pressão foi realizada manualmente em todo o laminado, por alguns segundos, até que a fixação no local correto fosse garantida. Na Figura 3.20 é detalhado esse processo de posicionamento do laminado.



a) Posicionamento do laminado de PRFC



b) Fixação do laminado

Figura 3.20– Processo de aplicação do laminado de PRFC

3.6.3. Aplicação das Ancoragens

Para a aplicação da ancoragem híbrida, inicialmente, todos os furos foram preenchidos com resina, visando preencher ao máximo o embutimento de 70 mm realizado, até o extravasamento do material, como mostra a Figura 3.21a. Ao mesmo tempo, uma quantidade de resina também era aplicada na superfície da chapa de aço, que havia sido previamente limpa com acetona, com quantidade suficiente para que nenhum vazio fosse criado e que tivesse a mesma espessura do restante do sistema, conforme Figura 3.21b.

Esse processo é realizado em cada face do consolo, juntamente com a aplicação do reforço principal, para que a resina em cada componente tenha tempo de cura semelhante. Os dois consolos com ancoragem híbrida são ilustrados na Figura 3.22.



a) Preenchimento dos furos com resina



b) Aplicação de resina na chapa de aço

Figura 3.21– Processo de aplicação da ancoragem híbrida.



a) Ancoragem híbrida



b) Consolo reforçado com ancoragem híbrida

Figura 3.22– Consolos reforçados com ancoragem híbrida.

Para o segundo sistema de ancoragem utilizado, foram inicialmente cortadas e limpas com acetona todas as tiras de PRFC necessárias. Após a aplicação do reforço principal, a primeira etapa consistiu no aumento da seção nas extremidades, ainda na primeira camada como demonstrado na Figura 3.23a. A etapa seguinte teve por objetivo compor uma segunda camada e sobrepor a divisão das tiras da camada anterior, ilustrada na Figura 3.23b. Por fim, transversalmente, e compondo a terceira camada, quatro tiras foram dispostas ao longo dos 200 mm em cada uma das



extremidades, mantendo a altura desejada para cada caso, como mostra a Figura 3.23c.



a) Etapa 1



b) Etapa 2



c) Etapa 3

Figura 3.23– Processo de aplicação da ancoragem com colagem transversal.

Vale ressaltar que, nos dois consolos com essa ancoragem, o aumento da seção nas extremidades foi para 200 mm de largura. No entanto, para a menor taxa de armadura de flexão foi utilizada uma altura de 100 mm e de 150 mm para a maior taxa. Ambos os consolos são ilustrados na Figura 3.24.





a) Menor taxa de armadura de flexão



b) Maior taxa de armadura de flexão

Figura 3.24– Consolos reforçados com colagem transversal.



4. MODELO PARA ANÁLISE TEÓRICA

O método de bielas e tirantes foi utilizado para analisar teoricamente a resistência dos consolos, visando verificar a segurança de uma previsão de resistência para os espécimes com e sem reforço. Foi idealizado um modelo de treliça composto por um tirante principal, duas bielas inclinadas, que são conectados por regiões nodais.

No caso dos consolos de referência, o tirante foi posicionado considerando a altura útil e o centroide do aparelho de apoio. Já os nós do bloco de compressão foram dispostos na divisão entre o pilar e o consolo. A Figura 4.1 ilustra o modelo considerado para os consolos de referência.

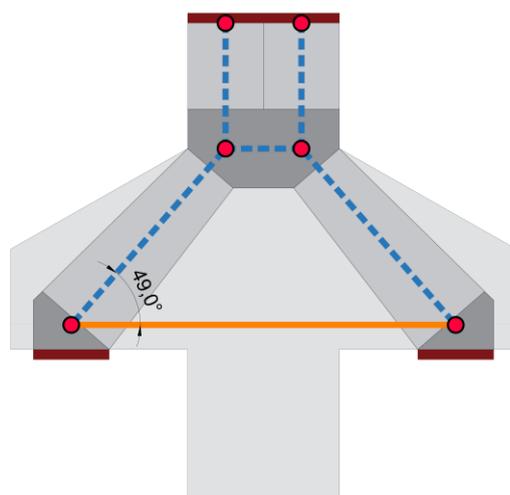


Figura 4.1- Modelo de bielas e tirantes para os consolos de referência.

Já para os modelos com reforço, no tirante será considerado a contribuição da força dos laminados. Para isso, foi analisada a tensão máxima do laminado, em função do módulo de elasticidade fornecido pelo fabricante e a deformação calculada, sendo o limite mínimo o de delaminação e o máximo o de ruptura do PRFC. Como o laminado foi colado nas duas faces do consolo, foram consideradas duas tiras de 50 mm para o cálculo da área. Na Tabela 4.1 são apresentados os valores utilizados para essa análise.



Tabela 4.1 - Cálculo da força no laminado.

Reforço	t_f (mm)	w_f (mm)	n_c	n_t	A_f (mm ²)	E_f (MPa)	f_{ck} (MPa)	ϵ_{fd}	ϵ_{fe}
	1,2	50	1	2	120	170000	33	0,0052	0,014

Dessa forma, o tirante foi posicionado através da Equação 4.1 e exemplificado na Figura 4.2.

$$Y = \frac{(A_s \times f_y \times Y_1) + (A_f \times f_f \times Y_2)}{(A_s \times f_y) + (A_f \times f_f)} \quad (4.1)$$

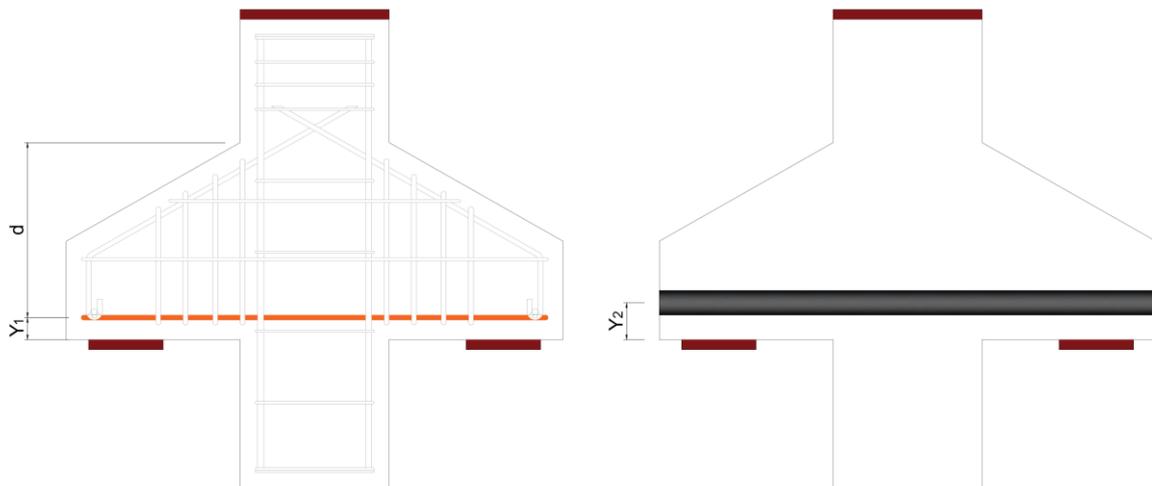


Figura 4.2- Medidas para ajuste do tirante.

Os nós do bloco de compressão foram posicionados na região de encontro entre o pilar e o consolo, assim como no de referência. Dessa forma, o modelo de bielas e tirantes obtido é ilustrado na Figura 4.3 para os consolos reforçados e ancorados.

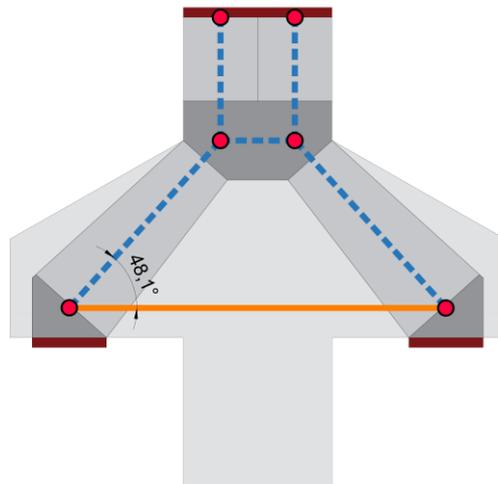


Figura 4.3- Modelo de bielas e tirantes para os consolos reforçados.

Com o modelo de treliça final, foi verificado como seria a distribuição de esforços em cada elemento. Na Figura 4.4 é demonstrado a verificação para os consolos de referência, enquanto na Figura 4.5 para os reforçados. Vale ressaltar que, as verificações do nó serão restritas ao CCT e que, nos modelos com reforço, serão realizadas verificações da ancoragem, conforme ilustrado na Figura 4.6.

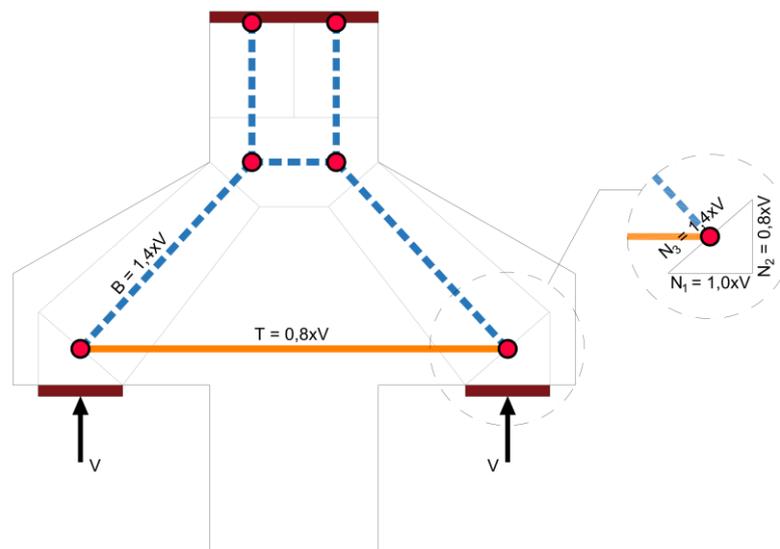


Figura 4.4- Distribuição de esforço na treliça dos consolos de referência.



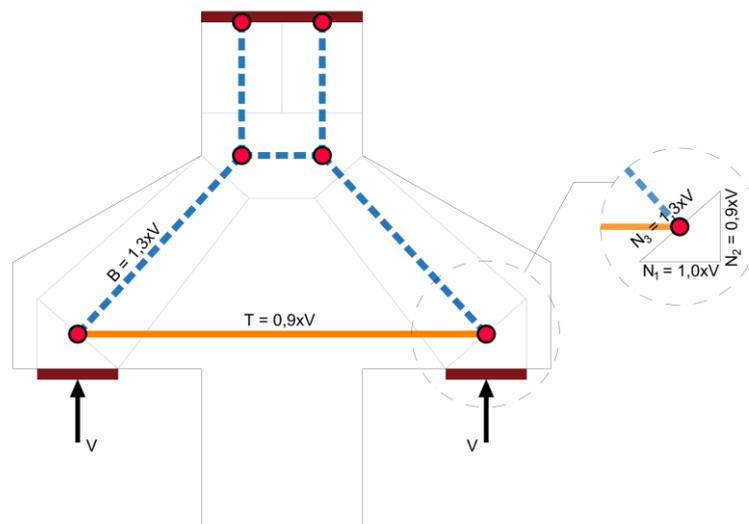


Figura 4.5- Distribuição de esforço na treliça dos consolos reforçados.

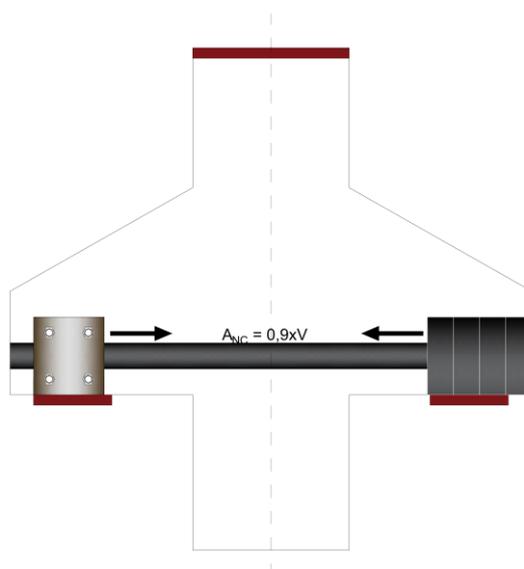


Figura 4.6- Distribuição de esforço para a ancoragem.

A Figura 4.7 ilustra as áreas alvo da análise. Considerando a distribuição de esforços, serão calculados os cortantes que resultariam no colapso de cada um dos elementos verificados, sendo eles o tirante (T), a biela (B), o nó CCT (N) e as ancoragens (A_{nc}).



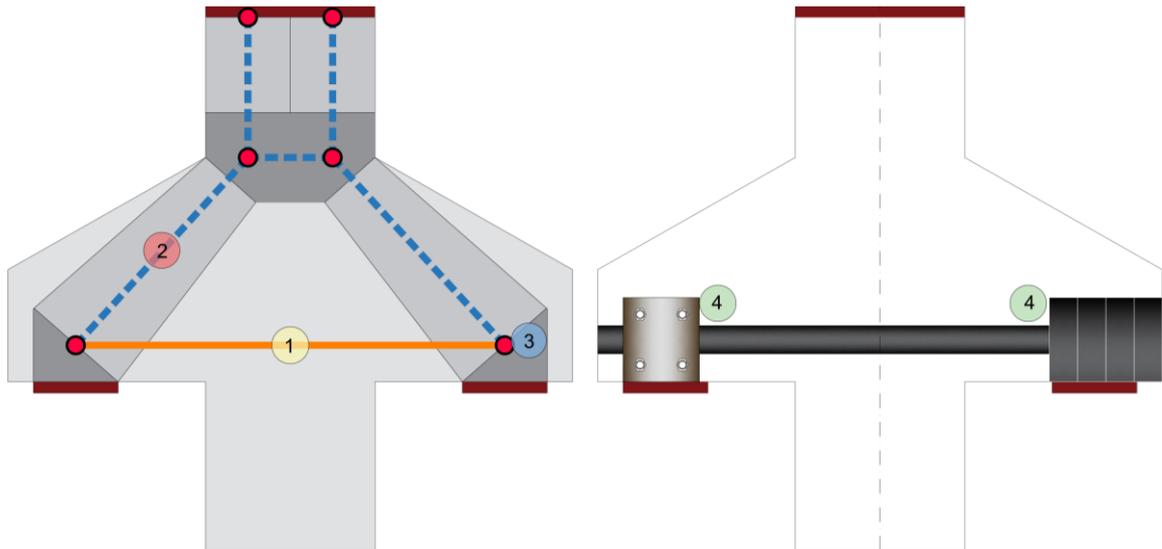


Figura 4.7- Zonas escolhidas para análise.

Para os consolos de referência, será considerado o menor cortante obtido entre o tirante (Equação 4.2), a biela principal inclinada (Equação 4.3) e pelo nó (Equação 4.4).

$$V_{u,T} = \frac{(A_s \times f_y)}{0,8} \quad (4.2)$$

$$V_{u,B} = \frac{b_w \times w_s \times f_{cm}}{1,4} \quad (4.3)$$

$$V_{u,N} = \begin{cases} \frac{W_{n1} \times b_w \times f_{cm}}{0,8} \\ \frac{W_{n2} \times b_w \times f_{cm}}{0,8} \\ \frac{W_{n3} \times b_w \times f_{cm}}{1,4} \end{cases} \quad (4.4)$$

Onde:

b_w é a largura dos consolos;

w_s é a menor largura da biela;

W_n é a largura de cada face nodal;

f_{cm} é a resistência a compressão média;

Para os espécimes reforçados, a resultante do tirante, leva em consideração a contribuição do reforço e a distribuição de tensões, conforme Equação 4.5. O limite



mínimo será a resultante da deformação de descolamento calculada, enquanto o limite máximo é o resultado da deformação de ruptura do PRFC.

$$V_{u,T} = \frac{((A_s \times f_y) + (A_f \times f_f))}{0,9} \quad (4.5)$$

Sendo:

$$f_f = \begin{cases} E_f \times \varepsilon_{fd} \\ E_f \times \varepsilon_{fe} \end{cases}$$

Para a biela dos reforçados, o procedimento é realizado de maneira semelhante ao de referência. Já para as ancoragens, foram considerados os modos de ruptura que podem ocorrer, sendo eles: o corte do parafuso; ruptura por *pryout*; ruptura da chapa de aço; escorregamento entre o laminado e a chapa de aço; e, no caso da segunda ancoragem, o descolamento da ancoragem, demonstrados na Equação 4.6. Vale ressaltar que, as equações detalhadas foram mostradas no Item 3 deste trabalho.

$$V_{u,Anc} = \begin{cases} \frac{V_{sa} \times 4(\text{parafusos}) \times 2(\text{ancoragens})}{0,9} \\ \frac{V_{cp} \times 2(\text{ancoragens})}{0,9} \\ \frac{N_{t,Rd} \times 2(\text{ancoragens})}{0,9} \\ \frac{\sigma_{escorregamento} \times A_{cont} \times 2(\text{ancoragens})}{0,9} \\ \frac{f_{td} \times A_{anc} \times 2(\text{ancoragens})}{0,9} \end{cases} \quad (4.6)$$

Onde:

V_{sa} é a força resistente ao corte de um parafuso;

V_{cp} é a força resistente ao *pryout*;

$N_{t,Rd}$ é a menor força entre o escoamento da seção bruta da chapa e a ruptura da seção líquida;

$\sigma_{escor.}$ é a resistência adesiva a tração, mínima de 15 MPa segundo o fabricante;

A_{cont} é a área de contato entre a chapa e o laminado, sendo de 135mm x 50 mm;

A_{anc} é a área aumentada pela ancoragem, considerando a espessura do laminado;



5. RESULTADOS

5.2. Deslocamento Vertical

Os resultados de carga x deslocamento dos consolos são apresentados na Figura 5.1, considerando as duas taxas de armadura de flexão (ρ_s). Para cada caso, são ilustrados e comparados os resultados com os valores dos espécimes de referência, onde o modelo A é com ancoragem híbrida, enquanto o modelo B é a ancoragem com lâmina colada transversalmente. Conforme descrito no programa experimental, o deslocamento vertical foi monitorado no centro dos consolos, com um potenciômetro fixo em um dispositivo *yoke*.

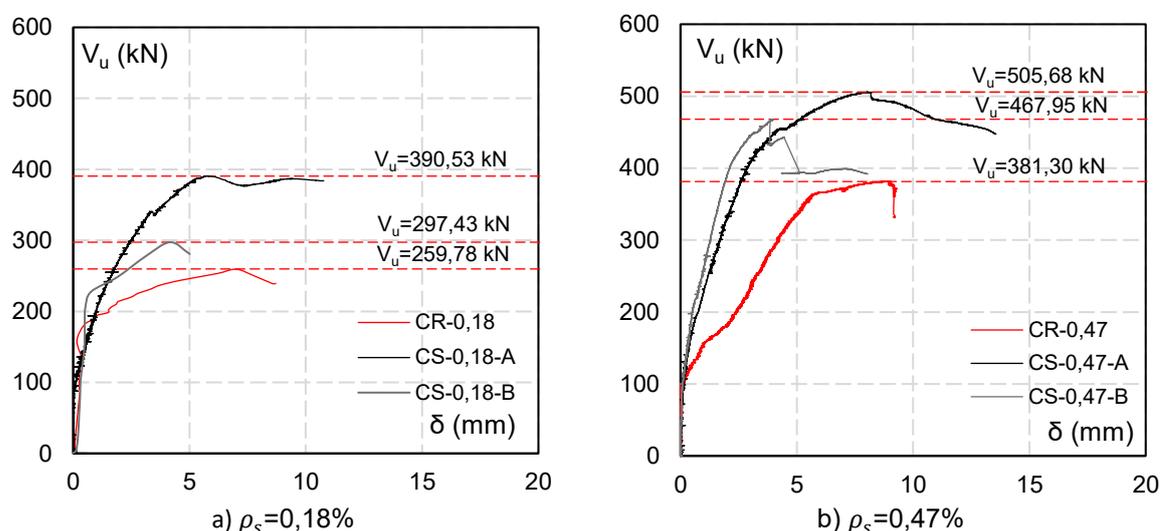


Figura 5.1- Carga-deslocamento dos consolos conforme taxa da armadura principal.

Os gráficos mostram que foram obtidos maiores deslocamentos para os consolos com taxa (ρ_s) de 0,47%. Além disso, foi verificado que, após a carga de pico, os consolos reforçados e com sistema de ancoragem híbrida, apresentaram maiores valores de deflexão, em relação ao modelo de referência, independente da taxa de armadura de flexão. Esse comportamento não foi perceptível nos espécimes com ancoragem transversal de PRFC, que apresentou uma resposta mais rígida em ambos os casos.

Até o início da fissuração, o comportamento foi semelhante para todos os espécimes, no entanto, após essa etapa, a contribuição do reforço é considerável, permitindo maior incremento capacidade resistente. A utilização da ancoragem híbrida se mostrou mais favorável, tanto em termos de carregamento, quanto nos valores de deslocamento após a carga máxima.



5.3. Deformação dos Materiais

5.3.1. Laminado de PRFC

Na Figura 5.2 são ilustrados os resultados de deformação no laminado, considerando os cinco pontos de monitoramento em cada consolo. Vale ressaltar que, a deformação de descolamento (ε_{fd}) calculada pelo ACI 440.2R (2017) era de 5,2 ‰, considerando as prescrições descritas anteriormente neste trabalho e os valores do fabricante.

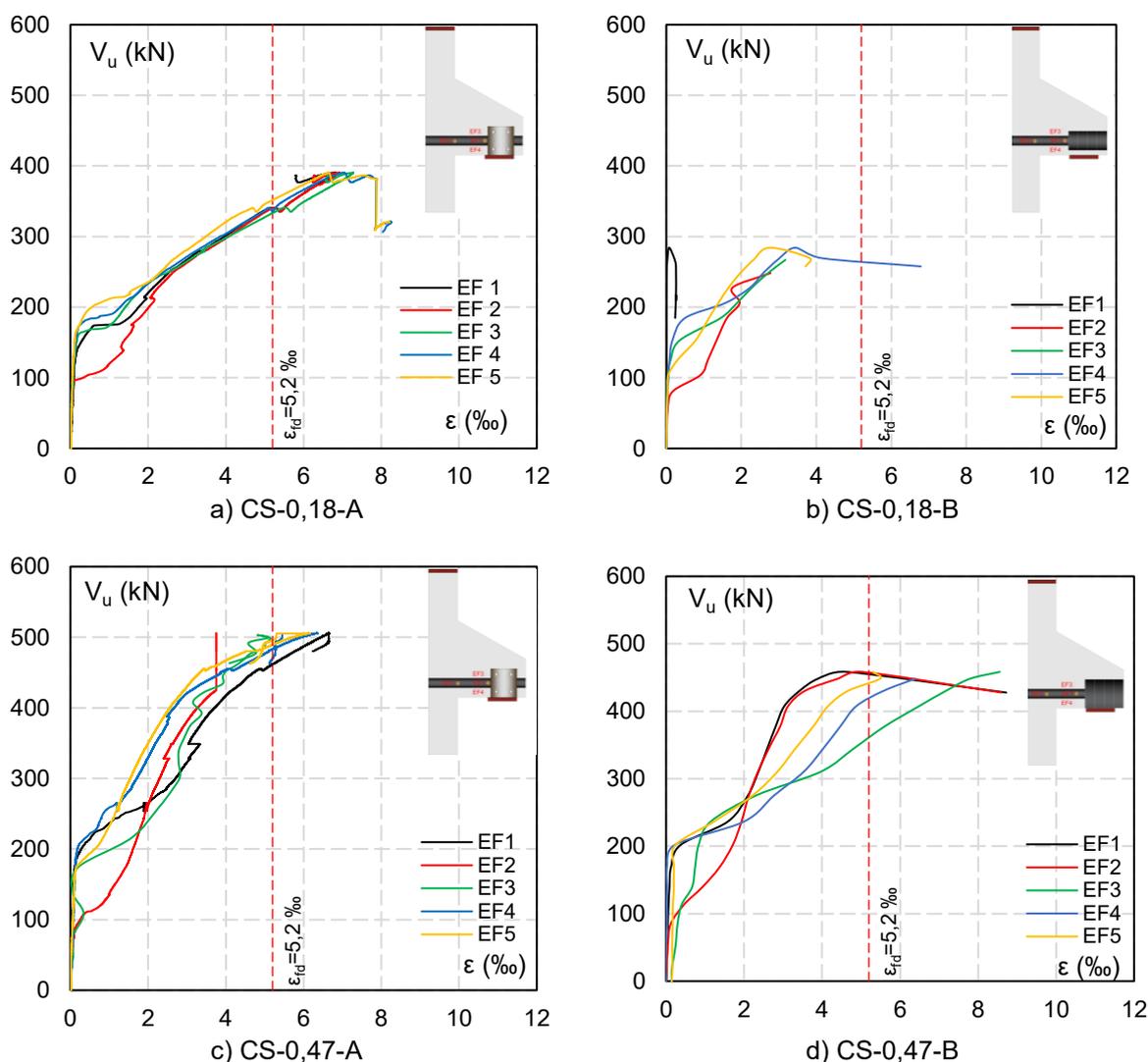


Figura 5.2- Deformação no laminado de PRFC.

Em todos os modelos, é possível avaliar que o reforço começa a ser solicitado após o início da fissuração. Logo, as deformações passam a ser significativas no ponto EF2, devido ser posicionado entre o pilar e o consolo (região de fissuras a flexão),



para todos os espécimes e, conforme o acréscimo de carregamento, a solicitação nas regiões próximas as ancoragens começam a surgir, aumentando gradativamente.

Apesar do início das solicitações ser diferente, os pontos de monitoramento começam a convergir em deformações a partir 2‰, quando passam a ser observados descolamentos ao longo do laminado, primeiro na região central se propagando para as extremidades, diferente do valor de deformação de descolamento estimado pelo ACI 440.2R (2017). Para o sistema de ancoragem com chapas e parafusos, em ambas as taxas de armadura de flexão, foi notado uma queda sutil de carregamento próximo de 5‰, que demonstra, naquele momento, o descolamento total do laminado e a fixação apenas nas ancoragens. No entanto, esse tipo de ancoragem apresentou boa resistência e aderência, permitindo que o laminado se mantivesse fixo nas extremidades e fosse capaz de ainda alcançar maiores deformações.

Já a ancoragem com laminado transversal, apesar de apresentar o mesmo comportamento nas cargas iniciais, houve o descolamento de maneira abrupta do conjunto reforço e ancoragem, quando as solicitações alcançam níveis elevados. Dessa forma, é possível concluir que o sistema de ancoragem teve influência direta no incremento de resistência. Já a taxa de armadura de flexão, demonstrou influência apenas para o sistema com ancoragem transversal, permitindo maiores deformações do laminado do consolo com 0,47% de armadura de flexão.

5.3.2. Aço e Concreto

Neste tópico serão apresentados os gráficos de deformação obtidos por meio de extensômetros instalados nas armaduras ao longo da região entre o consolo e o pilar. Além disso, para comparar as deformações ao longo do carregamento, apresenta o monitoramento do concreto, pelo extensômetro inclinado EC7, e do laminado pelo EF2, que estava posicionado na mesma região de monitoramento da armadura principal. Além disso, as linhas vermelhas tracejadas na vertical representam as deformações limite para o concreto, pela ABNT NBR 6118 (2023), e para o aço da armadura principal.

Na Figura 5.3 estão detalhados os resultados referentes aos consolos de referência, que foram monitorados apenas na armadura principal e no concreto. Conforme Figura 5.3a é possível analisar o comportamento do consolo com menor taxa de armadura de flexão (CR-18), enquanto na Figura 5.3b essa verificação é



realizada em níveis de carregamento, a cada 20% de aplicação. É verificado que, após a primeira fissura, aço e concreto passam a obter valores consideráveis de deformação. No entanto, a armadura principal atingiu o limite de escoamento primeiro, enquanto o concreto ainda estava com valores mínimos de deformação, caracterizando a ruptura por flexão. Após a armadura principal escoar, o ensaio prosseguiu até uma carga máxima de 259,78 kN, quando houve ruptura da armadura principal.

Já na Figura 5.3c e Figura 5.3d, considerando os resultados do consolo com taxa de 0,47% (CR-0,47), o comportamento foi semelhante ao primeiro, com ruptura do modelo por flexão com escoamento da barra de aço principal. O ensaio foi finalizado quando foi atingida a ruína por esmagamento do concreto, na região entre o consolo e o pilar, com um cortante de 381,30 kN.

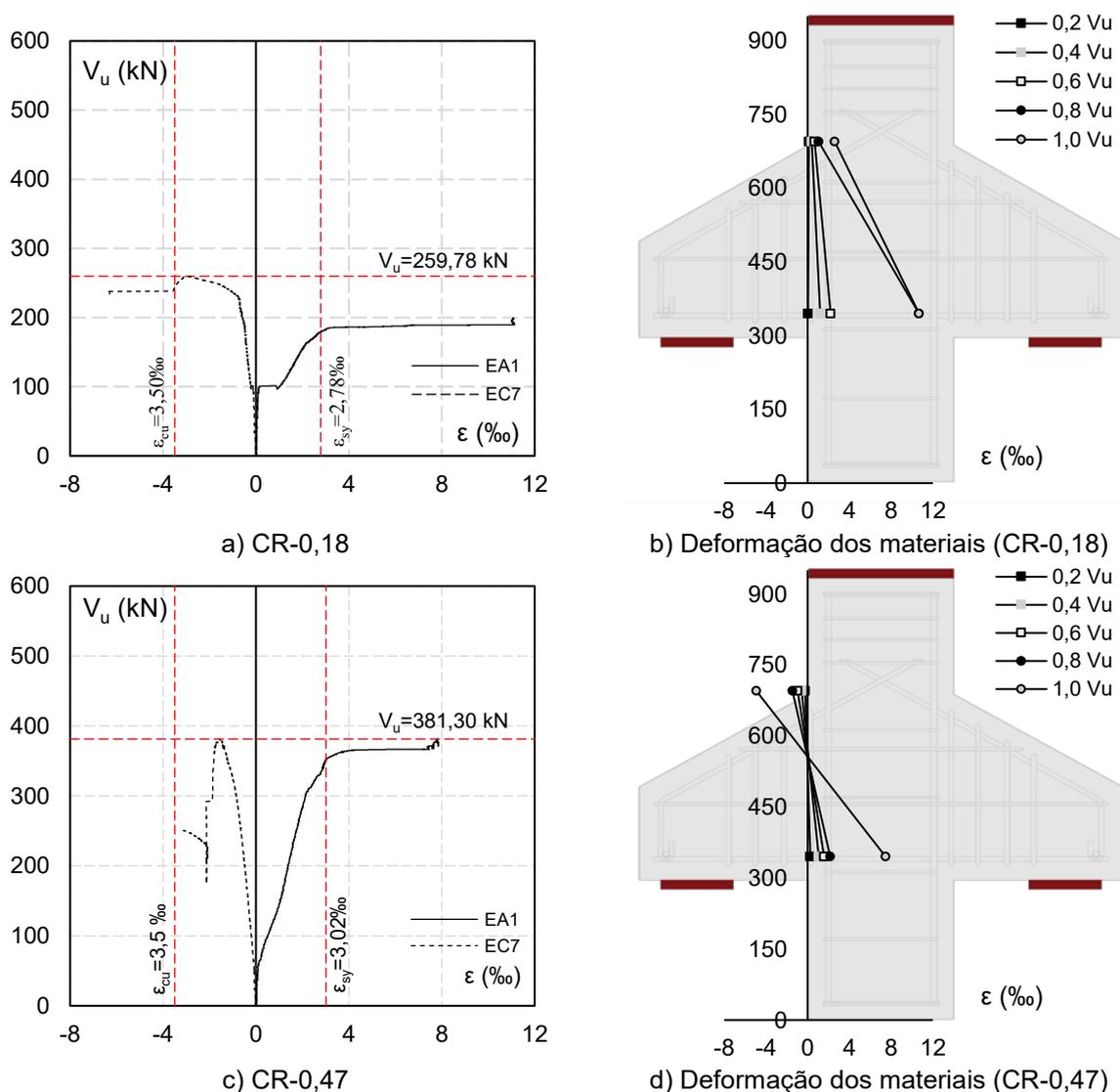
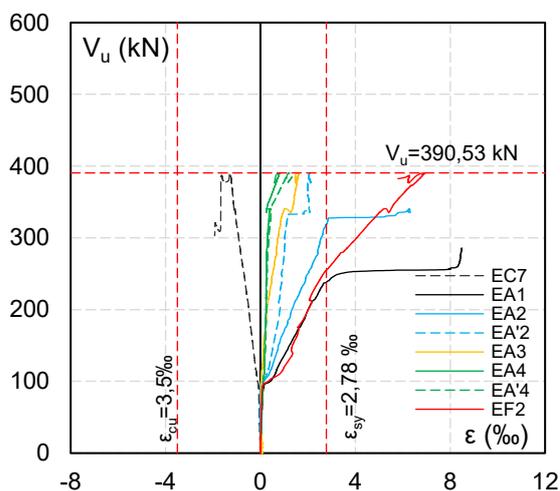


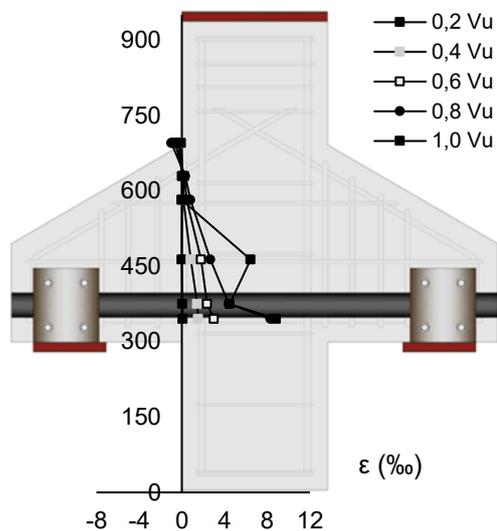
Figura 5.3- Deformação dos materiais para os consolos de referência.



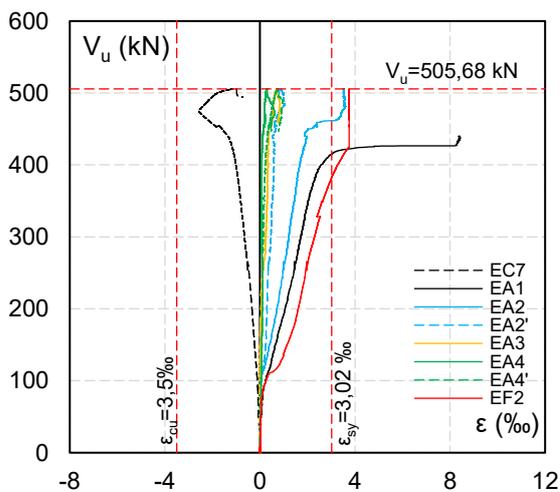
O comportamento dos materiais nos consolos reforçados e ancorados com chapa de aço e parafusos são ilustrados na Figura 5.4. Nesse caso, foram acrescentados o monitoramento das armaduras na linha entre o consolo e o pilar.



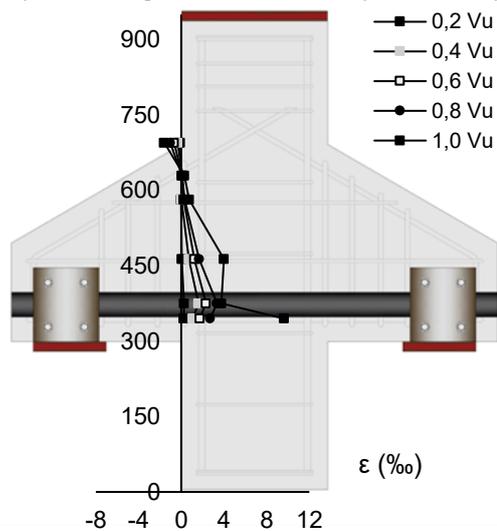
a) CS-0,18-A



b) Deformação dos materiais (CS-0,18-A)



c) CS-0,47-A



d) Deformação dos materiais (CS-0,47-A)

Figura 5.4- Deformação dos materiais para os consolos reforçados e com ancoragem híbrida.

Na Figura 5.4a e Figura 5.4b são demonstrados os valores de deformação para o modelo com taxa de armadura de 0,18% (CS-0,18-A). É analisado que o aço da armadura principal e o laminado apresentam comportamento semelhante, trabalhando em conjunto, até ao limite de escoamento da barra de aço. Após a ruptura do consolo por flexão, o laminado continua alcançando maiores valores de deformação e o concreto começa a esmagar. Nesse ponto, o espécime apresentava



uma fissura que iniciava no canto do pilar até o canto do sistema de ancoragem, fissura essa que avançou rapidamente, resultando no deslocamento do sistema de ancoragem inteiro, inclusive concreto. Esse modo de ruína é caracterizado como *pryout* e ocorreu com 390,53 kN, resultando na finalização do ensaio.

Para o consolo CS-0,47-A, seu comportamento é descrito na Figura 5.4c e na Figura 5.4d. De forma semelhante ao consolo anterior, a ruptura é caracterizada pelo escoamento do aço. O modelo apresentou a mesma fissura de *pryout*, no entanto, quando este ocorreu, o esmagamento do concreto já havia provocado a queda do carregamento após 505,68 kN.

A Figura 5.5 compreende o comportamento do segundo sistema de ancoragem, sendo os pontos de monitoramento iguais ao sistema híbrido.

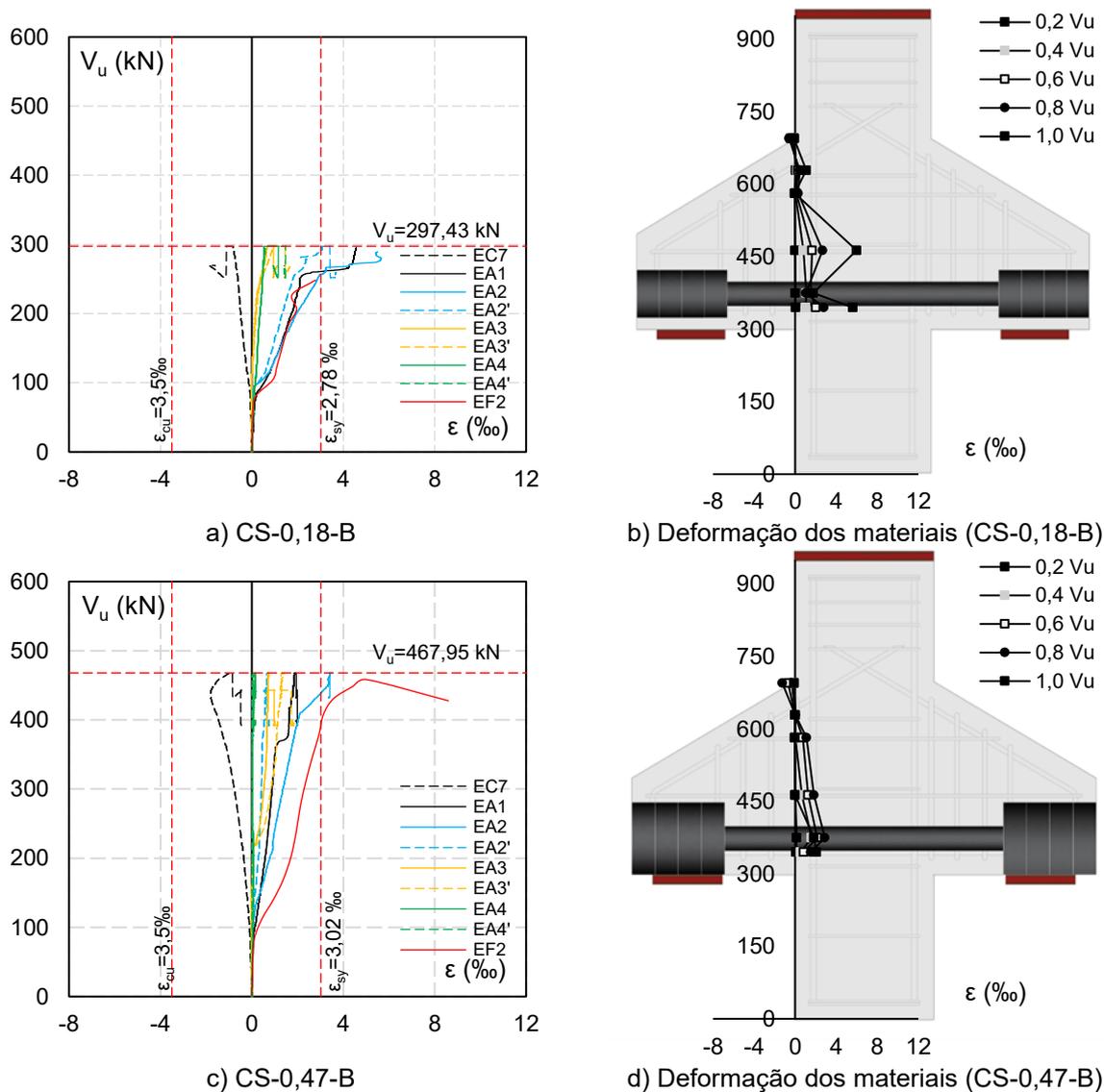


Figura 5.5- Deformação dos materiais para os consolos reforçados e com ancoragem com laminado colado transversalmente.



Na Figura 5.5a e Figura 5.5b são apresentadas as deformações dos materiais no consolo com armadura principal de 10 mm (CS-0,18-B), sendo possível verificar uma ruptura também por flexão. Vale ressaltar que, nesse caso, o estribo horizontal monitorado acima do tirante apresentou valores significativos de deformação, quando comparados com as peças anteriores, enquanto a fibra alcançou menores valores. O ensaio foi interrompido quando o reforço e o sistema de ancoragem descolaram em conjunto em uma das extremidades, com um cortante de 297,43 kN.

Para o consolo CS-0,47-B, os valores de deformação são demonstradas na Figura 5.5c e Figura 5.5d. Uma observação para esse modelo é que a área de ancoragem foi maior, para tentar obter maior incremento de resistência, sendo observado que a maior área seria favorável nas duas taxas de armadura de flexão, pois permitiu maiores deformações da fibra. Diferente dos demais consolos, a armadura principal não chegou ao seu limite de escoamento.

Nesse caso, o modelo apresentou uma fissura característica de cisalhamento e o ensaio foi interrompido com uma queda brusca do carregamento quando o reforço e o sistema de ancoragem descolaram, em 467,95 kN.

5.4. Abertura de Fissuras

Os gráficos deste item apresentam o comportamento referente ao monitoramento da abertura de fissuras, através de quatro potenciômetros ao longo da linha entre o pilar e o consolo.

Para os consolos de referência, os valores são detalhados na Figura 5.6, com ilustração dessa abertura em diferentes níveis de carregamento. Nesse caso, ambos os consolos foram caracterizados por fissuras de tração, que iniciaram próximas de 200 kN e aumentaram com a aplicação de carga. Os maiores valores obtidos foram monitorados na posição do PT1 e os menores pelo PT4.

A taxa de armadura de flexão não demonstrou ter grande influência na abertura de fissuras até a carga máxima, com os pontos PT2, PT3 e PT4 apresentando valores próximos, mesmo o CR-0,47 obtendo maior carga última. A principal diferença foi na leitura do PT1, que apresentou maiores valores para o CR-0,47 no carregamento máximo.



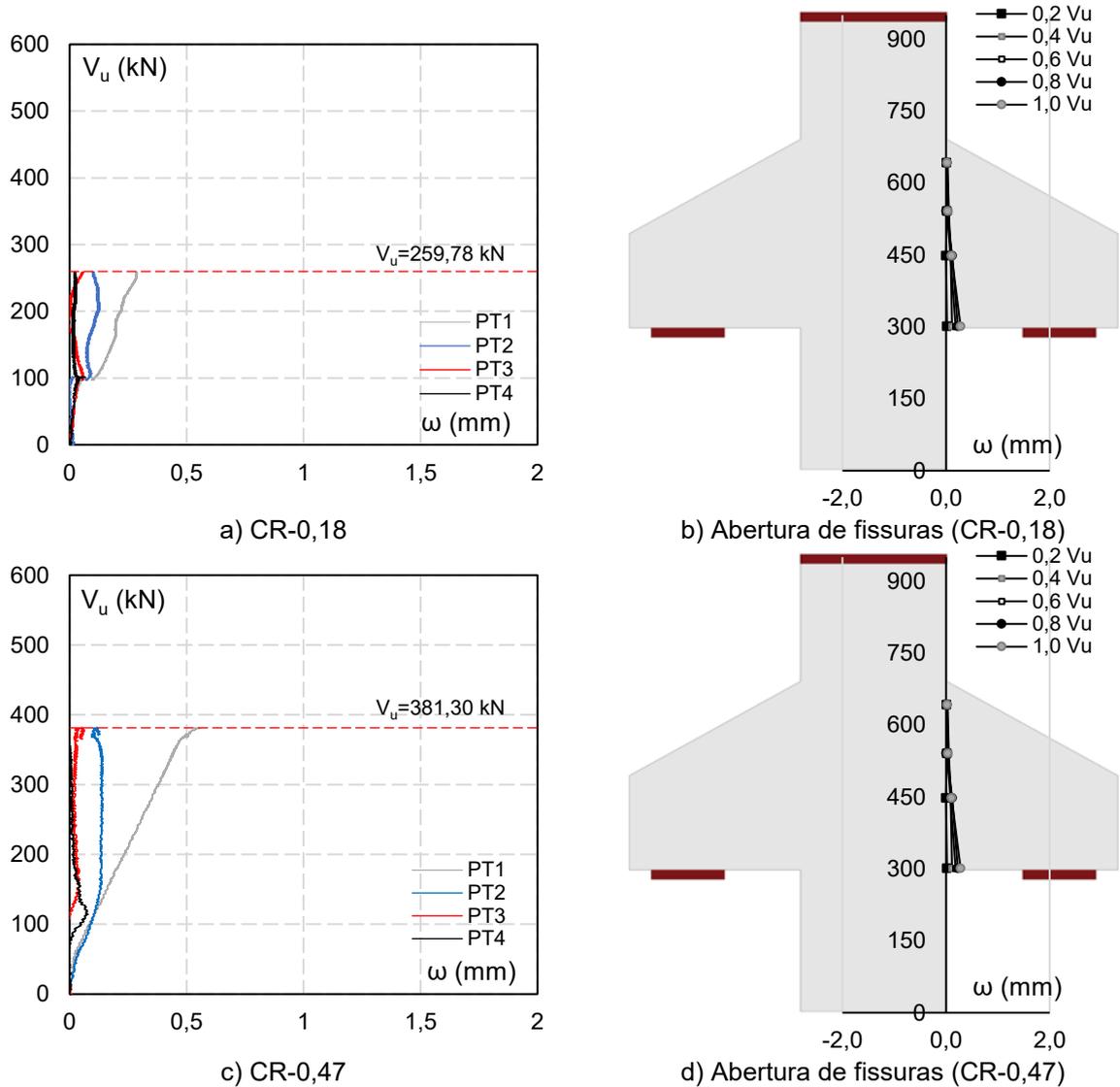


Figura 5.6- Abertura de fissuras para os consolos de referência.

Na Figura 5.7 são apresentados os valores obtidos para os consolos reforçados e ancorados com chapa de aço e parafusos. Esse sistema demonstrou influência na carga de primeira fissura, que foi de 111,23 kN para o CS-0,18-A e de 122,99 kN para o CS-0,47-A, um aumento de 24,8% e 23,9% em relação aos de referência, respectivamente. A região monitorada apresentou maiores valores de abertura de fissura, com maior solicitação na região central PT2 e PT3, diferente dos de referência. As fissuras inclinadas partindo do canto do pilar explicam essa maior leitura nos potenciômetros do meio. Além disso, a abertura verificada pelo PT1 não apresentou grandes variações ao longo do ensaio.

Em relação à taxa de armadura de flexão, ambos os consolos apresentaram o comportamento semelhante, mesmo em valores de carregamento diferentes. A maior



influência foi do método de reforço e ancoragem, que mudaram o padrão de fissuração dos modelos para a região mais central.

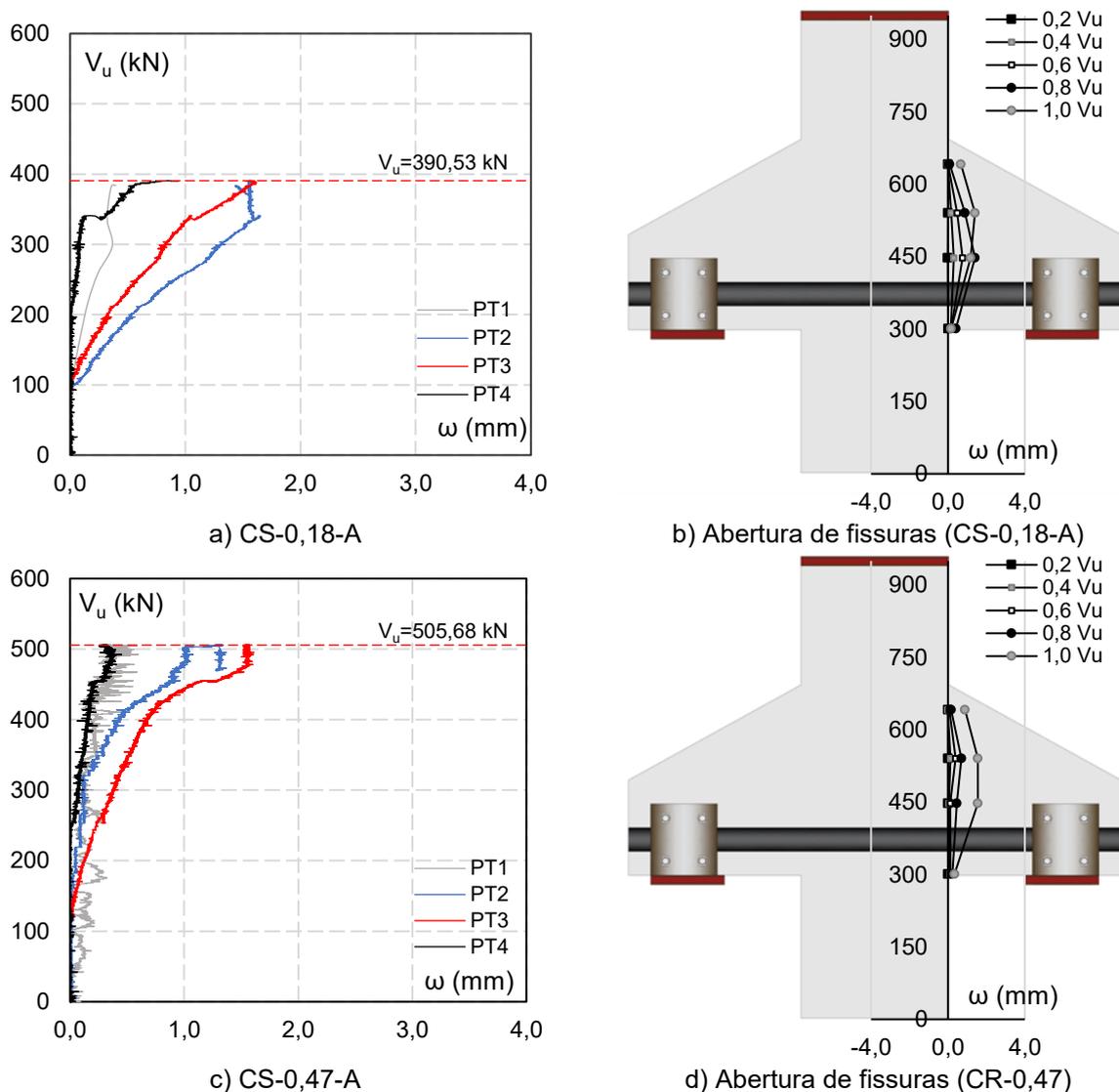
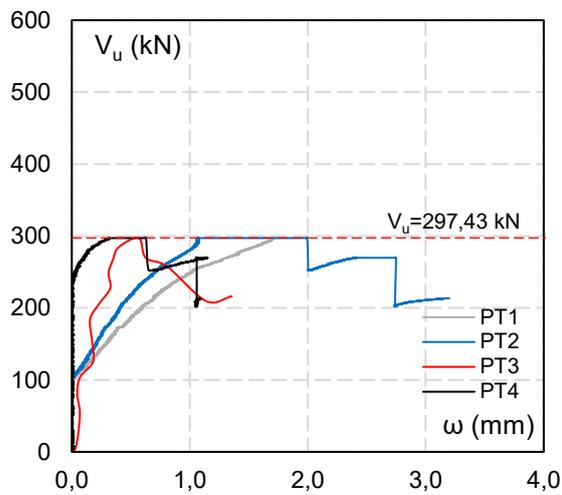


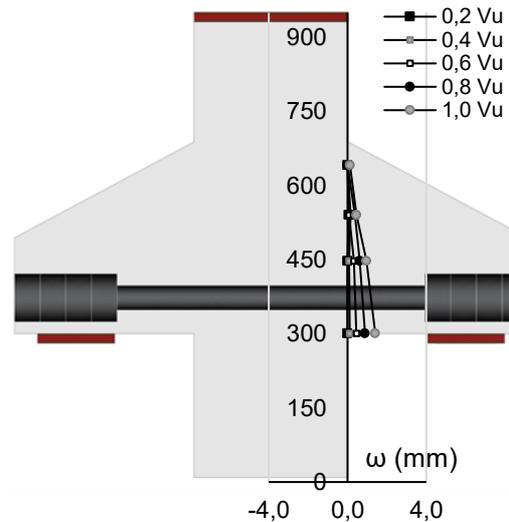
Figura 5.7- Abertura de fissuras para os consolos reforçados e com ancoragem híbrida.

Para o segundo sistema de ancoragem, o comportamento referente à abertura de fissura é detalhado na Figura 5.8. Diferente dos demais modelos, o comportamento divergiu para as duas taxas de armadura, sendo observado para o CS-0,18-B maiores valores no PT1 e PT2. Já para o CS-0,47-B, a região central foi mais solicitada, com valores descritos pelo PT2 e PT3, como resultado do padrão de fissuração deste modelo. Em relação a carga de primeira fissura, não foi verificada uma diferença significativa em relação ao consolo de referência, com cortantes de 85,02 kN para o CS-0,18-B e de 99,72 kN para o CS-0,47-B.

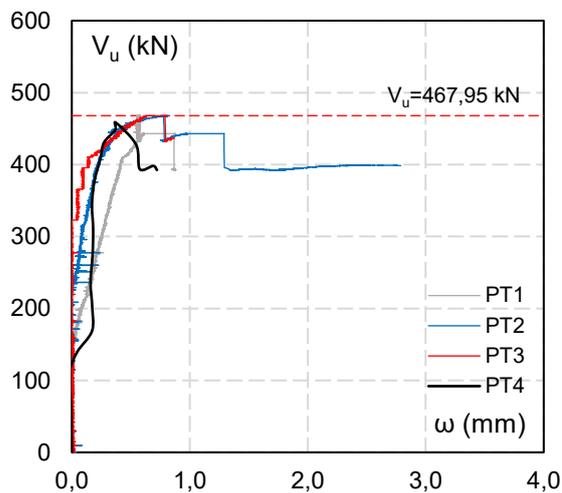




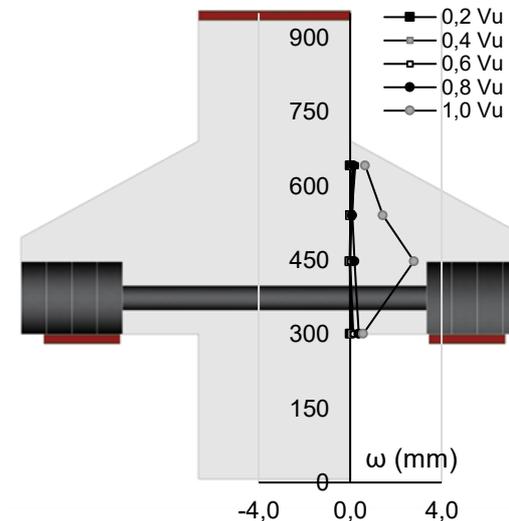
a) CS-0,18-B



b) Abertura de fissuras (CS-0,18-B)



c) CS-0,47-B



d) Abertura de fissuras (CS-0,47-B)

Figura 5.8- Abertura de fissuras para os consolos reforçados e com ancoragem com laminado colado transversalmente.

5.5. Deformações no Bloco de Compressão

Para o monitoramento das deformações do concreto, foram utilizados extensômetros na região do bloco de compressão dos consolos. Para o espécime CR-0,18 foram verificados cinco pontos de leitura, sendo possível analisar a posição onde os esforços passam de tração para compressão ao longo da altura monitorada. No consolo CR-47 foi acrescentado mais uma leitura, buscando avaliar com maior precisão a variação das deformações no concreto. Nos dois modelos de referência apresentados na Figura 5.9, as maiores tensões de compressão foram no ponto EC4.



Dessa forma, o comportamento esteve de acordo com o sistema de treliça idealizado pelo método de bielas e tirantes proposto.

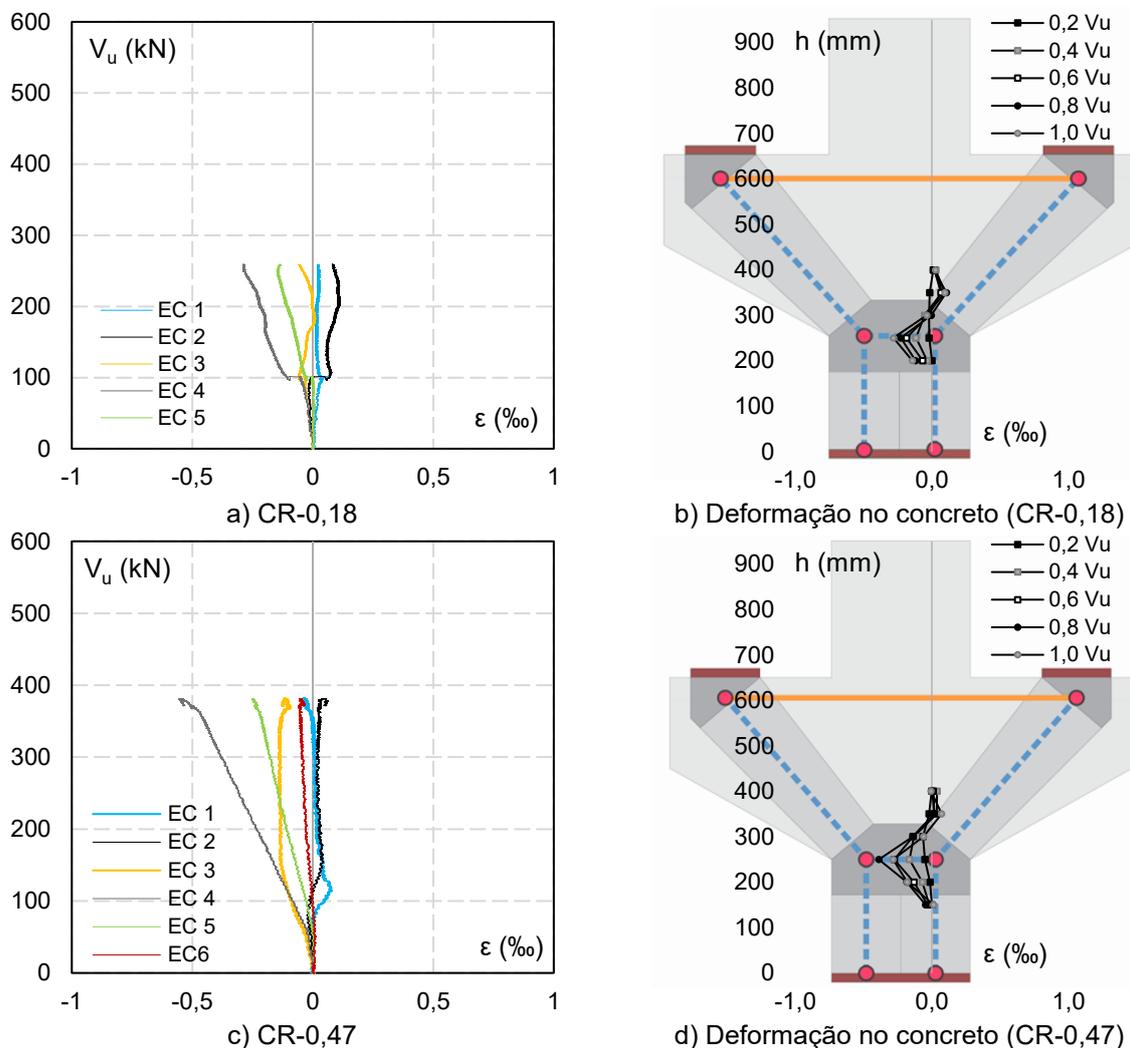


Figura 5.9- Deformação na zona de compressão dos consolos de referência.

Para os consolos reforçados, os pontos de monitoramento foram reduzidos para quatro, visando restringir apenas a leitura da zona de compressão. Na Figura 5.10 são ilustrados os resultados para os consolos com ancoragem híbrida. Assim como no de referência, a maior leitura foi no EC4, não sendo observado influência considerável da taxa de armadura de flexão nas deformações do concreto nessa região.

No entanto, ainda em relação aos de referência, o reforço permitiu valores de deformação mais elevados de compressão, resultado da maior força necessária para resistir aos esforços de tração, que somam a área de aço e a área da fibra. Cabe



destacar que o EC6 do consolo CS-0,47-A foi perdido durante o ensaio, pois não apresentou leituras, sendo descartado na apresentação dos resultados.

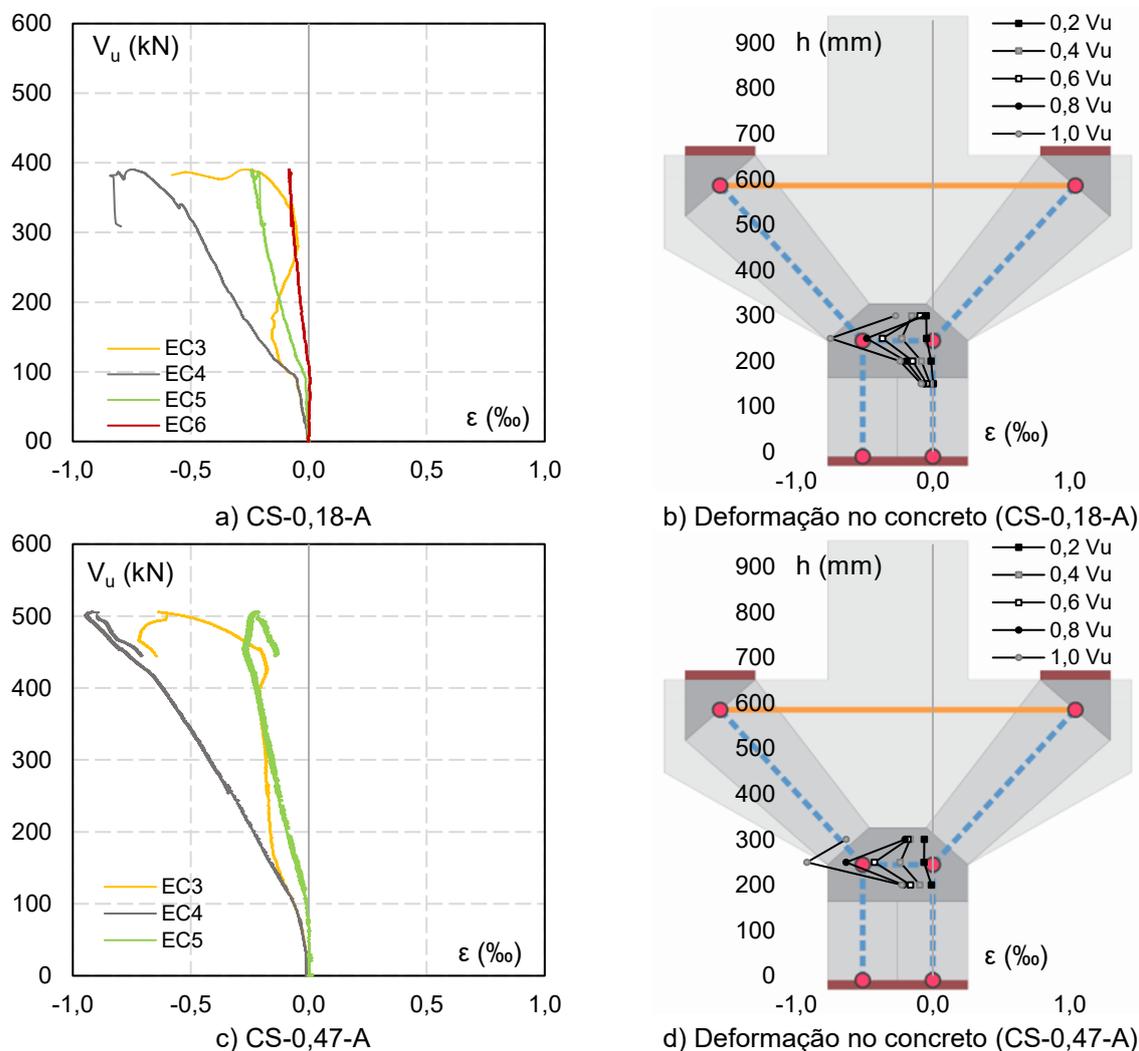
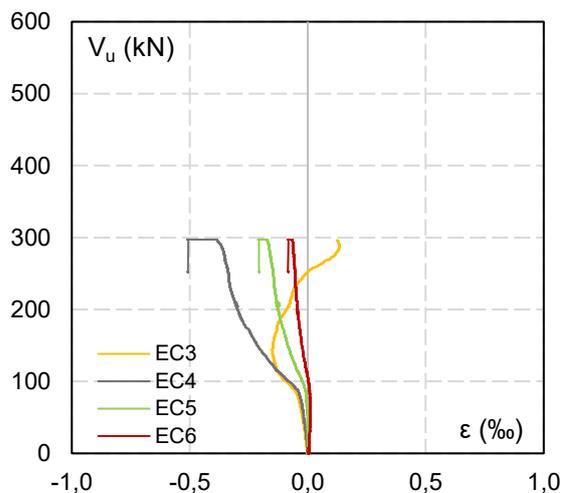


Figura 5.10- Deformação na zona de compressão dos consolos reforçados e com ancoragem híbrida.

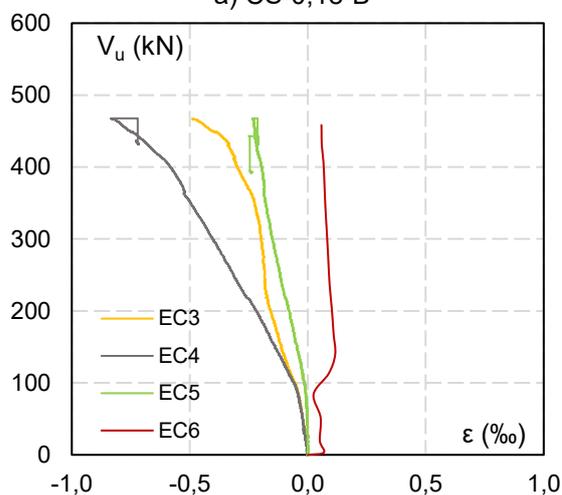
A Figura 5.11 ilustra os valores obtidos na análise dos consolos com sistema de ancoragem com colagem transversal. Nesse caso, a taxa de armadura de flexão de 0,47% permitiu valores mais elevados de deformação, além de pequenas diferenças no comportamento dos pontos monitorados.

Em comparação aos espécimes de referência, foram atingidos maiores valores de deformação na região verificada. No entanto, o CS-0,18-B teve resultados inferiores ao modelo utilizando ancoragem híbrida.

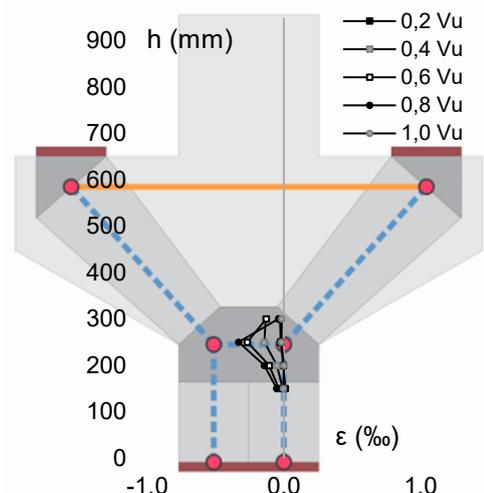




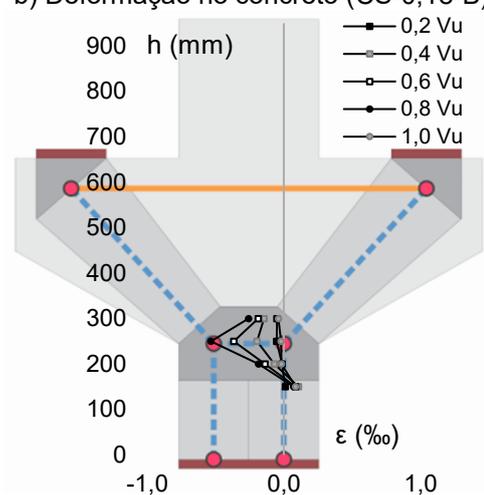
a) CS-0,18-B



c) CS-0,47-B



b) Deformação no concreto (CS-0,18-B)



d) Deformação no concreto (CS-0,47-B)

Figura 5.11- Deformação na zona de compressão dos consolos reforçados e com ancoragem colada transversalmente.

5.6. Escorregamento do Laminado

A Figura 5.12 detalha as análises referentes ao escorregamento do laminado, que ocorrem devido às tensões geradas pelo esforço de tração sobre o laminado serem maiores do que o atrito entre as interfaces da resina, chapa e laminado. Para essa verificação, foram monitorados quatro pontos, descritos no programa experimental deste trabalho. Nesse sentido, os deslocamentos iniciaram de maneira sutil após a primeira fissura de cada consolo. Em seguida, esses valores começam a aumentar com o descolamento do laminado, que são representados por quedas no gráfico. Cada queda representa o descolamento em um ponto, já que ele acontece de maneira gradual, do meio para as extremidades, em todos os espécimes. Em relação



a taxa de armadura de flexão, a de 0,47% obteve maiores valores para o escorregamento, um aumento que também ocorreu na ancoragem híbrida.

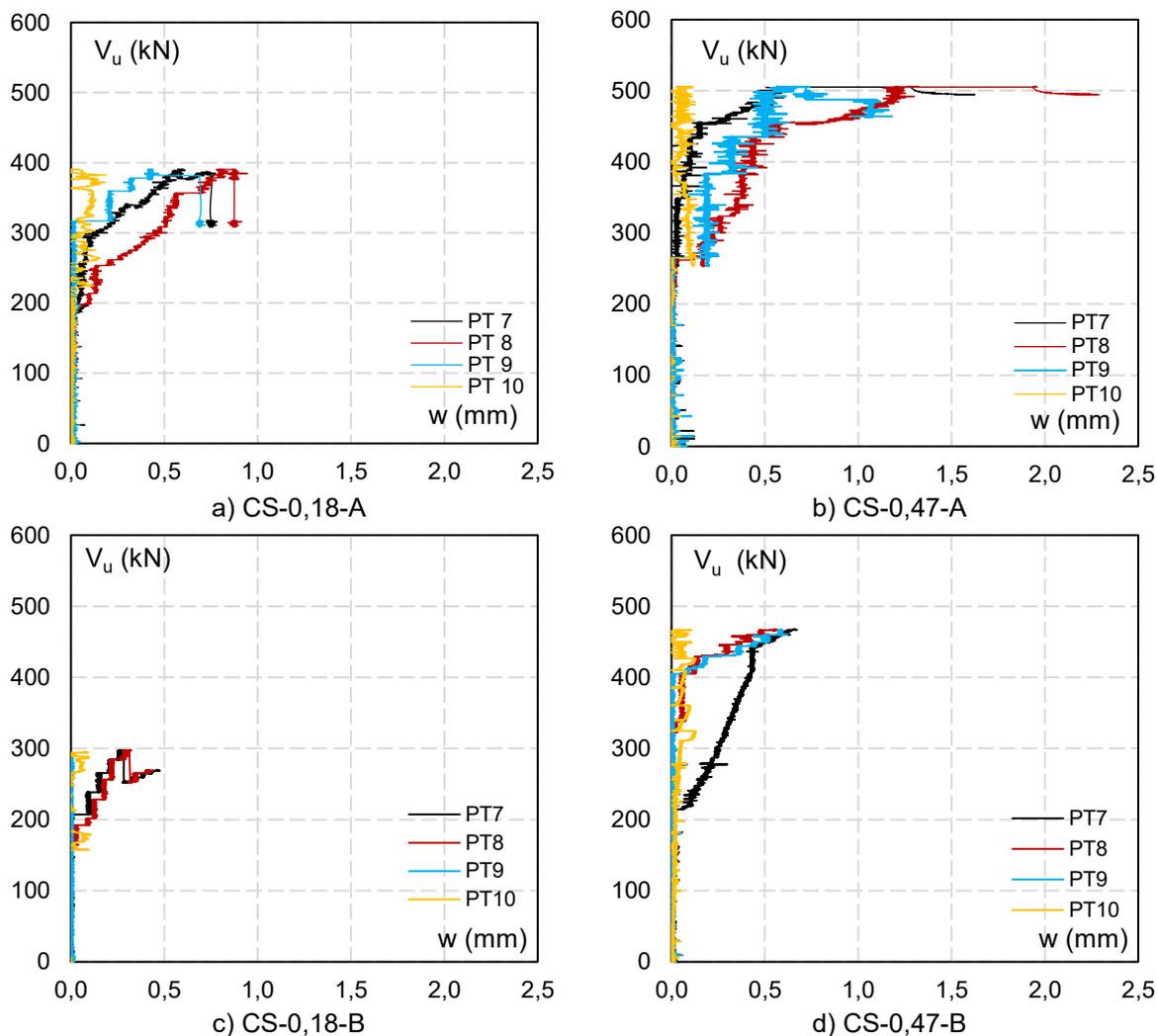


Figura 5.12- Monitoramento do escorregamento do laminado.

5.7. Modos de Ruptura

A Tabela 5.1 apresenta um resumo dos valores máximos obtidos nos seis ensaios. Além disso, detalha o modo de ruptura e a ruína de cada modelo, comparando o incremento de resistência em relação aos consolos de referência.



Tabela 5.1 – Resumo de valores máximos obtidos em ensaios.

Consolo	$\delta_{m\acute{a}x}$ (mm)	V_{cr} (kN)	V_u (kN)	Modo de Ruptura	Ruína	Incremento
CR-0,18	7,78	89,1	259,78	Flexão	Flexão	-
CS-0,18-A	10,76	111,23	390,53	Flexão	Pryout	50,3%
CS-0,18-B	5,48	85,02	297,43	Flexão	Descolamento	14,5%
CR-0,47	9,29	99,23	381,30	Flexão	Esmagamento do Concreto	-
CS-0,47-A	13,28	122,99	505,68	Flexão	Esmagamento do Concreto / Pryout	32,6%
CS-0,47-B	8,96	99,72	467,95	Cisalhamento	Descolamento	22,7%

$\delta_{m\acute{a}x}$ deslocamento máximo;

V_{cr} o cortante de primeira fissura;

V_u é a carga máxima;

Na Figura 5.13 e na Figura 5.14 são ilustrados os dois consolos de referência após a finalização do ensaio. Em ambos os casos, foi verificado ruptura por flexão, com escoamento do aço da armadura principal. O espécime CR-18, apresentou fissuras características da flexão, na linha entre o pilar e o consolo, enquanto para o CR-0,47 também foram verificadas fissuras inclinadas.

Como relatado anteriormente, o ensaio do CR-18 foi interrompido após a ruptura da armadura principal, com queda brusca de carregamento. Já o CR-0,47 foi levado até o esmagamento do concreto.

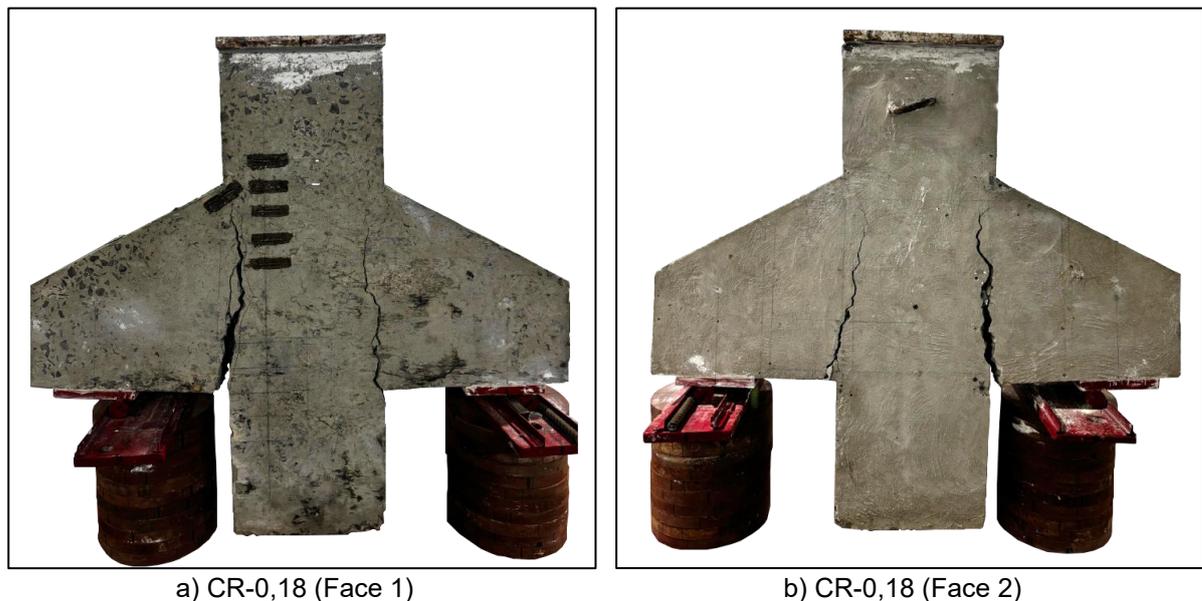
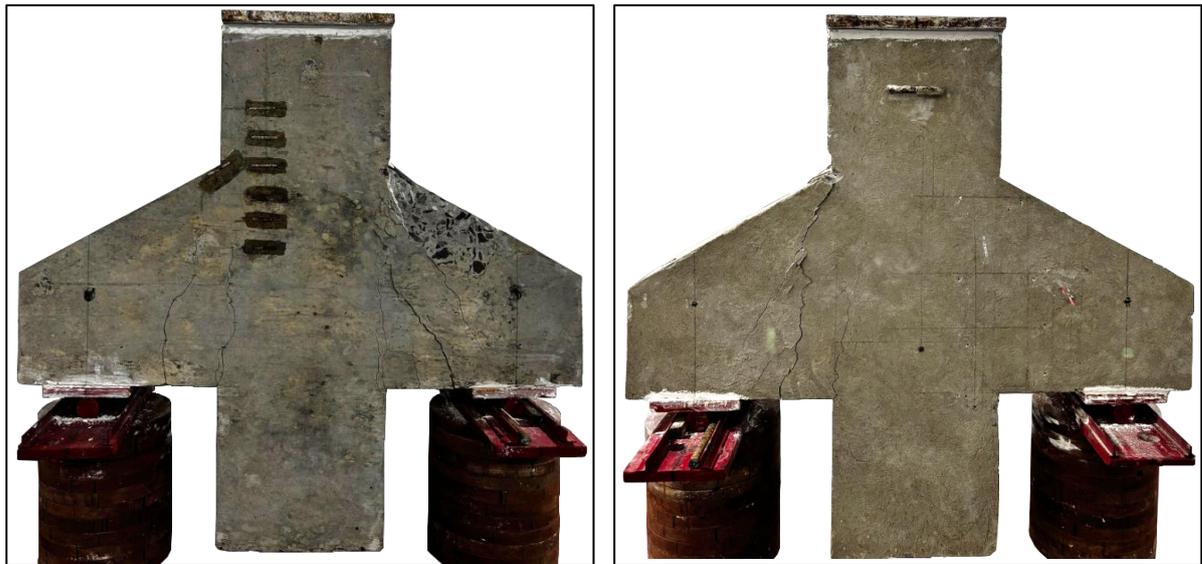


Figura 5.13- Consolo CR-18 pós ensaio.



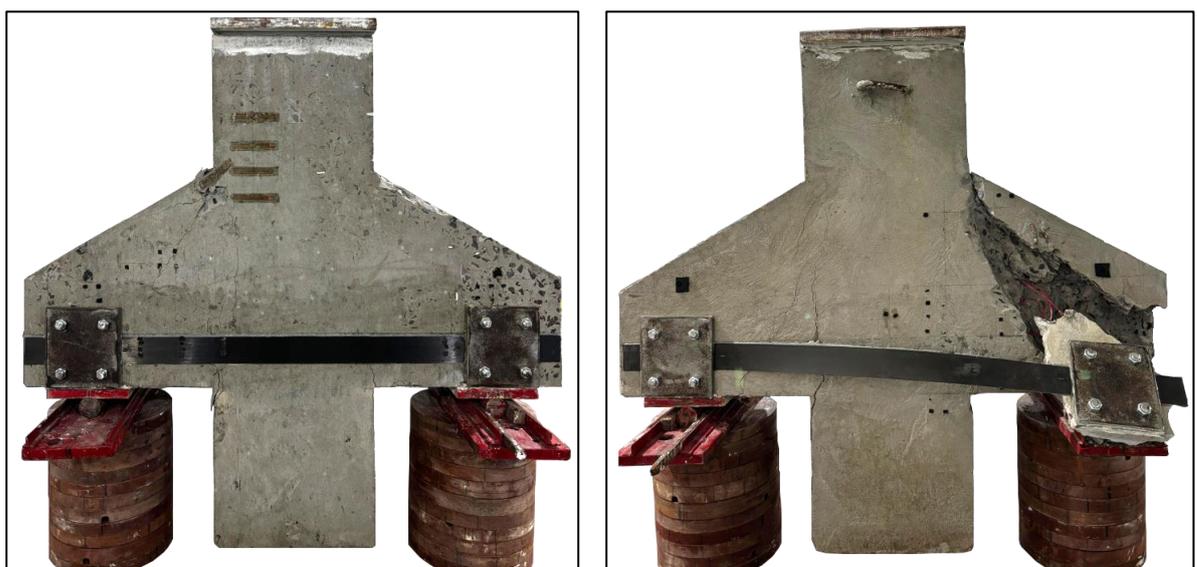


a) CR-0,47 (Face 1)

b) CR-0,47 (Face 2)

Figura 5.14- Consolo CR-0,47 pós ensaio.

Na Figura 5.15 é apresentado o consolo CS-0,18-A após a realização total do ensaio. A ruptura verificada também foi por flexão e o incremento de resistência na carga máxima foi de 50,3% em relação ao de referência. O sistema de ancoragem com chapa de aço e parafusos se mostrou favorável para retardar o descolamento do reforço nas extremidades. A ruína desse consolo aconteceu pelo *pryout*, que arrancou o sistema de ancoragem e todo o bloco de concreto no embutimento de 70 mm do parafuso.



a) CS-0,18-A (Face 1)

b) CS-0,18-A (Face 2)

Figura 5.15- Consolo CS-0,18-A pós ensaio.



Para o CS-0,47-A, ilustrado na Figura 5.16, também houve ruptura por flexão, porém com menor incremento na carga máxima, 32,6%. Apesar de também apresentar o *pryout*, este ocorreu após o pico de carga e, em decorrência do esmagamento do concreto. Na Figura 5.17 pode ser observado o *pryout* em cada um dos modelos.

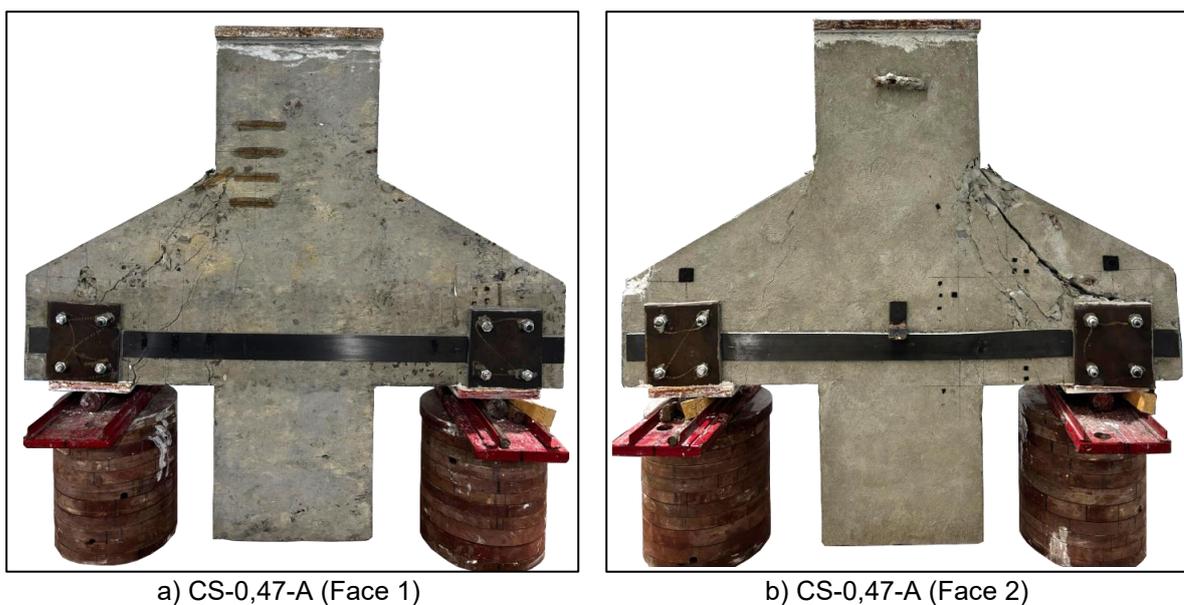


Figura 5.16- Consolo CS-0,47-A pós ensaio.

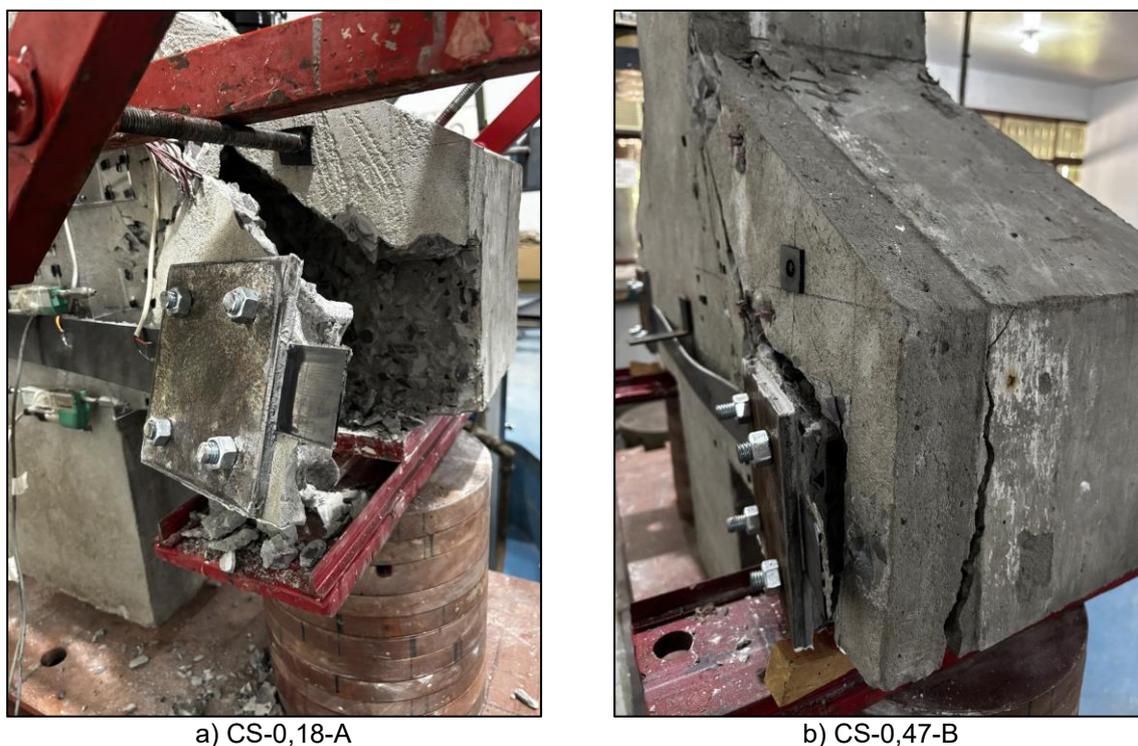


Figura 5.17- Pryout dos consolos com ancoragem híbrida.



Na Figura 5.18 é possível verificar o consolo CS-0,18-B pós finalização de ensaio. O modelo também apresentou ruptura por flexão e incremento de 14,5%, menor que o obtido pelo primeiro sistema de ancoragem. Assim como no de referência, apresentou fissuras características de flexão e obteve carregamento máximo de 297,43 kN, quando o reforço e o sistema de ancoragem descolaram em conjunto em uma das extremidades. Isso ocorreu primeiro em uma das faces e depois na face oposta, quando o ensaio foi paralisado.

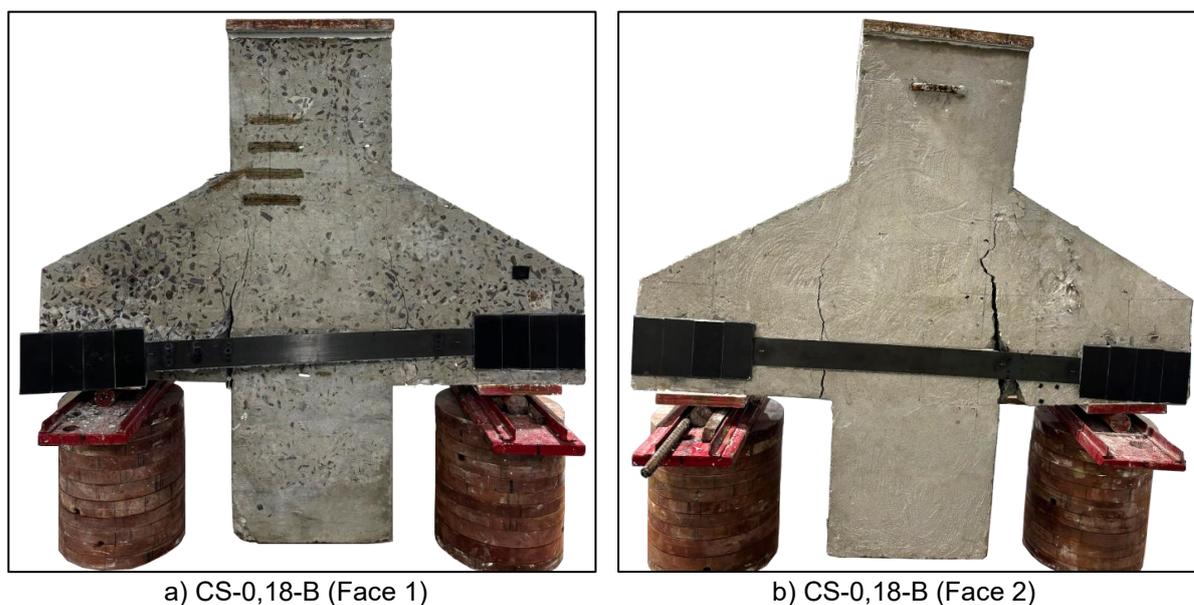


Figura 5.18- Consolo CS-0,18-B pós ensaio.

O consolo CS-0,47-B é apresentado na Figura 5.19 e, diferente dos demais, não foi verificada ruptura por flexão. O modelo obteve incremento de resistência de 22,7% e, apesar do incremento ser menor que o da ancoragem híbrida, o aumento na área da seção de ancoragem se mostrou favorável, em comparação ao CS-0,18-B. A influência da taxa de armadura de flexão foi perceptível na mudança do padrão de fissuração, com fissuras inclinadas, que partiam do canto do pilar ao canto do aparelho de apoio, representando a ruptura por cisalhamento. O ensaio foi interrompido também com o descolamento do sistema de reforço e ancoragem em uma das faces e depois na seguinte, com carga máxima de 467,95 kN. Na Figura 5.20 são ilustrados o padrão de descolamento do reforço dos dois consolos com ancoragem colada transversalmente.





a) CS-0,47-B (Face 1)

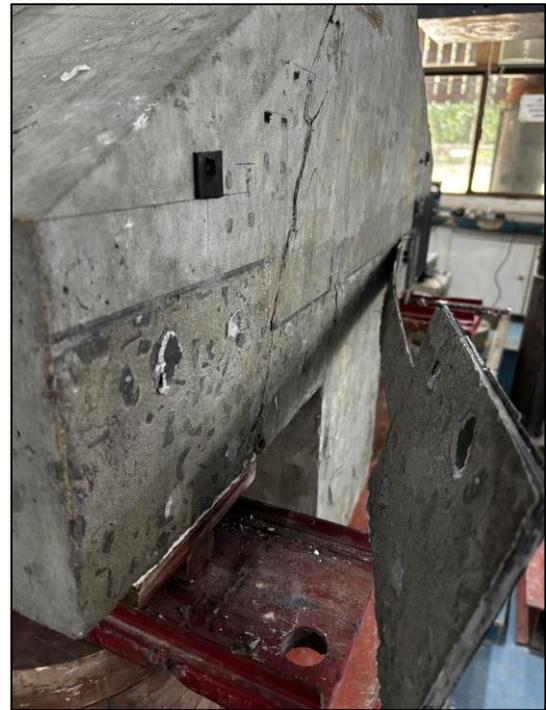


b) CS-0,47-B (Face 2)

Figura 5.19- Consolo CS-0,47-B pós ensaio.



a) CS-0,18-B



b) CS-0,47-B

Figura 5.20- Descolamento do sistema de ancoragem transversal.



5.8. Análise da Previsão Teórica

Para os consolos de referência foi utilizado o valor mínimo entre o obtido pela análise do tirante, da biela e no nó CCT. Já para os consolos reforçados, para a escolha do valor de previsão teórica pelo MBT, foi adotada a hipótese de que o limite mínimo de carregamento seria a resultante do tirante com a deformação de descolamento, pois considera que as ancoragens só começam a ser solicitadas após o descolamento no centro do elemento. Já o limite superior, seria o valor resultante do tirante com a deformação última da fibra. Dessa forma, o intervalo entre esses dois limites é governado pelas possíveis rupturas da ancoragem. A Tabela 5.2 resume os valores obtidos em cada verificação.

Tabela 5.2 – Resumo de valores máximos de previsão pelo MBT.

Consolos	$V_{u,T}$ (kN)		$V_{u,B}$ (kN)	$V_{u,N}$ (kN)	$V_{u,Anc}$ (kN)				
	$V_{u,T1}$	$V_{u,T2}$			$V_{u,Des.}$	$V_{u,Par.}$	$V_{u,Pry.}$	$V_{u,Ch.}$	$V_{u,Esc.}$
CR-0,18	115,91		702,90	631,60	-	-	-	-	-
CS-0,18-A	221,23	409,03	705,26	1110,63	-	271,62	63,91	567,27	225
CS-0,18-B	221,23	409,03	705,26	1110,63	236,40	-	-	-	-
CR-0,47	289,53		702,90	631,60	-	-	-	-	-
CS-0,47-A	375,56	563,36	705,26	1110,63	-	271,62	63,91	567,27	225
CS-0,47-B	375,56	563,36	705,26	1110,63	472,80	-	-	-	-

$V_{u,T1}$ * é o limite mínimo do tirante com descolamento, com a contribuição do aço;

$V_{u,T2}$ * é o limite máximo com ruptura do laminado, com a contribuição do aço;

$V_{u,B}$ é o esmagamento da biela;

$V_{u,N}$ é o esmagamento do nó;

$V_{u,Des.}$ é o descolamento do sistema de ancoragem;

$V_{u,Par.}$ é a ruptura dos parafusos;

$V_{u,Pry.}$ é a ruptura por pryout;

$V_{u,Ch.}$ é a ruptura da chapa de aço;

$V_{u,Esc.}$ é o escorregamento entre chapa e laminado;

Para os consolos reforços, a Figura 5.21 ilustra a previsão de cada modo de ruptura entre os limites do tirante, sendo considerado o menor valor dentro desse intervalo. Vale ressaltar que, todos os valores utilizados durante a verificação foram normativos ou do fabricante, visto que não foram realizados ensaios na chapa de aço, nos parafusos, ou ensaios de aderência, com exceção do aço da armadura principal. Foi verificado que, entre todas as verificações, o *pryout* foi o que se mostrou mais conservador para esse tipo de elemento descontínuo.



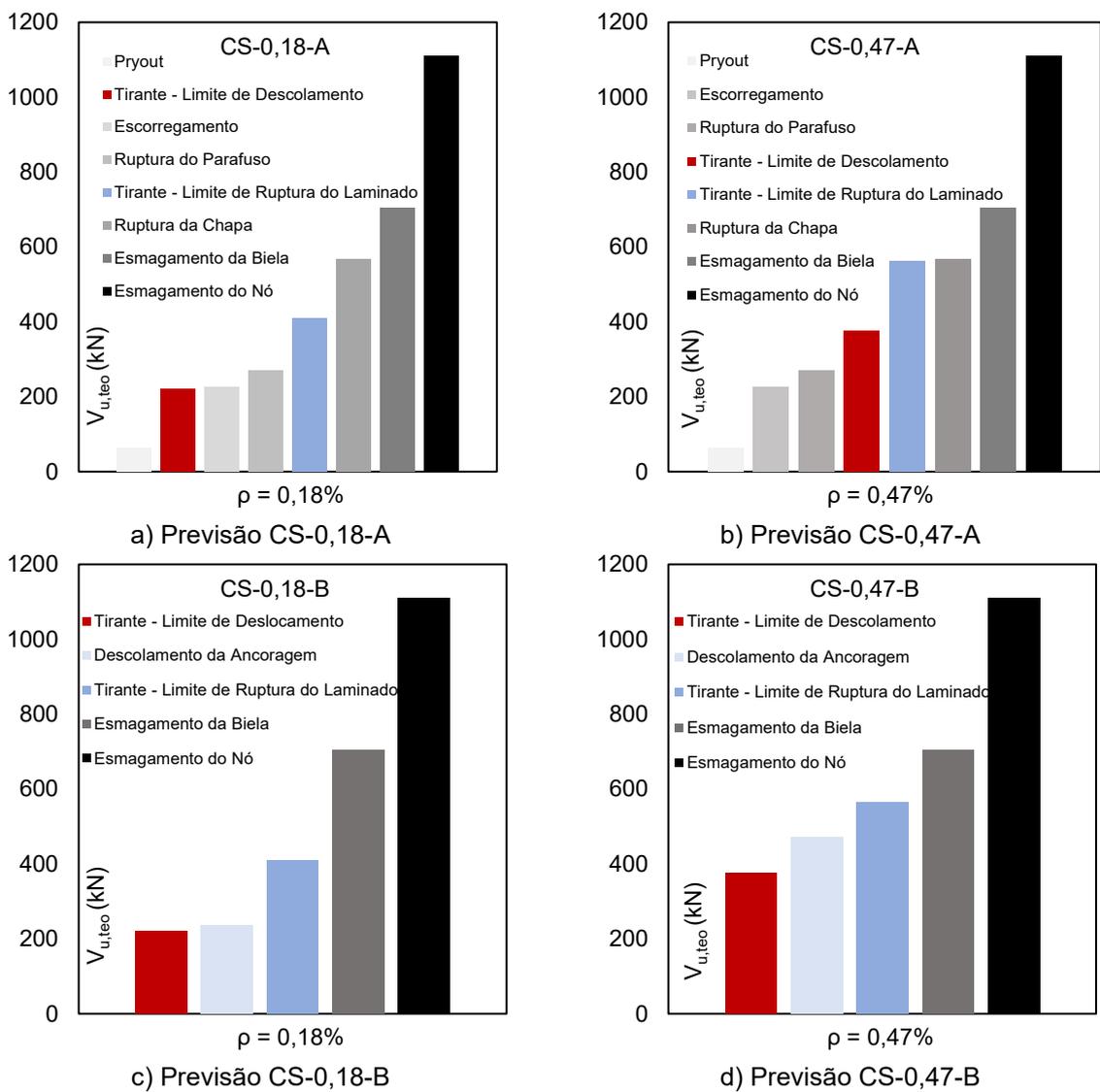


Figura 5.21- Previsão de resistência pelo MBT.

Como critério de análise e comparação, também foram realizadas previsões pelo ACI 440.2R (2017), utilizando o momento nominal resistente, com equação já descrita neste trabalho, e a distância “a”, que corresponde ao comprimento entre a face do pilar e a linha de aplicação de carga. Os valores experimentais, teóricos pelo MBT e teóricos pelo ACI 440.2R (2017) são detalhados na Tabela 5.3. Importa destacar que, para o caso do CS-0,47-A pelo MBT, como não houveram modos de ruptura da ancoragem entre os limites do tirante, foi utilizado um valor intermediário entre os dois.



Tabela 5.3 – Comparação de cortantes máximos.

Consolos	$V_{u,exp}$ (kN)	$V_{u,MBT}$ (kN)	$V_{u,ACI}$ (kN)
CR-0,18	259,78	115,91	138,43
CS-0,18-A	390,53	225,00	254,97
CS-0,18-B	297,43	236,40	254,97
CR-0,47	381,30	289,53	333,70
CS-0,47-A	505,68	469,46	451,38
CS-0,47-B	467,95	472,80	451,38

A Figura 5.22 ilustra a comparação entre os valores experimentais e teóricos, obtidos pelo MBT e normativo convencional. Todos os espécimes se mostraram dentro do limite de segurança, com menor diferença para os reforçados com maior taxa de armadura de flexão.

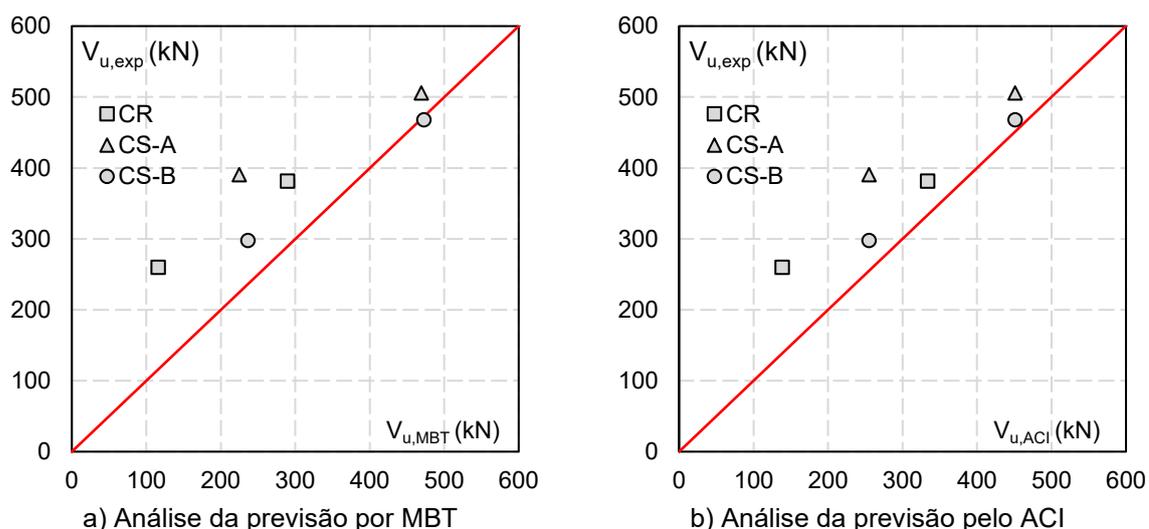


Figura 5.22- Análise das prescrições teóricas.

Em relação aos modos de ruína previstos pelo MBT, os consolos de referência se mostraram conservadores em valores de resistência, mas apontaram a zona mais frágil como sendo o tirante, assim como observado nos ensaios. Já para os reforçados e com ancoragem híbrida, a previsão se mostrou com variáveis que precisam ser melhor detalhadas para comparação mais precisa da ruína. Como no CS-0,18-A que seria governado pelo escorregamento, mas foi utilizado a tensão mínima de aderência do fabricante, que se mostrou conservador, já que não ocorreu no experimental.

Como relatado anteriormente, o *pryout* foi a previsão mais conservadora, mas esteve presente na ruína dos consolos CS-0,18-A e CS-0,47-A, demonstrando que,



para esses elementos e em situações onde o confinamento a compressão na região da ancoragem é significativo, a maneira de ser calculado deve ser melhor analisado e, provavelmente, de maneiras alternativas ao que a norma propõe.

Já para a ancoragem com colagem transversal de laminados, a previsão do descolamento da ancoragem se mostrou de acordo com o observado durante os ensaios. Ambos os consolos tiveram sua ruína por deslocamento primeiro nos centros dos elementos e depois a ancoragem.

Para as previsões do ACI 440.2R (2017) os resultados de previsão se mostraram a favor da segurança. É importante mencionar, que nesse método, é utilizado a menor tensão entre o descolamento e a ruptura do laminado.

6. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um programa experimental composto por seis consolos curtos de concreto reforçados a flexão com laminado de PRFC e ancorados nas extremidades. Foram analisadas duas variáveis, sendo elas a taxa de armadura de flexão, de 0,18% e 0,47%, e dois sistemas de ancoragem, um híbrido (chapa de aço e parafusos) e outro com sobreposição de camadas e colagem transversal utilizando o próprio material do reforço. Além disso, foi realizada uma análise das previsões teóricas de carregamento, utilizando o método de bielas e tirantes e pela teoria convencional de flexão.

As principais conclusões dos resultados e análises são:

- Em relação ao deslocamento vertical, foram obtidos maiores valores para os consolos com taxa (ρ_s) de 0,47%. Considerando o sistema de ancoragem, a ancoragem híbrida permitiu valores mais elevados de deflexão após a carga de pico, enquanto os espécimes com colagem transversal apresentaram um comportamento mais rígido;
- A deformação no laminado de PRFC tem início com as primeiras fissuras, em todos os consolos. Em uma deformação próxima de 2‰ o processo de descolamento inicia do meio para as extremidades, diferente da estimativa de 5,2‰ do ACI 440.2R (2017). A taxa de armadura de flexão não demonstrou



influência direta nesse parâmetro, porém, no CS-0,47-B, o aumento na seção da ancoragem permitiu deformações mais elevadas da fibra antes da ruína.

- Em sua maioria, os consolos apresentaram escoamento da armadura principal de flexão, com exceção do CS-0,47-B. Foi observada a mesma tendência no comportamento das deformações dos materiais, independente da taxa de armadura de flexão, com aço e reforço trabalhando em conjunto até o limite de escoamento do aço. Apenas no CS-0,47-B houveram leituras diferentes, com maior deformação no estribo horizontal acima do tirante, assim como no laminado;

- Na análise da abertura de fissuras, foi verificado que a taxa de armadura de flexão não influenciou de maneira significativa, diferente do sistema de ancoragem. Para a híbrida foi avaliado um aumento de 24,8% e 23,9% na carga de primeira fissura em relação aos de referência, enquanto para a ancoragem transversal, não houve uma diferença significativa;

- As leituras no bloco de compressão apresentaram um padrão de comportamento semelhante nos pontos monitorados. Para os consolos reforçados, foram observadas maiores deformações para a taxa de 0,47%, independente do sistema de ancoragem;

- A ruptura dos consolos, em maioria, foi por flexão, com exceção do modelo CS-0,47-B, que apresentou fissuras típicas de cisalhamento. A carga última dos consolos com ancoragem híbrida foi acompanhada pelo fenômeno do *pryout* e a ancoragem transversal teve seus ensaios interrompidos com o descolamento do conjunto reforço/ancoragem.

- A ancoragem híbrida obteve incrementos de resistência de 50,3% para a taxa (ρ_s) de 0,18%. Já para a taxa de 0,47% o incremento foi de 32,6%. Essa ancoragem se mostrou eficiente e permitiu boa aderência e fixação nas extremidades após o descolamento do laminado;

- Já a ancoragem colada transversalmente teve um incremento de 14,5% para a taxa de 0,18% e de 22,7% para a de 0,47%. Esse aumento para a maior taxa está relacionado com a área utilizada para essa ancoragem no CS-0,47-B. Os valores obtidos foram inferiores ao atingido pela ancoragem híbrida.

- A análise de resistência teórica se mostrou conservadora para a menor taxa de armadura de flexão. No entanto, para os reforçados com taxa de 0,47%



apresentou valores muito próximos de carga última. A ancoragem híbrida demonstrou ter muitas variáveis que precisam de análises mais aprofundadas.

Com isso, o reforço com laminado de PRFC se mostrou uma alternativa viável e eficiente para o reforço de consolos curtos, com destaque para aqueles com ancoragem híbrida, que obteve maior desempenho.

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.

ABDALLA, J. A.; MHANNA, H. H.; ALI, A. B.; HAWILEH, R. A. CFRP U-wraps, and spike anchors for enhancing the flexural performance of CFRP-plated RC beams. **Polymers**, v. 15, n. 7, p. 1621, 2023.

ABDALLA, J. A.; MHANNA, H. H.; HAWILEH, R. A.; SHARAFI, M.; AL-MARZOUQI, A.; AL-TENEIJI, S.; AL-ALI, K. Shear strengthening of reinforced concrete T-beams using carbon fiber reinforced polymer (CFRP) anchored with CFRP spikes. **Procedia Structural Integrity**, v. 42, p. 1223–1230, 2022.

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, n.2, 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, n. 1, p. 71–83, 2021.

ABDUL-RAZZAQ, K. S.; DAWOOD, A. A. Corbel strut and tie modeling – Experimental verification. **Structures**, v. 26, p. 327–339, 2020.



ABRANTES, J. H. C.; LÚCIO, V. J. G.; FERREIRA, M. P. Investigação experimental sobre diferentes configurações de ancoragem com laminados de PRFC no reforço de elementos de betão armado. **Encontro Nacional de Betão Estrutural**, Portugal, 2024.

ABRANTES, J. H. C.; LÚCIO, V. J. G.; FERREIRA, M. P. Investigação experimental sobre diferentes métodos de ancoragem com laminados de PRFC no reforço de elementos de betão armado. **5º Congresso Internacional da Habitação no Espaço Lusófono**, Portugal, 2024.

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.

AL-SAAWANI, M. A.; EL-SAYED, A. K.; AL-NEGHEIMISH, A. I.; ALHOZAIMY, A. M. FRP U-wraps for mitigating plate-end debonding in FRP-strengthened beams: Finite element modeling and parametric study. **Arabian Journal for Science and Engineering**, 2024.

AMANI, S.; ABBASPOUR, R.; YOUSEFPOUR, H. Post-fire behavior of lightweight concrete corbels. **Structures**, v. 59, 2024.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 318. **Building code requirements for structural concrete (ACI 318-19)**. Detroit, 2019.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 440. **Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures**. Detroit, 2017.

ARAÚJO, D. L.; AZEVEDO, S. A.; OLIVEIRA, E. M.; SILVA, E. M. O.; JÚNIOR, L. A. O. Strength evaluation of concrete corbels cast in different stage of columns. **IBRACON Structures and Materials Journal**, v.10, p. 509-546, 2017.



ARAÚJO, R. M.; SOUZA, R. A. Experimental analysis of a modified two-step corbel for precast concrete system. **Engineering structures**, v. 242, 2021.

ASKAR, M. K.; HASSAN, A. F.; AL-KAMAKI, Y. S. S. Flexural and shear strengthening of reinforced concrete beams using FRP composites: A state of the art. **Case Studies in Construction Materials**, v. 17, 2022.

ASSAD, M.; HAWILEH, R. A.; ABDALLA, J. A. Flexural strengthening of reinforced concrete beams with CFRP laminates and spike anchors. **Composites Part C: Open Access**, v. 13, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118. **Projetos de estruturas de concreto- Procedimento**. Rio de Janeiro, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800. **Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro, 2024.

ATTIYA, M. A.; MOHAMAD-ALI, ANIS A. Experimental behaviour of reinforced concrete corbels strengthened with carbon fibre reinforced polymer strips. **Basrah J. Eng. Sci**, v. 12, p. 31-45, 2012.

AZEVEDO, A. S.; FIRMO, J. P.; CORREIA, J. R.; CHASTRE, C.; BISCAIA, H.; FRANCO, N. Fire behaviour of CFRP-strengthened RC slabs using different techniques – EBR, NSM and CREAtE. **Composites Part B: Engineering**, v. 230, 2022.

BESHARA, F. B. A.; MUSTAFA, T. S.; MAHMOUD, A. A.; KHALIL, M. M. A. Constitutive models for nonlinear analysis of SFRC corbels. **Journal of Building Engineering**, v. 28, 2020.

BOBEK, L.; KLUSÁČEK, L.; SVOBODA, A. Effective strengthening of reinforced concrete corbels using post-tensioning. **Engineering structures**, v. 305, 2024.



BORGES, J. A. **Otimização topológica para modelos de bielas e tirantes em estruturas de concreto armado**. 2022. Dissertação (Mestre em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

BORGOHAIN, A.; BEDIWY, A. G.; EL-SALAKAWY, E. F. Practical evaluation of high-strength concrete corbels reinforced with GFRP bent bars. **Engineering Structures**, v. 299, 2024.

BUYUKOZTURK, O.; YU, T. Y. **Understanding and assessment of debonding failures in frp-concrete systems**. Seventh International Congress on Advances in Civil Engineering, Istanbul, 2006.

CARVALHO, M. L. **Análise de confiabilidade de modelos de capacidade resistente de blocos de fundação**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

CASTILLO, E. D. R.; KANITKAR, R.; SMITH, S. T.; GRIFFITH, M. C. Design approach for FRP spike anchors in FRP-strengthened RC structures. **Composite Structures**, v. 214, p. 23–33, 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**, v. 161, p. 55–67, 2019.

CHETCHOTISAK, P.; TEERAWONG, J.; YINDEESUK, S. Modified interactive strut-and-tie modeling of reinforced concrete deep beams and corbels. **Structures**, v. 45, p. 284–298, 2022.

CODINA, A.; BARRIS, C.; JAHANI, Y.; BAENA, M.; TORRES, L. Experimental and theoretical study on the flexural behaviour of RC beams strengthened with externally bonded reinforcement on grooves CFRP laminates. **Engineering Structures**, v. 299, 2024.



COSTA, L. M.; PIRES, T. A. C.; SILVA, J. J. R. Shear strengthening of fire-damaged reinforced concrete beams using NSM CFRP laminates. **Engineering Structures**, v. 287, 2023.

CRUZ, J. R.; SENA-CRUZ, J.; REZAZADEH, M.; SEREGA, S.; PEREIRA, E.; KWIECIEN, A.; ZAJAC, B. Bond behavior of NSM CFRP laminate strip systems in concrete using stiff and flexible adhesives. **Composite Structures**, v. 245, 2020.

DAWOOD, A. A.; KADHUM, A. K.; ABDUL-RAZZAQ, K. S. Strength of reinforced concrete corbels—a parametric study. **International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)**, v. 9, n. 11, 2018.

ELCHALAKANI, M.; HIGGODA, T. M. KIMIAEI, M. YANG, B. Pultruded FRP tubular section members, connections, and frames: A review on experimental studies. **Structures**, v. 56, 2023.

FRHAAN, W. K. M.; BAKAR, B. H. A.; HILAL, N.; AL-HADITHI, A. I. CFRP for strengthening and repairing reinforced concrete: a review. **Innovative infrastructure solutions**, v. 6, n. 2, 2021.

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

FU, B.; TANG, X. T.; 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, 2018.

GAO, L.; WEI, Q.; HUANG, Y.; ZHANG, F. Influence of anchor design parameters on flexural performance of hybrid bonded-fiber reinforced polymer strengthened reinforced concrete beams. **Structures**, v. 48, p. 1029–1045, 2023.

GUERRA, M. B. B. F. **Modelos de concepção para estruturas em concreto armado com comportamento não linear obtidos pelo método de bielas e tirantes e**



otimização topológica. 2017. Tese (Doutora em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

HANIF, M. U.; SEO, S. Y.; TRAN, H. V.; SENGHONG, K. Monitoring and characterizing the debonding in CFRP retrofitted RC beams using acoustic emission technology. **Developments in the Built Environment**, v. 14, 2023.

HE, X.; ZHOU, C.; LV, M.; WANG, Y.; LIU, Y. Interfacial stresses of beams hybrid strengthened by steel plate with outside taper and FRP pocket. **Journal of Building Engineering**, v. 75, 2023.

HEGDE, S.; SATISH SHENOY, B.; CHETHAN, K. N. Review on carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and their mechanical performance. **Materials Today: Proceedings**, v. 19, p. 658–662, 2019.

IVANOVA, I.; DONTCHEV, D.; ASSIH, J. T.; DELMAS, Y. Experimental investigation into strengthened short reinforced concrete corbels by bonding carbon fiber fabrics. **Journal of adhesion science and technology**, v. 29, n. 20, p. 2176–2189, 2015.

JIANG, C.; XIONG, W.; FU, Y.; YE, J. Experimental study on the interfacial bond behavior between CFRP and concrete using the hybrid bonding technique. **Construction and building materials**, v. 419, 2024.

KALFAT, R.; GADD, J.; AL-MAHAIDI, R.; SMITH, S. T. An efficiency framework for anchorage devices used to enhance the performance of FRP strengthened RC members. **Construction and Building Materials**, v. 191, p. 354–375, 2018.

KAMADJAJA, S.; FRAGOMENI, S.; STADEN, R. C. V (ed). Numerical analysis of reinforced corbel width using high-strength concrete. **Lecture Notes in Civil Engineering**. Australia, 2020.

KE, L.; LIANG, L.; FENG, Z.; LI, C.; ZHOU, J.; LI, Y. Bond performance of CFRP bars embedded in UHPFRC incorporating orientation and content of steel fibers. **Journal of Building Engineering**, v. 73, 2023.



KIM, D.-U.; SEO, H.-S.; JANG, H.-Y. Study on mechanical bearing strength and failure modes of composite materials for marine structures. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 9, n. 7, p. 726, 2021.

KOTYNIA, R.; OLLER, E.; MARI, A.; KASZUBSKA, M. Efficiency of shear strengthening of RC beams with externally bonded FRP materials – State-of-the-art in the experimental tests. **Composite Structures**, v. 267, 2021.

LEE, J.; LOPEZ, M. Application of frictional bond-slip model to large-scale FRP-strengthened t-beams with U-wraps. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, 2020.

LIU, G.; WANG, Y.; QU, F.; GUO, X.; LI, Y.; CHENG, S. Bonded behavior of hybrid-bonded CFRP to heat-damaged concrete interface. **Buildings**, v. 13, n. 11, p. 2736, 2023.

MEJÍA, N.; SARANGO, A.; ESPINOSA, A. Flexural and shear strengthening of RC beams reinforced with externally bonded CFRP laminates postfire exposure by experimental and analytical investigations. **Engineering Structures**, v. 308, 2024.

MORGAN, D. L. **A comparative study of the performance of CFRP anchors to prevent premature debonding of CFRP sheets on RC beams**. University of South Wales, 2015.

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, p. 641-650, 2013.

MUCIACCIA, G.; KHORASANI, M.; MOSTOFINEJAD, D. Effect of different parameters on the performance of FRP anchors in combination with EBR-FRP strengthening systems: A review. **Construction and Building Materials**, v. 354, 2022.



MUGAHED AMRAN, Y. H.; ALYOUSEF, R.; RASHID, R. S. M.; ALABDULJABBAR, H.; HUNG, C. C. Properties and applications of FRP in strengthening RC structures: A review. **Structures**, v. 16, p. 208–238, 2018.

NAVARATNAM, S.; SELVARANJAN, K.; JAYASOORING, D.; RAJEEV, P.; SANJAYAN, J. Applications of natural and synthetic fiber reinforced polymer in infrastructure: A suitability assessment. **Journal of Building Engineering**, v. 66, 2023.

RAHEEM, M. M.; RASHEED, H. A. Development of an objective model to predict shear capacity of FRP U-wrap anchors. **Composite Structures**, v. 265, 2021.

RAZAQPUR, A. G.; CAMERON, R.; MOSTAFA, A. A. B. Strengthening of RC beams with externally bonded and anchored thick CFRP laminate. **Composite Structures**, v. 233, 2020.

REALFONZO, R.; MARTINELLI, E.; NAPOLI, A.; NUNZIATA, B. Experimental investigation of the mechanical connection between FRP laminates and concrete. **Composites Part B: Engineering**, v. 45, n. 1, p. 341–355, 2013.

REZAZADEH, M.; BARROS, J. Transfer zone of prestressed CFRP reinforcement applied according to NSM technique for strengthening of RC structures. **Composites Part B: Engineering**, v. 79, 2015.

RIDHA, M. M. S.; AL-SHAFI'I, N. T. H.; HASAN, M. M. Ultra-high performance steel fibers concrete corbels: Experimental investigation. **Case studies in construction materials**, v. 7, p. 180–190, 2017.

ROMANICHEN, R. M.; SOUZA, R. A. Reinforced concrete corbels strengthened with external prestressing. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 12, n. 4, p. 812–831, 2019.

SCHLAICH, J.; SCHAFFER, K.; JENNEWEIN, M. Toward a consistent design of structural concrete. **PCI Journal**, 1987.



SEN, R. Developments in the durability of FRP-concrete bond. **Construction and Building Materials**, v. 78, p. 112–125, 2015.

SHADHAN, K. K.; KADHIM, M. M. M. Use of CFRP laminates for strengthening of reinforced concrete corbels. **International Journal of Civil Engineering and Technology**, v. 6, n. 11, p. 11-20, 2015.

SHAKIR, Q. M. Response of innovative high strength reinforced concrete encased-composite corbels. **Structures**, v. 25, p. 798–809, 2020.

SHAKIR, Q. M.; ABDLSAHEB, S. D. Rehabilitation of partially damaged high strength RC corbels by EB FRP composites and NSM steel bars. **Structures**, v. 38, p. 652–671, 2022.

SIDDIKA, A.; MAMUN, M. A. A.; FERDOUS, W.; ALYOUSEF, R. Performances, challenges and opportunities in strengthening reinforced concrete structures by using FRPs – A state-of-the-art review. **Engineering Failure Analysis**, v. 111, 2020.

SIDDIKA, A.; MAMUN, M. A.; ALYOUSEF, R.; AMRAN, Y. H. M. Strengthening of reinforced concrete beams by using fiber-reinforced polymer composites: A review. **Journal of Building Engineering**, v. 25, 2019.

SILVA, C. S. C. G. **Validação de formulações analíticas para o reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP**. 2013. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Portugal, 2013.

SPADEA, G.; BENCARDINO, F.; SORRENTI, F.; SWAMY, R. N. Structural effectiveness of FRP materials in strengthening RC beams. **Engineering Structures**, v. 99, p. 631–641, 2015.

SUN, W.; LIU, S.; ZHANG, C. An effective improvement for enhancing the strength and feasibility of FRP spike anchors. **Composite Structures**, v. 247, 2020.



VIJAYAN, D. S.; SIVASURIYAN, A.; DEVARAJAN, P.; STEFANSKA, A.; WODZYNSKI, L.; KODA, E. Carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) composites in civil engineering application—A comprehensive review. **Buildings**, v. 13, n. 6, p. 1509, 2023.

WANG, Q.; ZHU, H.; ZHANG, B.; TONG, Y.; TENG, F.; SU, W. Anchorage systems for reinforced concrete structures strengthened with fiber-reinforced polymer composites: State-of-the-art review. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 39, p. 327-344, 2020.

WANG, X.; CAO, Z. A dynamic installation method to improve the morphological characteristics of the bolt-hole contact interface in CFRP interference bolted structures. **Engineering Failure Analysis**, v. 156, 2024.

WANG, Y.; GUO, X. Experimental investigation on bond behavior of CFRP-concrete interface with end anchorage in hygrothermal environments. **Journal of Building Engineering**, v. 68, 2023.

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

WU, Z. M.; HU, C. H.; WU, Y. F.; ZHENG, J. J. Application of improved hybrid bonded FRP technique to FRP debonding prevention. **Construction and building materials**, v. 25, n. 6, p. 2898–2905, 2011.

ZHANG, H.; ZHANG, L.; LIU, Z.; QI, S.; ZHU, Y.; ZHU, P. Numerical analysis of hybrid (bonded/bolted) FRP composite joints: A review. **Composite Structures**, v. 262, 2021.

ZHAO, S.; HAN, J.; GOU, R.; FENG, X. Digital-image based performance analysis of CFRP–concrete interface bond under anchorage. **Structures**, v. 58, 2023.

ZHONG, J. T.; WANG, L.; DENG, P.; ZHOU, M. A new evaluation procedure for the strut-and-tie models of the disturbed regions of reinforced concrete structures. **Engineering Structures**, v. 148, 2017.



ZHOU, C.; WANG, L.; WANG, Y.; FANG, Z. Experimental study on the flexural strengthening of one-way RC slabs with end-buckled and/or externally bonded CFRP sheets. **Engineering Structures**, v. 282, 2023.

ZHOU, C.-Y.; YU, Y.-N.; XIE, E.-L. Strengthening RC beams using externally bonded CFRP sheets with end self-locking. **Composite Structures**, v. 241, 2020.

ZHOU, Y.; CHEN, X.; FAN, Z.; SUI, L.; XING, F. Bond behaviors of FRP-to-concrete interface under the control of a novel end-anchorage system. **Composite structures**, v. 168, p. 130–142, 2017.



Página de assinaturas



Aarao Neto
563.116.132-04
Signatário



Maurício Ferreira
691.601.122-04
Signatário



Gláucia Dalfré
294.046.888-51
Signatário

HISTÓRICO

- | | | |
|-------------------------|---|---|
| 17 jun 2025
08:06:35 |  | Layse Rafaela Furtado Lima criou este documento. (Email: layse.lima@itec.ufpa.br, CPF: 042.611.812-07) |
| 17 jun 2025
09:47:13 |  | Maurício de Pina Ferreira (Email: mpina@ufpa.br, CPF: 691.601.122-04) visualizou este documento por meio do IP 200.239.106.12 localizado em Belém - Pará - Brazil |
| 17 jun 2025
09:47:13 |  | Maurício de Pina Ferreira (Email: mpina@ufpa.br, CPF: 691.601.122-04) assinou este documento por meio do IP 200.239.106.12 localizado em Belém - Pará - Brazil |
| 17 jun 2025
08:17:16 |  | Aarao Ferreira Lima Neto (Email: aaraol@yahoo.com.br, CPF: 563.116.132-04) visualizou este documento por meio do IP 189.40.106.48 localizado em Belém - Pará - Brazil |
| 17 jun 2025
08:17:16 |  | Aarao Ferreira Lima Neto (Email: aaraol@yahoo.com.br, CPF: 563.116.132-04) assinou este documento por meio do IP 189.40.106.48 localizado em Belém - Pará - Brazil |
| 18 jun 2025
09:31:44 |  | Gláucia Maria Dalfré (Email: glaucia.dalfre@ufscar.br, CPF: 294.046.888-51) visualizou este documento por meio do IP 186.219.82.69 localizado em São Carlos - São Paulo - Brazil |
| 18 jun 2025
09:31:44 |  | Gláucia Maria Dalfré (Email: glaucia.dalfre@ufscar.br, CPF: 294.046.888-51) assinou este documento por meio do IP 186.219.82.69 localizado em São Carlos - São Paulo - Brazil |
| 17 jun 2025
14:50:56 |  | (Email: vjgl@fct.unl.pt) visualizou este documento por meio do IP 94.62.170.155 localizado em Lisbon - Lisbon - Portugal |

