

FABRÍCIO COTA VASCONCELLOS

**AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DO CONCRETO DE PÓS REATIVOS
REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Leonardo Gonçalves Pedroti

Coorientadores: José Carlos Lopes Ribeiro
José Maria Franco de Carvalho

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2022**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

V331a
2022

Vasconcellos, Fabrício Cota, 1993-
Avaliação da utilização do concreto de pós reativos reforçado com fibras de aço em vigas de concreto armado. / Fabrício Cota Vasconcellos. – Viçosa, MG, 2022.
1 dissertação eletrônica (144 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndice.
Orientador: Leonardo Gonçalves Pedroti.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Civil, 2022.
Referências bibliográficas: f. 130-136.
DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2023.008>
Modo de acesso: World Wide Web.

1. Concreto armado - Produtos. 2. Vigas de concreto - Manutenção e reparos. 3. Aço - Testes. 4. Flexão (Engenharia civil). I. Pedroti, Leonardo Gonçalves, 1978-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDD 22. ed. 691.3

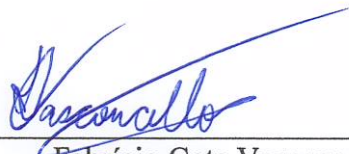
FABRÍCIO COTA VASCONCELLOS

**AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DO CONCRETO DE PÓS REATIVOS
REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO**

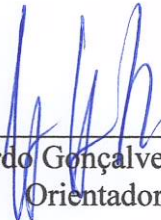
Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 11 de outubro de 2022

Assentimento:



Fabrício Cota Vasconcellos
Autor



Leonardo Gonçalves Pedroti
Orientador

*“Apenas quem já experimentou a frustração da derrota
Consegue saborear com plenitude a alegria da vitória.
A felicidade, seja como for, é a capacidade de sentir gratidão pelo agora.
Pode parecer simples, mas é difícil.
E parecendo difícil, é simples.”*

(Takehiko Inoue)

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, pelo dom da vida, pelo conhecimento e discernimento para completar este trabalho.

Aos meus pais, Eustáquio e Lucelma, e meu irmão, Vinícius, por todo amor, apoio e confiança incondicionais durante toda minha vida, sem vocês eu não teria completado mais esta etapa.

À minha companheira, Thamires, pelo amor e carinho, buscando sempre me ajudar e aconselhar durante essa trajetória.

Ao professor Leonardo Gonçalves Pedroti, pela orientação deste trabalho, pela confiança depositada em mim, paciência e companheirismo desde os tempos da graduação.

Aos professores José Carlos Lopes Ribeiro e José Maria Franco de Carvalho, pela colaboração com os conteúdos deste trabalho.

À Universidade Federal de Viçosa, ao Departamento de Engenharia Civil e ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil pela oportunidade de realizar este trabalho.

Aos técnicos do Laboratório de Materiais de Construção e do Laboratório das Engenharias por todo apoio e suporte, em especial Wellington e José Carlos, que estiveram presentes em todos os ensaios.

Aos amigos da Triton Engenharia, Luís Felipe e Matheus, pelo suporte e compreensão durante todo esse tempo.

Aos amigos estudantes da Pós-Graduação, por todo apoio, solicitude e conhecimento compartilhado, em especial Gustavo Emílio, que sempre buscou tempo onde não tinha para me auxiliar na dissertação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de mestrado.

RESUMO

VASCONCELLOS, Fabrício, C., M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, outubro de 2022. **Avaliação da utilização do concreto de pós reativos reforçado com fibras de aço em vigas de concreto armado.** Orientador: Leonardo Gonçalves Pedroti. Coorientadores: José Carlos Lopes Ribeiro e José Maria Franco de Carvalho.

Para controlar o avanço de manifestações patológicas em elementos de concreto armado, são realizadas intervenções, como recuperação e reforço, para reestabelecer o desempenho da estrutura. Neste cenário, o Concreto de Pós Reativos (CPR) surge como uma opção viável a ser utilizado com esse propósito. O CPR é um material caracterizado pela sua granulometria fina e elevada resistência mecânica, boa durabilidade e tenacidade. Sendo assim, este trabalho teve como objetivo a avaliação do desempenho do CPR com adição de fibras de aço como material de reforço de uma viga de concreto armado (CC), na região onde predominam os esforços de flexão. Para isso, foram produzidas vigas de CC de dimensões reduzidas, solicitadas até o Estado Limite de Serviço e, posteriormente, reforçadas com um encamisamento de CPR, com adição de fibras na região de flexão pura. Previamente a esse estudo, foram confeccionados corpos de prova prismáticos de CPR variando-se a proporção das fibras em 0%, 6%, 10% e 14%, com o intuito de encontrar uma dosagem que melhor aprimorasse o desempenho à flexão do material, para ser utilizada no modelo de reforço. Observou-se que o aumento da dosagem de fibras não influenciou na resistência à flexão do CPR ao nível de significância de 5%, porém aumentou sua ductilidade, evitando a ruptura brusca e explosiva. Os resultados dos ensaios de flexão nas vigas reforçadas indicaram um aumento da rigidez dos elementos reforçados durante o carregamento, obtendo-se, ao menos, uma recuperação completa da resistência original das vigas de classe C30, e um ganho de resistência de até 40% para vigas de classe C20. Além disso, foi constatada uma boa aderência entre o CPR e o substrato de CC até cerca de 80% da carga última da viga, sendo observado o deslocamento da camada de reforço, antes do colapso do elemento. Dessa maneira, concluiu-se que a utilização do CPR como material de reparo e reforço de vigas de concreto armado foi eficaz. O material contribuiu para o aumento da rigidez e da resistência à flexão do elemento reforçado, além de reduzir a flecha no centro do vão durante o carregamento.

Palavras-chave: *concreto de pós reativos, reparo, reforço, flexão, fibras de aço.*

ABSTRACT

VASCONCELLOS, Fabrício, C., M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, October, 2022. **Evaluation of the use of reactive powder concrete with steel fibers in reinforced concrete beams.** Advisor: Leonardo Gonçalves Pedroti. Co-advisors: José Carlos Lopes Ribeiro and José Maria Franco de Carvalho.

To control the progress of pathological manifestations in reinforced concrete elements, interventions are carried out, such as repair and reinforcement, to reestablish the performance of the structure. In this scenario, Reactive Powder Concrete (RPC) appears as a viable option to be used for this purpose. RPC is a material characterized by its fine granulometry and high mechanical strength, good durability and toughness. Therefore, this work aims to evaluate the performance of RPC with the addition of steel fibers as a reinforcing material for a reinforced concrete beam (RC), in the region where bending stresses predominate. For this, RC beams of reduced dimensions were produced, loaded to the Service Limit State and, later, reinforced with a RPC jacket, with addition of fibers in the pure bending region. Prior to this study, prismatic RPC specimens were made, varying the proportion of the fibers by 0%, 6%, 10% and 14%, in order to find a dosage that would better improve the flexural performance of the material, to be used in the reinforcement model. It was observed that the increase in fiber dosage did not influence the flexural strength of the RPC at the 5% significance level, but it increased its ductility, preventing sudden and explosive rupture. The results of the bending tests on the reinforced beams indicated an increase in the stiffness of the reinforced elements during loading, obtaining, at least, a complete recovery of the original strength of the C30 class beams, and a strength gain of up to 40% for class C20 beams. In addition, good adhesion was observed between the RPC and the RC substrate up to about 80% of the ultimate load of the beam, with the detachment of the reinforcement layer being observed before the collapse of the element. Thus, it was concluded that the use of CPR as a material for repairing and reinforcing reinforced concrete beams was effective. The material contributed to increase the stiffness and flexural strength of the reinforced element, in addition to reducing the deflection in the center of the span during loading.

Keywords: *reactive powder concrete, repair, reinforcement, bending, steel fibers.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Formas geométricas dos principais tipos de fibras de aço e um exemplo de fibra enganchada	25
Figura 2.2: Propagação de fissuras a partir de microfibras e fibras longas	25
Figura 2.3: Comparação do comportamento tensão-deformação devido a presença das fibras	26
Figura 2.4: Gráfico carregamento-deflexão de vigas com fibras retas e enganchadas.....	27
Figura 2.5: Diagrama momento-curvatura (Estádios)	30
Figura 2.6: Comportamento do concreto na flexão pura (Estádio I)	30
Figura 2.7: Comportamento do concreto na flexão pura (Estádio II).....	31
Figura 2.8: Variação das tensões de tração no aço e no concreto na região fissurada	32
Figura 2.9: Comportamento do concreto na flexão pura (Estádio III)	32
Figura 2.10: Comportamento tensão-deformação da pasta de cimento, do agregado e do concreto.	34
Figura 2.11: Comportamento tensão-deformação do concreto sob carregamento cíclico de compressão.	34
Figura 2.12: Representação esquemática dos módulos de elasticidade.....	35
Figura 2.13: Seção retangular no Estádio I	36
Figura 2.14: Seção retangular no Estádio II	37
Figura 2.15: Rigidez à flexão ao longo do eixo axial de uma viga	39
Figura 2.16: Diagrama de degradação da rigidez percentual.	40
Figura 2.17: Reforço de vigas com aumento de seção	42
Figura 2.18: Mecanismo de aderência entre concretos.....	44
Figura 2.19: Zona de transição entre concretos de idades distintas.....	44
Figura 2.20: Diagrama deformação-tempo na interface entre CPR e CC	46
Figura 3.1: Programa experimental	50
Figura 3.2: Detalhamento da viga de concreto armado	57
Figura 3.3: Conjunto de formas e armaduras montadas	57
Figura 3.4: Materiais preparados para a produção do concreto convencional	58
Figura 3.5: Detalhe dos tarugos posicionados para cobrimento lateral.....	59
Figura 3.6: Formas das vigas preenchidas com concreto	60
Figura 3.7: Corpos de prova preenchidos com concreto	60
Figura 3.8: Misturador vertical com capacidade de 20 L utilizado na produção do CPR.....	62

Figura 3.9: Corpos de prova prismáticos moldados	62
Figura 3.10: Esquema de aplicação da carga na viga, incluindo DEC e DMF	64
Figura 3.11: Desenho esquemático da viga reforçada	64
Figura 3.12: Limpeza da superfície da viga a ser reforçada com a pedra de carborundum	65
Figura 3.13: Materiais utilizados na produção do CPR (a) cimento, b) areia industrializada, c) sílica ativa, d) resíduo de granito, e) fibras de aço e f) aditivo superplastificante)	66
Figura 3.14: Materiais utilizados no preparo do CRF (a) cimento, b) areia natural, c) brita 0 e d) fibras de aço)	68
Figura 3.15: Ensaio de flexão a 3 pontos em CP prismático	70
Figura 3.16: Ensaio de compressão em CP prismático	70
Figura 3.17: Fluxograma ensaio de flexão a quatro pontos das vigas	72
Figura 3.18: Montagem do ensaio na EMIC DL60000	73
Figura 3.19: Ciclos de carga e descarga progressivos	74
Figura 4.1: Evolução da resistência do CPR-0F	76
Figura 4.2: Evolução da resistência do CPR-6F	77
Figura 4.3: Evolução da resistência do CPR-10F	77
Figura 4.4: Evolução da resistência do CPR-14F	78
Figura 4.5: Comparativo de resistência à tração na flexão do CPR variando a dosagem de fibras de aço	79
Figura 4.6: Comparativo de resistência à compressão do CPR variando a dosagem de fibras de aço	79
Figura 4.7: Modos de ruptura do corpo de prova de CPR a) sem fibras de aço b) com fibras de aço	80
Figura 4.8: Vigas reforçadas com CPR e CRF em sua região fletida	82
Figura 4.9: Carga x Flecha viga V5 – Solicitação ao ELU	84
Figura 4.10: Viga V5 – ELU a) Ruptura b) Detalhe ruptura na região de flexão pura	85
Figura 4.11: Carga x Flecha viga V10 – Solicitação ao ELU	86
Figura 4.12: Ruptura viga V10	86
Figura 4.13: Carga x Flecha viga V3 (ELS)	88
Figura 4.14: Viga V3 após a solicitação de 60% de sua carga última	88
Figura 4.15: Carga x Flecha V4 ELS	89
Figura 4.16: Fissuras dentro do patamar de flexão pura viga V4	90
Figura 4.17: Carga x Flecha Viga V8 ELS	91

Figura 4.18: Fissuração viga V8 após ELS	91
Figura 4.19: Carga x Flecha viga V9 ELS.....	92
Figura 4.20: Fissuras viga V9 após ELS	93
Figura 4.21: Carga x Flecha viga V3 reforçada com CRF	94
Figura 4.22: Viga V3 – reforçada CRF a) Abertura de fissuras interface b) Fissuras reforço c) Ruptura	95
Figura 4.23: Carga x Flecha V4 reforçada com CPR.....	96
Figura 4.24: Viga V4 – Reforçada CPR a) Abertura de fissuras b) Ruptura	97
Figura 4.25: Carga x Flecha viga V8 reforçada - Ciclos 1 a 5	98
Figura 4.26: Carga x Flecha viga V8 reforçada - Ciclos 7 a 11	99
Figura 4.27: Viga V8 – Reforçada CPR a) Abertura de fissuras b) Ruptura	99
Figura 4.28: Carga x Flecha viga V9 Reforçada	100
Figura 4.29: Viga V9 – Reforçada com CRF a) Abertura de fissuras b) Ruptura.....	101
Figura 4.30: Carga x Flecha viga V1 – Íntegro com CRF.....	103
Figura 4.31: Viga V1 – Íntegra CRF a) Abertura de fissuras b) Abertura de fissuras no reforço de CRF.....	103
Figura 4.32: Carga x Flecha viga V2 - Íntegra com CPR.....	105
Figura 4.33: Viga V2 – Reforçada com CPR a) Abertura de fissuras b) Ruptura.....	105
Figura 4.34: Carga x Flecha viga V6 – Íntegro com CPR.....	107
Figura 4.35: Viga V6 – Íntegra CPR a) Abertura de fissuras b) Ruptura.....	107
Figura 4.36: Carga x Flecha viga V7 – Íntegro com CRF.....	108
Figura 4.37: Viga V7 – Íntegra CRF a) Abertura de fissuras b) Ruptura.....	109
Figura 4.38: Envoltória dos dados máximos dos ciclos de carga e descarga	110
Figura 4.39: Carga x Flecha comparativo ensaio 2 x ensaio 3 (V3 – 1º Lote de vigas).....	111
Figura 4.40: Carga x Flecha comparativo ensaio 3 x ensaio 4 (V3 x V1 – 1º Lote de vigas) 112	
Figura 4.41: Carga x Flecha comparativo ensaio 2 x ensaio 3 (V4 – 1º Lote de vigas).....	112
Figura 4.42: Carga x Flecha comparativo ensaio 3 x ensaio 4 (V4 x V2 – 1º Lote de vigas) 113	
Figura 4.43: Carga x Flecha comparativo ensaio 2 x ensaio 3 (V8 – 2º Lote de vigas).....	114
Figura 4.44: Carga x Flecha comparativo ensaio 3 x ensaio 4 (V8 x V6 – 2º Lote de vigas) 114	
Figura 4.45: Carga x Flecha comparativo ensaio 2 x ensaio 3 (V9 – 2º Lote de vigas).....	115
Figura 4.46: Carga x Flecha comparativo ensaio 3 x ensaio 4 (V9 x V7 – 2º Lote de vigas) 116	
Figura 4.47: Comparativo reforço de CRF x CPR – Ensaio 3 (V3 x V4 - 1º lote de vigas) ..	116
Figura 4.48: Comparativo reforço de CRF x CPR – Ensaio 3 (V9 x V8 – 2º lote de vigas) .	117

Figura 4.49: Comparativo reforço de CRF x CPR – Ensaio 4 (V1 x V2 - 1º lote de vigas) ..	118
Figura 4.50: Comparativo reforço de CRF x CPR – Ensaio 4 (V7 x V6 - 2º lote de vigas) ..	118
Figura 4.51: Relação das flechas entre os ensaios 2 e 3	119
Figura 4.52: Relação das flechas entre os ensaios 3 e 4	120
Figura 4.53: Relação de flechas reforço de CRF x CPR	121
Figura 4.54: Cargas de ruptura e ganhos de resistência vigas reforçadas 1º lote de concretagem	122
Figura 4.55: Cargas de ruptura e ganhos de resistência vigas reforçadas 2º lote de concretagem	122

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Características físicas e mecânicas dos cimentos	52
Tabela 3.2: Caracterização do agregado miúdo.....	52
Tabela 3.3: Caracterização do agregado graúdo.....	53
Tabela 3.4: Caracterização da sílica ativa	53
Tabela 3.5: Caracterização do resíduo de granito.....	53
Tabela 3.6: Características mecânicas do aço	54
Tabela 3.7: Características geométricas da fibra de aço Dramix 3D 45/30 BL	54
Tabela 3.8: Características do aditivo superplastificante	54
Tabela 3.9: Traços utilizados na produção do CPR.....	55
Tabela 3.10: Equipamentos utilizados para a produção do concreto convencional	56
Tabela 3.11: Equipamentos utilizados para a produção do CPR.....	61
Tabela 3.12: Equipamentos utilizados na produção do reforço de CPR	63
Tabela 3.13: Equipamentos utilizados na produção do reforço de CRF	67
Tabela 3.14: Equipamentos utilizados para os ensaios de flexão a três pontos e compressão no CPR.....	69
Tabela 3.15: Equipamentos utilizados para o ensaio de flexão a quatro pontos na viga.....	71
Tabela 4.1: Nomenclaturas para identificação das misturas.....	76
Tabela 4.2: Identificação quanto ao lote de concretagem das vigas ensaiadas na flexão a quatro pontos	83
Tabela 4.3: Identificação das vigas quanto ao tipo de ensaio de flexão a quatro pontos	83
Tabela 4.4: Ciclos de carga e descarga até o ELS – V3	87
Tabela 4.5: Ciclos de carga e descarga até o ELS – V4	89
Tabela 4.6: Ciclo de carga e descarga viga V8 ELS	90
Tabela 4.7: Ciclo de carga e descarga viga V9 ELS	92
Tabela 4.8: Ciclos de carga e descarga da V3 reforçada	93
Tabela 4.9: Ciclos de carga e descarga viga V4 reforçada com CPR	95
Tabela 4.10: Ciclo de carga e descarga viga V8 reforçada	97
Tabela 4.11: Ciclos de carga e descarga viga V9 reforçada.....	100
Tabela 4.12: Ciclos de carga e descarga viga V1	102
Tabela 4.13: Ciclos de carga e descarga viga V2	104
Tabela 4.14: Ciclos de carga e descarga viga V6	106
Tabela 4.15: Ciclos de carga e descarga viga V7	108

Tabela A.5.1: Resultados do ensaio de flexão a 3 pontos do CPR-0F	138
Tabela A.5.2: Resultados do ensaio de flexão a 3 pontos do CPR-6F	139
Tabela A.5.3: Resultados do ensaio de flexão a 3 pontos no CPR-10F	140
Tabela A.5.4: Resultados do ensaio de flexão a 3 pontos no CPR-14F	141
Tabela A.5.5: Resumo dos resultados de flexão a 3 pontos dos CP's de CPR	141
Tabela A.6: Resistência aos 28 dias e Módulo de Elasticidade dos ensaios controle dos reforços de CPR e CRF	143
Tabela A.7.1: Comparativo das resistências à flexão a 4 pontos dos modelos experimentais	144
Tabela A.8.2: Comparativo das flechas dos modelos experimentais	144

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
1.1. Objetivos.....	17
1.2. Justificativa e relevância do tema.....	18
1.3. Estrutura da dissertação.....	19
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	20
2.1. Concreto de pós-reativos (CPR).....	20
2.2. Concreto reforçado com fibras.....	24
2.2.1. Considerações gerais.....	24
2.2.2. Dosagem e recomendações para a incorporação de fibras no concreto.....	28
2.3. Comportamentos e modos de falhas das vigas de concreto armado submetidas a flexão.....	29
2.4. Estimativa da rigidez à flexão de vigas de concreto armado e seu grau de deterioração.....	33
2.4.1. Módulo de Elasticidade do concreto.....	33
2.4.2. Momento de inércia da seção transversal do concreto armado.....	36
2.4.3. Estimativa da rigidez à flexão do concreto fissurado.....	38
2.5. Manifestações patológicas e reforço de estruturas de concreto armado.....	40
2.6. Aderência do concreto.....	42
2.6.1. Considerações gerais.....	42
2.6.2. Aderência concreto-concreto.....	43
2.6.3. Aderência CPR-concreto convencional.....	45
2.7. Estudos utilizando o CPR como reforço em um elemento estrutural de concreto armado.....	46
2.7.1. Al-Osta et al. (2017).....	46
2.7.2. Karthik e Sundaravadivelu (2017).....	47
2.7.3. Deng et al. (2018).....	48
2.7.4. Hadi et al. (2018).....	48
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	50
3.1. Generalidades.....	50
3.2. Características dos modelos experimentais.....	51
3.3. Características dos materiais utilizados na produção dos modelos experimentais.....	52
3.3.1. Cimento.....	52
3.3.2. Agregado miúdo.....	52
3.3.3. Agregado graúdo.....	53

3.4.4. Sílica Ativa.....	53
3.4.5. Resíduo de Granito.....	53
3.3.6. Aço	54
3.3.7. Fibras de Aço	54
3.4.5. Aditivo Superplastificante.....	54
3.5. Características dos concretos produzidos	55
3.5.1. Concreto convencional (CC).....	55
3.5.2. Concreto reforçado com fibras (CRF).....	55
3.5.3. Concreto de pós reativos (CPR).....	55
3.6. Produção dos modelos experimentais	56
3.6.1. Vigas e corpos de prova cilíndricos de concreto convencional	56
3.6.2. Corpos de prova de CPR	61
3.6.3. Reforço de CPR em viga de CC por encamisamento da região fletida.....	63
3.6.4. Reforço de CRF em viga de CC por encamisamento da região fletida.....	67
3.7. Ensaio dos modelos experimentais	69
3.7.1. Estudo da dosagem de fibras de aço em corpos de prova de CPR.....	69
3.7.2. Estudo do reforço de encamisamento da região fletida nas vigas.....	71
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	75
4.1. Considerações preliminares.....	75
4.2. Estudo da influência da dosagem de fibras de aço na resistência à tração na flexão do CPR.....	75
4.2.1. CPR sem adição de fibras de aço (CPR-0F)	76
4.2.2. CPR com 6% de fibras de aço (CPR-6F)	76
4.2.3. CPR com 10% de fibras de aço (CPR-10F)	77
4.2.4. CPR com 14% de fibras de aço (CPR-14F)	78
4.2.5. Comparativo entre as dosagens	78
4.2.6. Discussão dos resultados	81
4.3. Estudo do reforço de CPR por encamisamento da região fletida.....	82
4.3.1. Ensaio de flexão a quatro pontos dos modelos experimentais	83
4.3.2. Análise comparativa dos elementos reforçados	110
4.3.3. Discussão dos resultados	119
5. CONCLUSÕES	127
5.1. Considerações finais	127

5.2. Sugestões para trabalhos futuros	129
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	130
APÊNDICE A. DADOS COMPLETOS DOS ENSAIOS	137
A.1. CPR sem adição de fibras de aço (CPR-0F).....	138
A.2. CPR com 6% de fibras de aço (CPR-6F)	139
A.3. CPR com 10% de fibras de aço (CPR-10F)	140
A.4. CPR com 14% de fibras de aço (CPR-14F)	141
A.5. Resumo dados CPR primeiro estudo e ANOVA.....	141
A.6. Resumo Ensaio Controle vigas e reforços de CPR e CRF	143
A.7. Resumo resultados comparativos	144

1

INTRODUÇÃO

O concreto é o material mais utilizado na construção civil, principalmente no Brasil. Dessa maneira, são recorrentes os estudos para o aprimoramento de suas características mecânicas e de sua durabilidade. Em consequência disso, foram desenvolvidos concretos de alto desempenho, com propriedades superiores ao concreto convencional, em muitos casos, com o objetivo de se reparar ou reforçar estruturas danificadas.

Com o passar do tempo, as estruturas de concreto armado passam a se deteriorar. Esse processo pode ocorrer devido a erros de execução, erros de utilização ou até mesmo envelhecimento natural, alterando suas condições de segurança. É possível observar o estado de deterioração de uma estrutura pelas manifestações patológicas apresentadas por ela, sendo fundamental o conhecimento das suas causas para se determinar o procedimento correto de reparo ou reforço.

De modo geral, o reparo de uma estrutura visa reconstituir sua capacidade de carga, atendendo às condições de serviço e durabilidade, sem introdução de novos materiais. Enquanto isso, reforço de um elemento estrutural tem o objetivo de se corrigir falhas de projeto ou execução, aumentando-se a capacidade portante da estrutura com a incorporação de novos materiais (SOUZA; RIPPER, 1998).

Dentre os métodos mais comuns de reforço estrutural, destacam-se a utilização de perfis metálicos, aumento da seção do elemento com incremento de armadura, aplicação de fibras de carbono e incorporação de concretos de alto desempenho. Dentre esses, destaca-se o Concreto de Pós Reativos (CPR).

O CPR é um tipo de concreto de ultra performance caracterizado pela sua alta resistência mecânica, boa durabilidade e tenacidade, incluindo uma microestrutura densa, composta apenas por materiais finos, como cimento Portland, areia fina, sílica ativa, pó de quartzo e baixa relação água/cimento (RICHARD; CHEYREZY, 1995). Em alguns casos, são incorporadas fibras de

aço na mistura, com o intuito de melhorar suas propriedades mecânicas, principalmente sua ductilidade (OLIVITO; ZUCCARELLO, 2010; ZHENG et al., 2013).

A forma geométrica das fibras de aço pode influenciar as propriedades do concreto de diferentes maneiras. Segundo Brandt (2008), as microfibras, mais finas e de menor seção, controlam a abertura e propagação das microfissuras, enquanto que as fibras mais longas controlam as fissuras maiores e contribuem com o aumento da ductilidade. Estudos também comprovam a eficácia da incorporação de fibras de aço em concretos de alto desempenho, inclusive o CPR, podendo aumentar sua durabilidade, propriedades mecânicas e resistência à tração e flexão, de acordo com o tipo de fibra utilizada (HOLSCHEMACHER *et al.*, 2010; ABBAS *et al.*, 2015).

Nesse contexto, o aprimoramento das propriedades mecânicas do CPR com a adição de fibras de aço, principalmente o aumento da resistência à tração e ductilidade, o configura como um material viável para utilização como reparo ou reforço de estruturas de concreto armado. Em situações desse tipo, é comum adicionarmos um concreto novo sobre um concreto já existente, sendo fundamental uma boa aderência entre os materiais. Isto posto, Lemes (2019) observou em seus estudos que o CPR apresenta bom coeficiente de atrito com o concreto convencional como base, contribuindo para uma boa aderência entre eles.

O presente trabalho trata da avaliação do Concreto de Pós Reativos utilizado como reforço em vigas de concreto armado convencional, solicitadas até o Estado Limite de Serviço. Foram utilizadas vigas em escala reduzida como modelo experimental, solicitadas à flexão por quatro pontos. Em seguida, foi aplicado um reforço de CPR por encamisamento apenas na região fletida da viga. Além disso, previamente será analisada a influência da dosagem de fibras de aço na resistência à flexão do CPR, por meio de ensaios em corpos de prova prismáticos, variando o teor de fibras em 0%, 6%, 10% e 14%.

1.1. Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é a avaliação do desempenho do Concreto de Pós Reativos com adição de fibras de aço como material de reforço de uma viga de concreto armado na região onde predominam os esforços de flexão.

Para atingir o objetivo principal, foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- avaliar a resistência à flexão do CPR com adição de fibras;

- avaliar a influência do teor de fibras de aço na resistência à flexão do CPR;
- analisar o comportamento e desempenho do reforço de CPR por encamisamento da região fletida de uma viga previamente danificada;
- analisar o modo de ruptura da viga de Concreto Convencional (CC) reforçada com CPR;
- analisar a aderência entre o CC e o CPR na solicitação à flexão;

1.2. Justificativa e relevância do tema

O grande número de elementos estruturais de concreto armado deteriorados e com manifestações patológicas que diminuem sua capacidade de carga, colocando em risco os seus usuários, faz com que sejam necessários investimentos em recuperação e reforço. Diferentes tipos de materiais são estudados para esse propósito, com o intuito de, no mínimo, recuperar o desempenho da peça danificada sem que seja necessário destruí-la.

Estudos realizados por Gusmão (2017) e Lemes (2019) indicaram que o CPR apresenta uma boa aderência no concreto convencional existente, com o ângulo da interface entre os dois exercendo grande influência no resultado de resistência de aderência do material.

Em vista disso, é pertinente a realização de estudos aplicando o CPR como material de reforço em uma viga solicitada além da sua capacidade de serviço. Como o concreto é um material que possui baixa resistência à tração, é conveniente adicionar fibras de aço a sua composição visando melhorar seu comportamento à tração.

Nessa perspectiva, o presente trabalho irá contribuir com as Linhas de Pesquisa relacionadas à área de recuperação de estruturas de concreto armado e à utilização do Concreto de Pós Reativos no âmbito da Área de Concentração em Engenharia da Construção do Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa.

1.3. Estrutura da dissertação

Este trabalho foi estruturado em cinco capítulos, os quais são descritos a seguir.

No Capítulo 1 apresenta-se a introdução do tema estudado, ressaltando-se os objetivos principais do trabalho e sua justificativa e relevância, tanto no contexto atual da construção civil, quanto no âmbito da linha de pesquisa que vem sendo desenvolvida na Área de Concentração em Engenharia da Construção do Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa.

No Capítulo 2 é apresentado uma fundamentação sobre conteúdos necessários para a compreensão e desenvolvimento do trabalho. Foram abordados conceitos de Concreto de Pós Reativos (CPR) e Concreto Reforçado com Fibras (CRF), assim como temas sobre manifestações patológicas, reforço de estruturas de concreto, comportamento e modos de falha de uma viga submetida à esforços de flexão, estimativa da rigidez à flexão de vigas de concreto armado, aderência do concreto e, por fim, estudos já realizados sobre o tema abordado.

No Capítulo 3 são apresentadas as características dos modelos experimentais e as propriedades dos materiais utilizados para sua produção. Esse capítulo também apresenta a descrição da preparação dos modelos experimentais, equipamentos utilizados e instrumentação dos ensaios de flexão realizados.

No Capítulo 4 apresentam-se os resultados dos ensaios de flexão realizados. Primeiramente são apresentados os resultados do ensaio de flexão a três pontos do estudo da dosagem de fibras de aço dos modelos prismáticos de CPR. Em seguida, são apresentados os resultados dos ensaios de flexão a quatro pontos das vigas de concreto convencional e do estudo do reforço por encamisamento na região fletida da viga.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões gerais deste trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2.1. Concreto de pós-reativos (CPR)

O Concreto de Pós Reativos (CPR) é um tipo de concreto caracterizado pela sua alta resistência mecânica, boa durabilidade e tenacidade (RICHARD; CHEYREZY, 1995; YAZICI *et al.*, 2009). O CPR foi desenvolvido por meio de pesquisas realizadas no início da década de 1990, inicialmente na França e no Canadá, com o objetivo de se obter um compósito de matriz cimentícia de alto desempenho. O primeiro registro de sua aplicação se refere à estrutura da passarela de Sherbrooke, localizada no Canadá (GUSMÃO, 2017).

O desenvolvimento do CPR foi obtido a partir de técnicas de aprimoramento de microestrutura para materiais cimentícios, eliminando os agregados graúdos e reduzindo a relação água/cimento, formando uma microestrutura densa (RICHARD; CHEYREZY, 1995; BONNEAU *et al.*, 2000). O empacotamento granular de sua microestrutura é aprimorado utilizando-se partículas que estendem uma faixa de tamanho desde partículas submicrométricas até grãos de areia fina de 2,0 mm, formando uma melhor distribuição granulométrica (BONNEAU *et al.*, 2000).

Em vista disso, o concreto de pós reativos apresenta diversas melhorias se comparado com o concreto convencional. Com a microestrutura da matriz cimentícia densa e homogênea, o compósito apresenta baixa porosidade e alta durabilidade. Por esse motivo, a melhora no desempenho mecânico é considerável, apresentando resistência à compressão acima de 200 MPa, energia de fratura até 40.000 J/m² e módulo de elasticidade entre 50 GPa e 60 GPa (RICHARD; CHEYREZY, 1995; BONNEAU *et al.*, 2000; YAZICI *et al.*, 2009).

Segundo Richard e Cheyrezy (1995), as medidas relacionadas à composição (microestrutura granular densa e homogênea) são a base do conceito do CPR e, sendo assim, aplicadas em todos os casos. Por outro lado, as medidas relacionadas à produção (aplicação de pressão e cura por

calor) são medidas opcionais projetadas para melhorar o desempenho. Dessa forma, são utilizados os seguintes componentes granulares para a produção do CPR base:

- Cimento

Devido à baixa relação água/cimento utilizada na mistura, a escolha do tipo de cimento deve estar sempre associada com a escolha do aditivo superplastificante, pois deve haver uma boa compatibilidade química entre esses dois componentes.

De acordo com Richard e Cheyrezy (1995), são indicados cimentos com baixo teor de Aluminato Tricálcio (C_3A), uma vez que esse teor influencia no efeito do aditivo. Além disso, eles também observaram que cimentos com alta finura apresentaram resultados insatisfatórios, uma vez que demandam de um alto teor de água para a sua hidratação.

Richard e Cheyrezy (1995) ainda indicam em sua pesquisa a utilização de cimentos com alto módulo de sílica, pois apresentam melhor desempenho mecânico e características reológicas. Contudo, esse tipo de cimento apresenta uma taxa de endurecimento muito lenta, inviabilizando seu uso em determinadas aplicações.

Para Bonneau *et al.* (1996), o Cimento Portland comum (CP-I) é o mais indicado para a produção do CPR. Segundo Biz (2001), muitos autores utilizam o Cimento Portland de alta resistência inicial (CP-V-ARI) sem adições e obtêm resultados satisfatórios.

- Agregado de areia de quartzo fino

A seleção da areia utilizada como agregado na produção do CPR deve ser definida observando parâmetros de composição mineral, tamanho médio das partículas, distribuição granulométrica e formato das partículas (RICHARD; CHEYREZY, 1995).

Em relação à composição mineral, Richard e Cheyrezy (1995) recomendam o quartzo por oferecer algumas vantagens. Além de possuir boa disponibilidade e baixo custo, o quartzo favorece a obtenção de uma resistência mais elevada, por ser um mineral muito duro. Sua utilização ainda apresenta uma ótima interface pasta/agregado.

A areia quartzosa é o agregado de maior dimensão na mistura do CPR. Richard e Cheyrezy (1995) propõem utilizar areias com a granulometria dentro do intervalo de 150 μm e 650 μm . Na pesquisa de Yazici *et al.* (2008), foram utilizadas misturas com

granulometria no intervalo entre 500-1000 μm e 1000-3000 μm . A baixa granulometria da areia favorece a homogeneização dos materiais, diminuindo os vazios e os poros capilares, contribuindo para uma menor porosidade do compósito (BIZ, 2001).

Acerca do formato das partículas, de acordo com Richard e Cheyrezy (1995), a demanda de água é menor para grãos mais esféricos, oriundos do peneiramento da areia natural, o que é preferível.

- Sílica Ativa

A utilização da sílica ativa na mistura tem como principal função preencher os vazios das partículas de cimento, principalmente devido ao formato arredondado de suas partículas e seu tamanho cerca de 100 vezes menor (RICHARD; CHEYREZY, 1995; TUTIKIAN *et al.* 2011). Uma microestrutura densa, sem vazios, com maior empacotamento granular das partículas são características fundamentais do concreto de pós reativos, o que torna a presença da sílica ativa essencial na mistura. Além disso, devido ao efeito de lubrificação decorrente da esfericidade das partículas do material, o seu emprego aprimora as propriedades reológicas do compósito (RICHARD; CHEYREZY, 1995).

Outro grande efeito do uso da sílica ativa é referente a intensiva reação química, produzindo hidrato de sílica devido a reação pozolânica com a cal originária da hidratação primária (RICHARD; CHEYREZY, 1995; CHAN; CHU, 2004).

- Pó de Quartzo

A adição do pó de quartzo na composição da mistura tem como objetivo contribuir para o fechamento do pacote granulométrico e intensificar as reações pozolânicas, quando o CPR é submetido a cura térmica (RICHARD; CHEYREZY, 1995).

Em estudos realizados no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa, Machado (2019) substituiu o pó de quartzo por resíduos originários do corte de granito, obtendo resultados satisfatórios. Isso se deve ao fato de que o granito é uma rocha ígnea, constituída por minerais quartzosos.

- Aditivo Superplastificante

A utilização de um aditivo superplastificante é essencial para garantir a baixa relação água/cimento e uma boa trabalhabilidade na mistura do CPR, sem alterar a composição do traço. Atualmente, os superplastificantes de 3ª geração são os mais utilizados para a produção do CPR (MACHADO, 2019).

O concreto de pós reativos base, contendo apenas os materiais supracitados, apresenta uma matriz com resistência à compressão muito alta devido à sua microestrutura densa e homogênea, conforme apresentado anteriormente. Contudo, o compósito não apresenta melhora na ductilidade em relação a uma argamassa convencional (RICHARD; CHEYREZY, 1995).

Com o intuito de se aprimorar a ductilidade do CPR, foram realizados estudos com a incorporação de fibras de aço na mistura. A partir disso, obteve-se resultados satisfatórios, não somente na aquisição de um nível de ductilidade necessário, mas também na melhora da resistência à tração, na coibição de propagação de fissuras (RICHARD; CHEYREZY, 1995; OLIVITO; ZUCCARELLO, 2010; ZHENG *et al.*, 2013). A presença da sílica ativa no material promove uma melhora considerável nas características de ligação entre a matriz e as fibras (CHAN; CHU, 2004).

Raza *et al.* (2021) estudaram as propriedades mecânicas do CPR incorporando fibras de carbono e fibras de vidro, além das fibras de aço. Os resultados de sua pesquisa mostraram que o CPR incorporado com fibras de aço apresentou maior tenacidade e resistência à tração e à flexão; enquanto o CPR incorporado com fibras de carbono apresentou os melhores resultados para resistência à compressão.

O ganho de resistência mecânica do CPR em relação ao concreto convencional, em conjunto com a baixa porosidade e alta durabilidade e ductilidade desse material, torna viável a sua utilização como material de reforço e recuperação de estruturas de concreto armado (LEE *et al.*, 2007).

2.2. Concreto reforçado com fibras

2.2.1. Considerações gerais

O Concreto Reforçado com Fibras (CRF) é um material caracterizado pelo ganho de resistência residual à tração no período de pós-fissura, devido aos efeitos mecânicos providos pelo reforço da fibra, atuante nas superfícies das fissuras (DI PRISCO *et al.*, 2009). A adição de fibras na mistura de concreto aumenta as resistências à compressão, tração e cisalhamento, tenacidade à flexão, durabilidade e resistência ao impacto (HOLSCHEMACHER *et al.*, 2010).

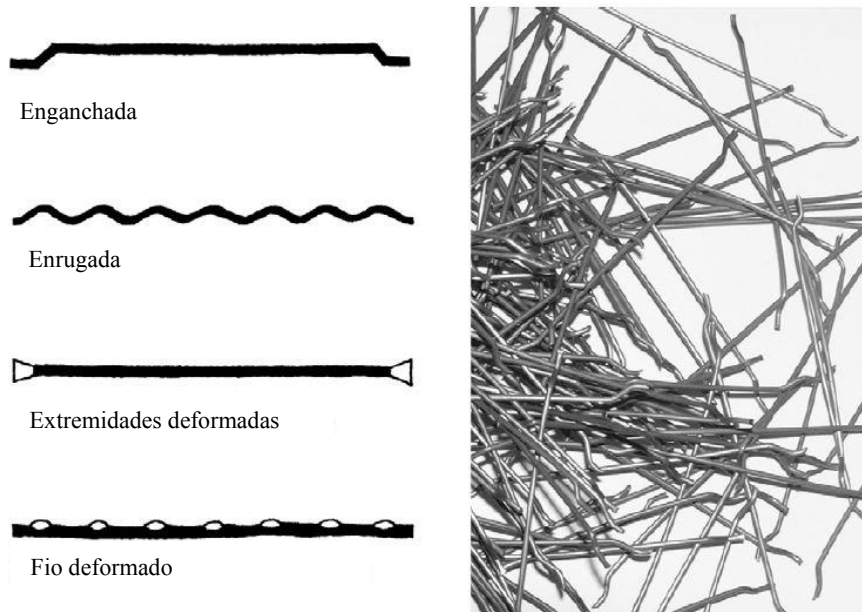
Os principais tipos de fibras utilizadas em concretos estruturais são (BRANDT, 2005):

- fibras e microfibras de aço, com diferentes formas e dimensões;
- fibras de vidro, normalmente utilizadas como fibras resistentes a álcalis;
- fibras sintéticas de diferentes materiais, como polipropileno, polietileno, álcool polivinílico, entre outras;
- fibras de carbono, piche e poliacrilonitrila;
- fibras vegetais.

As fibras de baixo módulo de elasticidade, como as sintéticas de polipropileno, são utilizadas em pequenas quantidades para controlar a fissuração por contração do concreto nas primeiras idades e melhorar a resistência ao fogo (BRANDT, 2008; DI PRISCO *et al.*, 2009). As fibras com alto módulo de elasticidade, como as de aço e carbono, são empregadas no concreto estrutural (DI PRISCO *et al.*, 2009). As fibras de carbono possuem alta resistência à flexão e propriedades elétricas, como sensibilidade à tensão, enquanto as variadas modificações de formas das fibras de aço melhoram a ligação fibra-matriz, melhorando a sua eficiência (BRANDT, 2008).

Os tipos mais comuns de fibras de aço são: reta, enganchada, enrugada, com extremidades deformadas e com fio deformado, variando tanto o comprimento como a seção, podendo essa ser circular, quadrada, retangular ou irregular. Na Figura 2.1 apresenta-se um desenho esquemático das principais formas geométricas das fibras de aço, assim como uma foto do tipo mais usado no mercado.

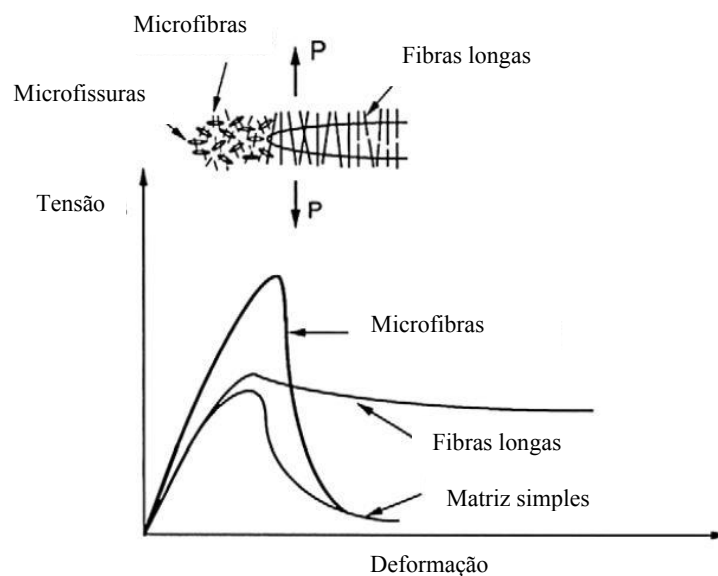
Figura 2.1: Formas geométricas dos principais tipos de fibras de aço e um exemplo de fibra enganchada



Fonte: Adaptado de Katzer; Domski (2012)

De acordo com Brandt (2008), as microfibras, aquelas mais finas e com menor seção, controlam a abertura e propagação das microfissuras, pois estão mais densamente dispersas na matriz de cimento, aumentando a resistência final do CRF. Enquanto isso, as fibras mais longas controlam as trincas maiores e contribuem com o aumento da ductilidade. Na Figura 2.2 representa-se esse comportamento.

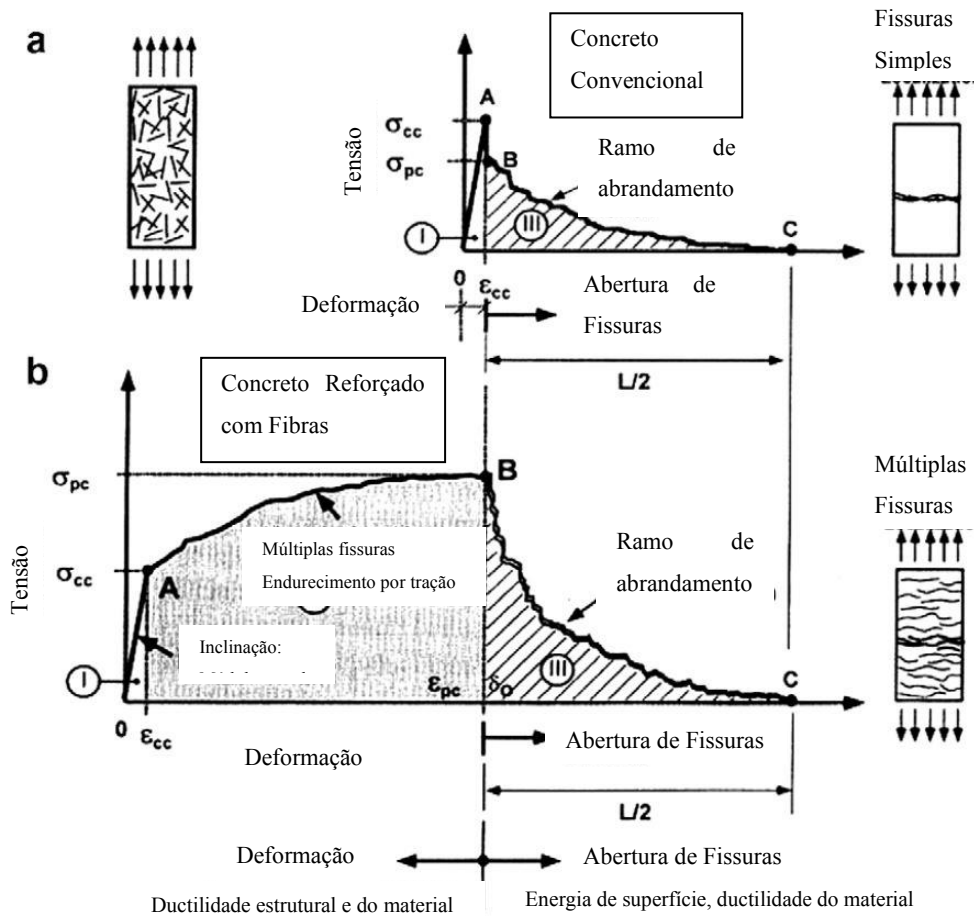
Figura 2.2: Propagação de fissuras a partir de microfibras e fibras longas



Fonte: Adaptado de Betterman *et al.* (1995)

O aumento do volume e da eficiência da fibra influenciam o comportamento de um elemento de concreto reforçado com fibras de aço (CRFA). Na Figura 2.3 demonstra-se a diferença de comportamento entre um concreto convencional e um concreto reforçado com fibras. A partir do surgimento da primeira fissura, a presença das fibras de aço começa a surtir efeito, havendo um endurecimento por tração, acompanhado de múltiplas fissuras e um aumento de energia absorvida, representado pela área sob a curva (BRANDT, 2008).

Figura 2.3: Comparação do comportamento tensão-deformação devido a presença das fibras



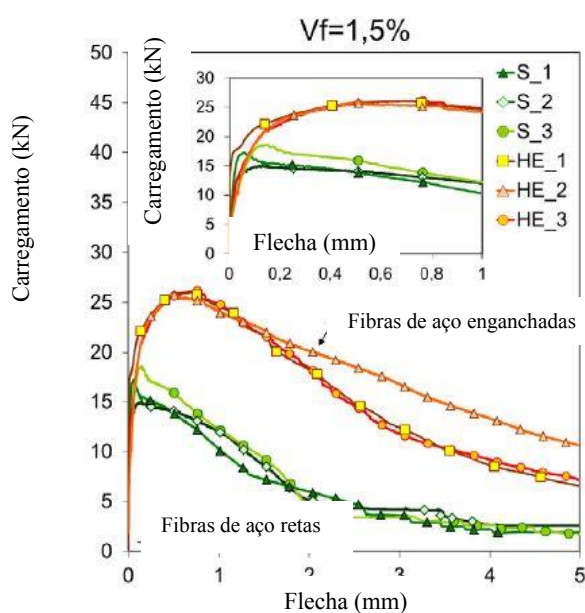
Fonte: Adaptado de Naaman (2003)

Segundo Olivito e Zuccarello (2010), um traço bem elaborado é fundamental para um concreto reforçado com fibras de aço, pois as propriedades físicas e mecânicas do compósito dependem da dosagem e propriedades da matriz cimentícia e das fibras. Segundo os autores, o comportamento pré-fissuração é governado pelas propriedades da matriz, que deve ter boas propriedades mecânicas para transferir as tensões para as fibras, que passam a governar o comportamento pós-fissuração.

A dosagem de fibra de aço em concreto de ultra performance (UHPC) foi objeto de estudo de Abbas *et al.*, (2015), que relatou que uma maior dosagem de fibras melhora a durabilidade e as propriedades mecânicas do concreto, utilizando dosagens de 1%, 3% e 6% sobre o volume total na sua pesquisa. Ou *et al.*, (2011) constataram que fibras de aço enganchadas contribuíram com uma maior deformação no pico de tensão a um volume de 2%, mas interferiu pouco no módulo de elasticidade e na resistência à compressão. Já Song e Hwang (2004) observaram que houve um ganho significativo na resistência à tração e flexão com o uso de 2% de fibras de aço enganchadas. Além disso, foi verificado em Al-Tikrite e Hadi (2017) que a adição de 4% de microfibra de aço industrial alcançou o maior aumento na resistência à compressão e à tração.

No estudo de Pajak e Ponikiewski (2013) com o uso de fibras retas e enganchadas no comportamento à flexão de concreto auto adensável, as amostras com a ponta enganchada apresentaram carga mais alta que as retas, aumentando ainda mais à medida que se ampliava o teor de fibras. Além disso, no comportamento pós-pico de carga, o reforço da fibra com ganchos apresentou uma diminuição gradual, enquanto o com as retas indicaram uma queda repentina. Isso indica que a ligação mecânica entre a fibra e a matriz é aprimorada pela forma deformada, formando tensões de ponte através da fissura, impedindo sua propagação (PAJAK; PONIKIEWSKI, 2013). Na Figura 2.4 apresenta-se o resultado desse estudo e evidencia-se o comportamento indicado pela Figura 2.3; onde S_1, S_2 e S_3 se referem a fibras retas e HE_1, HE_2 e HE_3 a fibras de pontas enganchadas, cada um em três dosagens diferentes.

Figura 2.4: Gráfico carregamento-deflexão de vigas com fibras retas e enganchadas



Fonte: Adaptado de Pajak; Ponikiewski, (2013)

A orientação e distribuição das fibras de aço no elemento solicitado podem interferir no ganho de resistência, de acordo com o comportamento estudado. Isso se deve pelo fato de os esforços solicitantes agirem em direções distintas, como cisalhamento e flexão (PARK, *et al.*, 2021). Além disso, caso não haja uma distribuição uniforme das fibras no elemento, uma região com alta concentração de fibras pode gerar um pico de tensão naquele ponto (PARK, *et al.*, 2021).

Park *et al.* (2021) notaram em seus estudos que as fibras de aço fluíam verticalmente com o concreto fresco de acordo com seu comportamento reológico. Também observaram que a maioria das fibras se localizavam na região inferior, mais distantes do molde. A razão para isso era que as fibras de aço no concreto tendiam a se mover para baixo e então estagnavam no centro quando o concreto estava fresco por causa do superplastificante. Além disso, a densidade das fibras de aço era maior do que a dos outros materiais.

2.2.2. Dosagem e recomendações para a incorporação de fibras no concreto

O concreto incorporado com fibras não se difere de um concreto convencional, as fibras devem ser consideradas como um novo componente na mistura, ou seja, um novo agregado (SARZALEJO *et al.*, 2009). Dessa forma, é necessário calcular o traço considerando a adição das fibras no projeto da mistura.

As recomendações básicas para a incorporação de fibras de aço na mistura são relacionadas a seleção adequada de sua forma geométrica, e ao volume adicionado. É preciso garantir uma distribuição uniforme das fibras, evitando problemas como segregação e aglomeração (SARZALEJO *et al.*, 2009). Para um concreto estrutural, indica-se um volume mínimo de 0,3%, chegando a 2% e até mesmo 6% para concretos de alto desempenho (SONG; HWANG, 2004; ABBAS *et al.*, 2015; AL-TIKRITE; HADI, 2017).

De acordo com Sarzalejo *et al.* (2009), o comprimento da fibra utilizada deve ser, no mínimo, o dobro da dimensão máxima dos agregados, com variação de até 20% para mais ou para menos:

$$L_{\text{fibra}} \geq 2\phi_{\text{máx}}$$

Sendo o comprimento também definido a partir da dimensão mínima do elemento estrutural, também com variação de até 20%:

$$S_{\text{min}} \geq 1,5 L_{\text{fibra}}$$

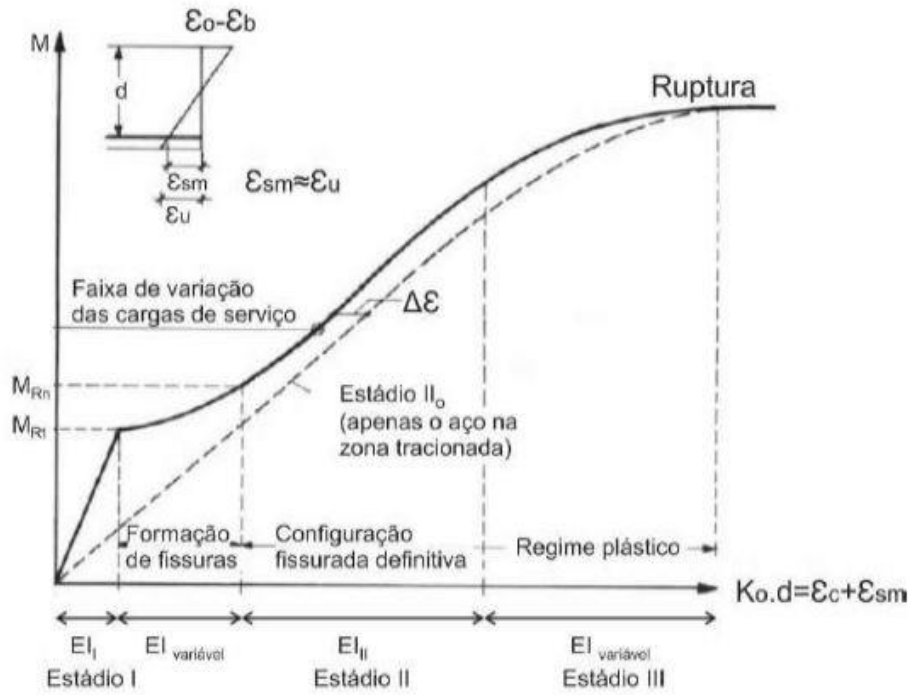
O fator de forma da fibra é outro fator que influencia em sua dosagem no concreto (SARZALEJO *et al.*, 2009). O fator de forma é a relação entre o comprimento da fibra sobre o seu diâmetro (L/D). Segundo Sarzalejo *et al.* (2009), aumentando-se o fator de forma da fibra, diminui-se a sua dosagem, para atingir um mesmo resultado de resistência esperada. De acordo com o autor, isso ocorre devido ao aumento da resistência à tração de fibras de maior comprimento.

2.3. Comportamentos e modos de falhas das vigas de concreto armado submetidas a flexão

Em uma viga de concreto armado dimensionada para resistir à esforços de flexão simples, uma parte da seção crítica da peça sofre compressão, enquanto a extremidade oposta da seção é tracionada. Desse modo, a viga é projetada para que o concreto seja capaz de resistir aos esforços de compressão, e o aço, por sua vez, aos esforços de tração. Contudo, para que a armadura de aço de uma viga de concreto armado seja solicitada, é necessário que o concreto tracionado tenha sua resistência superada pelo esforço de tração. Isso ocorre no momento em que a peça apresenta as primeiras aberturas de fissuras. Nesse momento, o material passa de um comportamento linear para um comportamento não-linear, com conseqüente variação da rigidez da peça (PAES, 1994).

Para avaliar os diferentes comportamentos de uma viga de concreto armado, é necessário aplicar um carregamento progressivo na peça até o seu colapso, à medida que o carregamento aumenta, o elemento passa por fases divididas em Estádios (PINHEIRO, 2007). Durante o carregamento, basicamente três fases distintas são observadas, sendo chamadas de Estádio I, Estádio II e Estádio III (Figura 2.5).

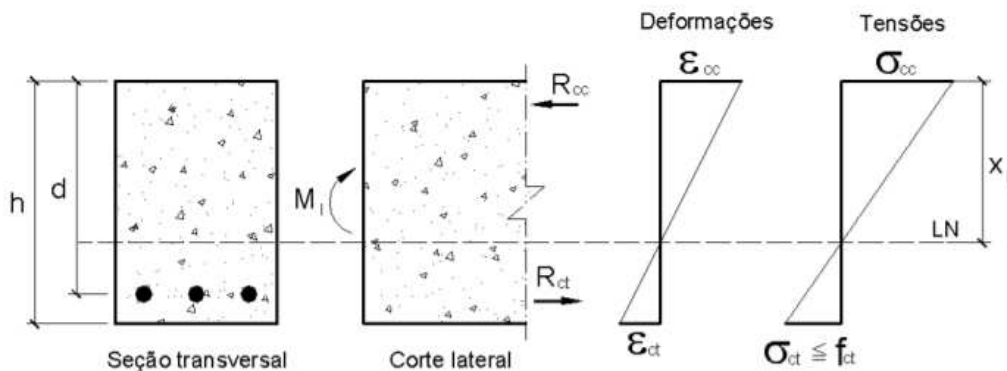
Figura 2.5: Diagrama momento-curvatura (Estádios)



Fonte: Adaptado de Leonhardt, (1979)

O Estádio I ocorre no início do carregamento, em tensões de baixa magnitude, com o concreto sendo capaz de resistir aos esforços de tração. Dessa forma, o elemento se mantém íntegro, possuindo um diagrama linear de tensões ao longo da seção transversal, respeitando a Lei de Hooke (Figura 2.6). O surgimento da primeira fissura, no instante em que a resistência à tração do concreto é ultrapassada, caracteriza a passagem do Estádio I para o Estádio II.

Figura 2.6: Comportamento do concreto na flexão pura (Estádio I)



Fonte: Pinheiro (2007)

A separação desses dois Estádios pode ser calculada a partir da equação do momento de fissuração, expressada pela ABNT NBR 6118:2014 como:

$$M_r = \frac{\alpha \cdot f_{ct} \cdot I_c}{y_t}$$

Sendo,

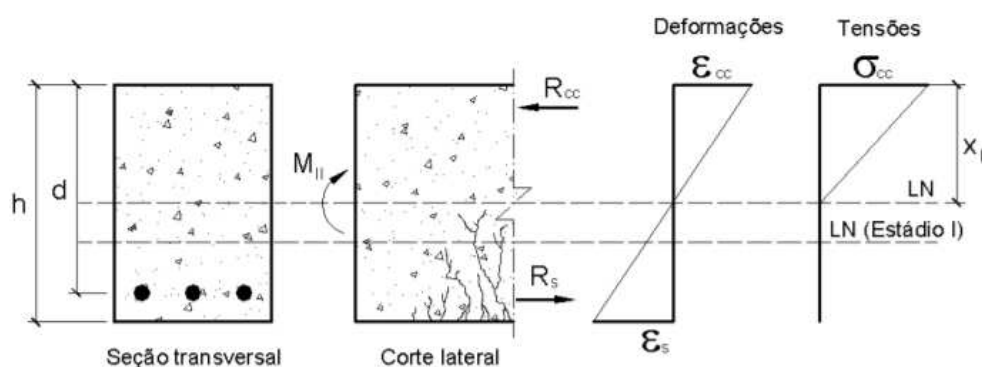
α é o fator que correlaciona a resistência à tração na flexão com a resistência à tração direta. Tendo valores de 1,2 para seções T ou duplo T e 1,5 para seções retangulares; f_{ct} se refere à resistência do concreto à tração direta, sendo calculada como $0,21f_{ck}^{2/3}$ para o estado limite de formação de fissura (f_{ct} e f_{ck} em MPa);

I_c é o momento de inércia da seção bruta do concreto;

y_t é a distância do centro de gravidade da seção à fibra mais tracionada.

No Estádio II₀, ou Estádio II puro, considera-se o aço como sendo o único responsável por resistir aos esforços de tração, desprezando-se, assim, a resistência do concreto tracionado. No entanto, a parte comprimida da peça mantém o comportamento elástico-linear. Durante esse estágio, à medida que o carregamento aumenta, há um aumento das fissuras em direção à linha neutra, que se eleva em relação à posição inicial (Figura 2.7). É no Estádio II em que são verificados os estados limites de serviço da peça, como limite de abertura de fissuras e deformações excessivas (PINHEIRO, 2007). A transição do Estádio II para o Estádio III é definida a partir do início da plastificação do concreto comprimido.

Figura 2.7: Comportamento do concreto na flexão pura (Estádio II)

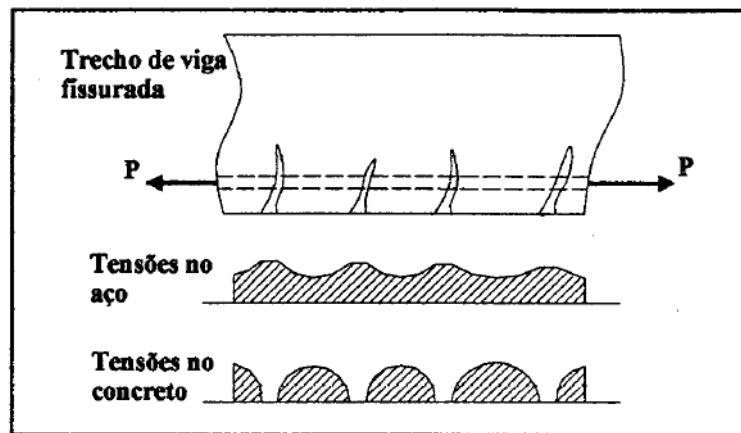


Fonte: Pinheiro (2007)

Vale salientar que, em uma análise mais aprofundada sobre o comportamento da peça no Estádio II, o concreto contido entre duas fissuras adjacentes, apresenta parte de sua resistência à tração conservada. Esse fenômeno é conhecido como *Tension Stiffening*, representado na Figura 2.5 pela deformação $\Delta\varepsilon$. Com o aparecimento das fissuras durante a flexão, o elemento de concreto armado atua com uma rigidez variável. Em razão da restrição da deformação do aço imposta pela tensão de aderência com o concreto, ocorre um enrijecimento do elemento,

fazendo com que parte da solicitação de tração seja absorvida pelo concreto (FORTES, 2000; LIMA, 2017). Em consequência disso, surgem tensões máximas nas barras de aço nas regiões das fissuras, e tensões mínimas nas regiões adjacentes às fissuras; ocasionando o oposto no concreto na mesma região (Figura 2.8) (FORTES, 2000; GUIM; 2020). Dessa maneira, ao desconsiderar o concreto tracionado para as verificações da peça em serviço no Estádio II₀, a rigidez do elemento é menosprezada, como pode ser observado na Figura 2.5. Isso leva à cálculos em que definição das flechas são maiores do que às que realmente ocorrem.

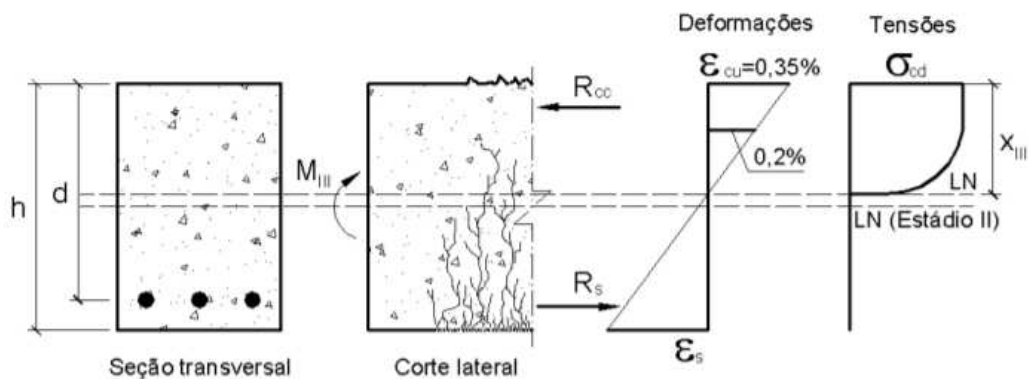
Figura 2.8: Variação das tensões de tração no aço e no concreto na região fissurada



Fonte: Fortes (2000)

O Estádio III é caracterizado pela região tracionada do concreto com um alto grau de fissuração, e a região comprimida plastificada (Figura 2.9). Nesse estágio a peça se encontra na iminência do colapso, sendo assim efetuado o cálculo de ruptura para o dimensionamento do elemento.

Figura 2.9: Comportamento do concreto na flexão pura (Estádio III)



Fonte: Pinheiro (2007)

A ruptura de uma viga de concreto armado submetida à esforços de flexão pode ocorrer de duas maneiras: alongamento último do aço ou encurtamento último do concreto. A taxa de armadura da peça é a característica básica que determina o tipo do colapso.

Usualmente, uma viga de concreto armado é dimensionada para romper por tração na flexão, ou seja, a partir do alongamento último do aço. Dessa forma, o colapso da estrutura pode ser previsto a partir do alto grau de fissuração e grande deformação do elemento. Em estruturas superarmadas, a falha ocorre por compressão na flexão, quando o concreto comprimido colapsa antes do alongamento último do aço. Esse tipo de ruptura pode ocorrer de forma brusca e sem aviso prévio. Em situações menos comuns, para estruturas subarmadas, em que a resistência à tração do concreto é superior à da armadura longitudinal da peça, ocorre uma ruptura brusca com o surgimento das primeiras fissuras. Diante disso, as normatizações de dimensionamento estrutural exigem o cálculo de uma armadura mínima, com o objetivo de se prevenir esse tipo de colapso.

2.4. Estimativa da rigidez à flexão de vigas de concreto armado e seu grau de deterioração

2.4.1. Módulo de Elasticidade do concreto

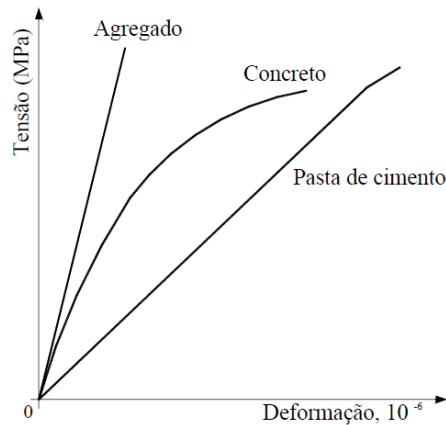
O Módulo de Elasticidade (E) do concreto expressa a relação entre a tensão aplicada e a deformação instantânea do material. Em vista disso, esse se torna um parâmetro fundamental para o estudo do comportamento e caracterização de um elemento de concreto armado.

Pela Resistência dos Materiais, para determinados intervalos, principalmente no início do carregamento, a relação entre tensão e deformação pode ser considerada linear, respeitando a Lei de Hooke. Contudo, o concreto se trata de um material heterogêneo, onde mudanças na sua microestrutura podem exercer grande influência nas suas propriedades, apresentando, assim, um comportamento não-linear (LIMA, 2017).

A não-linearidade do diagrama tensão-deformação do concreto pode ser explicada pela existência das microfissuras na zona de transição (região de interface agregado-pasta), que surgem até mesmo em condições de serviço e diminuem progressivamente a rigidez da peça (ALMEIDA, 2005). A rigidez do material composto não retrata exatamente a rigidez de seus componentes, o que pode ser observado na Figura 2.10. O diagrama tensão-deformação do

concreto (não-linear) se apresenta abrangido entre os diagramas do agregado e da pasta de cimento. Esses, por sua vez, apresentam um comportamento linear.

Figura 2.10: Comportamento tensão-deformação da pasta de cimento, do agregado e do concreto.

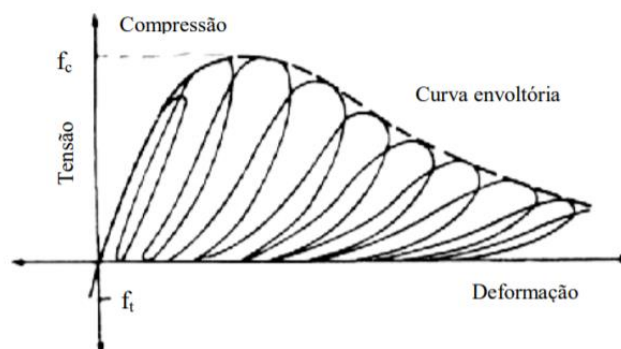


Fonte: Almeida (2005)

Com o progresso das fissuras, ocorre uma redução da área da seção transversal que resiste ao carregamento aplicado. A partir disso, a tensão e a deformação não apresentam uma proporcionalidade constante, isto é, a deformação cresce mais do que a tensão aplicada, situação que pode ser observada pelo abaulamento do gráfico tensão-deformação do concreto na Figura 2.10. Ademais, parte dessa deformação não é totalmente recuperada após a retirada da carga, constatando um comportamento pseudoplástico do concreto (ALMEIDA, 2005).

De acordo com Mehta e Monteiro (1994), a evolução da fissuração na zona de transição e na matriz diminui a resistência do material a carregamentos cíclicos. Dessa forma, o módulo de elasticidade também é afetado por esse efeito, principalmente para níveis de tensão entre 50% e 75% da resistência última do elemento. Sendo assim, ao ser submetido a ciclos de carga e descarga, o concreto vai perdendo suas características elásticas (Figura 2.11).

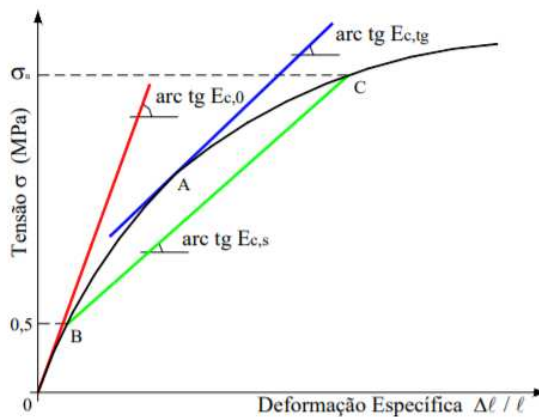
Figura 2.11: Comportamento tensão-deformação do concreto sob carregamento cíclico de compressão.



Fonte: Mehta e Monteiro (1994)

O Módulo de Elasticidade pode ser determinado como Módulo de Elasticidade Estático (E_c) ou Módulo de Elasticidade Dinâmico ($E_{c,d}$). A determinação do módulo estático (E_c) pode ser realizada por meio da metodologia apresentada pela ABNT NBR 8522:2008. Ele é definido como sendo a declividade apresentada pela curva tensão-deformação quando ocorre a aplicação de um carregamento uniaxial com velocidade controlada, podendo ser classificado como Módulo de Elasticidade Secante ($E_{c,s}$) ou Módulo de Elasticidade Tangente ($E_{c,tg}$). Como pode ser observado na Figura 2.12, o módulo tangente ($E_{c,tg}$) é dado pela inclinação da reta tangente em um ponto “A” qualquer (reta azul). Quando esta reta for tangente à curva na origem, esse será o Módulo Tangente Inicial ($E_{c,i}$) (reta vermelha). Já o módulo secante ($E_{c,s}$) é a inclinação da reta secante ao diagrama definida de um valor mínimo “B” até ao ponto “C” (reta verde), equivalente à tensão considerada.

Figura 2.12: Representação esquemática dos módulos de elasticidade.



Fonte: Almeida (2005)

Quando não for possível a realização de ensaios para definir o Módulo de Elasticidade, a ABNT NBR 6118:2014 apresenta equações (2.1, 2.2 e 2.3) para estimar o seu valor.

$$E_{ci} = \alpha_E 5600 \sqrt{f_{ck}}, \text{ para } f_{ck} \text{ de } 20 \text{ MPa a } 50 \text{ MPa} \quad (2.1)$$

$$E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \alpha_E \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25 \right)^{1/3}, \text{ para } f_{ck} \text{ de } 55 \text{ MPa a } 90 \text{ MPa} \quad (2.2)$$

sendo: $\alpha_E = 1,2$ para basalto e diabásio; $\alpha_E = 1,0$ para granito e gnaisse; $\alpha_E = 0,9$ para calcário; $\alpha_E = 0,7$ para arenito.

em que: E_{ci} e f_{ck} são dados em megapascal (MPa)

$$E_{cs} = \alpha_i E_{ci} \quad (2.3)$$

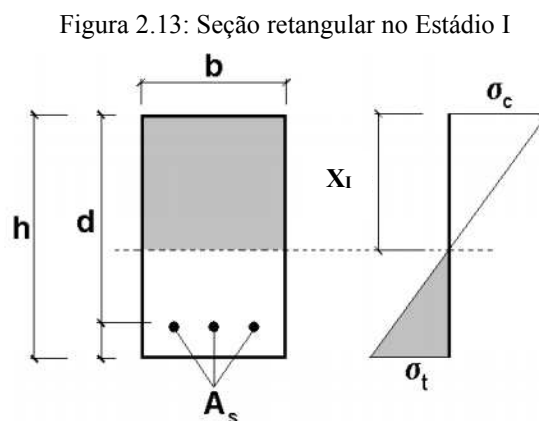
sendo: $\alpha_i = 0,8 + 0,2 \frac{f_{ck}}{80} \leq 1,00$

Segundo Almeida (2005), o Módulo de Elasticidade Dinâmico ($E_{c,d}$) permite colher informações sobre a deformabilidade do concreto, da integridade da estrutura, da rigidez de um elemento estrutural e de suas ligações com outros elementos estruturais. Porém, ainda não existem normas no Brasil para a determinação do $E_{c,d}$.

2.4.2. Momento de inércia da seção transversal do concreto armado

O momento de inércia pode ser entendido como a dificuldade em se alterar o estado de um corpo, no caso desse estudo, a resistir à esforços de flexão. Quanto maior o momento de inércia de uma seção, maior será sua resistência às deformações, devida a uma solicitação de flexão. Esse parâmetro depende da distribuição de massa em torno de um eixo, ou seja, varia de acordo com a seção da peça e do material. No caso do concreto armado, por ser composto por materiais com propriedades distintas (concreto e aço), o momento de inércia é determinado por meio da homogeneização da seção (PINHEIRO, 2007).

Para uma seção retangular, isenta de fissuração (Estádio I) e com armadura simples (Figura 2.13), o momento de inércia da seção transversal (I_I) é dado por:



Fonte: Pinheiro (2007)

$$I_I = \frac{bh^3}{12} + bh \left(x_I - \frac{h}{2} \right)^2 + (\alpha_e - 1) A_s (d - x_I)^2 \quad (2.4)$$

em que:

I_I é o momento de inércia no Estádio I;

b é a largura da alma da viga;

h é a altura da viga;

x_I é a posição da linha neutra no Estádio I, dada pela (2.5);

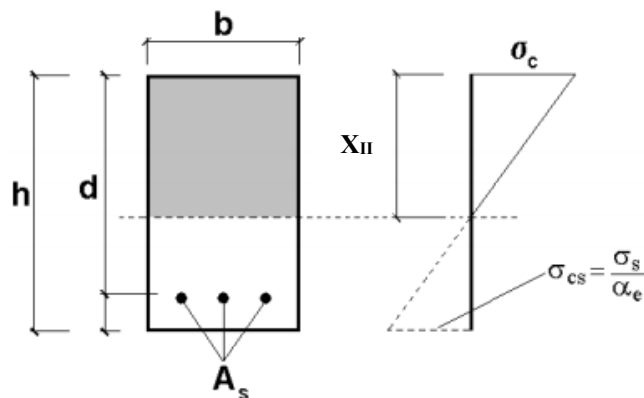
$$x_I = \frac{\frac{bh^2}{2} + (\alpha_e - 1)A_s d}{bh + (\alpha_e - 1)A_s} \quad (2.5)$$

α_e é a relação entre o módulo de elasticidade do aço (E_s) e o módulo de elasticidade secante do concreto (E_{cs});

A_s é área da armadura tracionada.

Para uma seção retangular, fissurada (Estádio II₀) e com armadura simples (Figura 2.14), o momento de inércia da seção transversal (I_{II}) é dado por:

Figura 2.14: Seção retangular no Estádio II



Fonte: Pinheiro (2007)

$$I_{II} = \frac{bx_{II}^3}{3} + (\alpha_e - 1)A_s(d - x_{II})^2 \quad (2.6)$$

em que:

I_{II} é o momento de inércia no Estádio II₀;

x_{II} é a posição da linha neutra no Estádio II₀, dada pela solução da (2.7).

$$\frac{bx_{II}^2}{2} - \alpha_e A_s (d - x_{II}) = 0 \quad (2.7)$$

A equação 2.6 não leva em consideração a variação do momento fletor ao longo do vão da peça, baseando-se apenas no cálculo da seção mais crítica. Além disso, existe uma parcela de concreto resistente à tração não considerada no Estádio II₀ (*Tension Stiffening*). Dessa forma, a ABNT NBR 6118:2014 utiliza o conceito de inércia equivalente (I_{eq}). Essa expressão visa aproximar o valor do momento de inércia com o que ocorre na realidade, incluindo parcelas desconsideradas do Estádio II₀:

$$I_{eq} = \left(\frac{M_r}{M_a}\right)^3 I_c + \left[1 - \left(\frac{M_r}{M_a}\right)^3\right] I_{II} \quad (2.8)$$

em que:

I_c é o momento de inércia da seção bruta de concreto;

I_{II} é o momento de inércia no Estádio II₀;

M_r é o momento de fissuração calculado com $f_{ct} = f_{ctm}$, dado por:

$$M_r = \frac{\alpha f_{ct} I_c}{y_t}, \text{ sendo } y_t = \text{distância do centro de gravidade até a fibra mais tracionada};$$

M_a é o momento fletor na seção crítica, para combinação quase permanente.

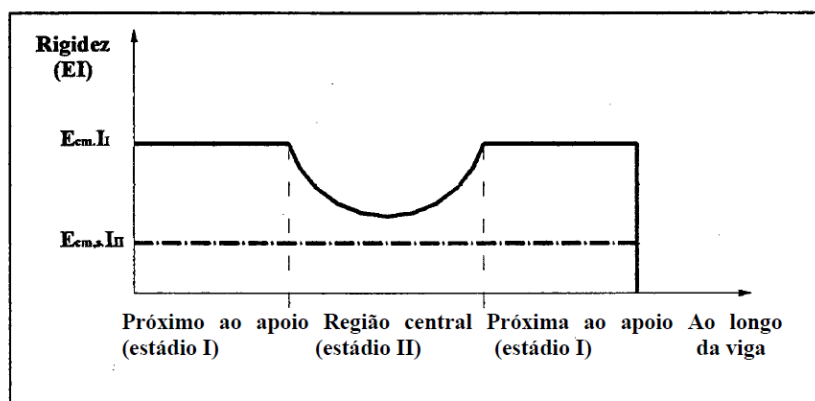
2.4.3. Estimativa da rigidez à flexão do concreto fissurado

A rigidez à flexão (EI) de um elemento pode ser definida como sua resistência à deformação quando submetido a esforços de flexão. Assim, a rigidez de uma peça de concreto armado sofre alterações à medida que um carregamento aplicado é elevado. Isso ocorre tanto pelo processo de deterioração da estrutura do material, que influencia no valor do módulo de elasticidade, quanto pela alteração do momento de inércia do elemento, ocasionado pela alteração da área da seção transversal, devido ao surgimento de fissuras.

Dessa maneira, devido às sucessivas alterações na seção transversal e diferentes análises durante as mudanças dos Estádios de carregamento (Item 2.3), determinar a rigidez de um elemento de concreto armado em serviço torna-se uma tarefa muito complexa. Além da variação da rigidez no eixo transversal, o elemento flexionado também apresenta variações de

sua rigidez ao longo do eixo axial. Durante um carregamento, a região central de uma peça fletida se situa em um Estádio mais elevado em relação às regiões mais próximas dos apoios (Figura 2.15). À medida que o carregamento é elevado, esse comportamento referente à região central aumenta cada vez mais em direção aos apoios (FORTES, 2000).

Figura 2.15: Rigidez à flexão ao longo do eixo axial de uma viga



Fonte: Fortes (2000)

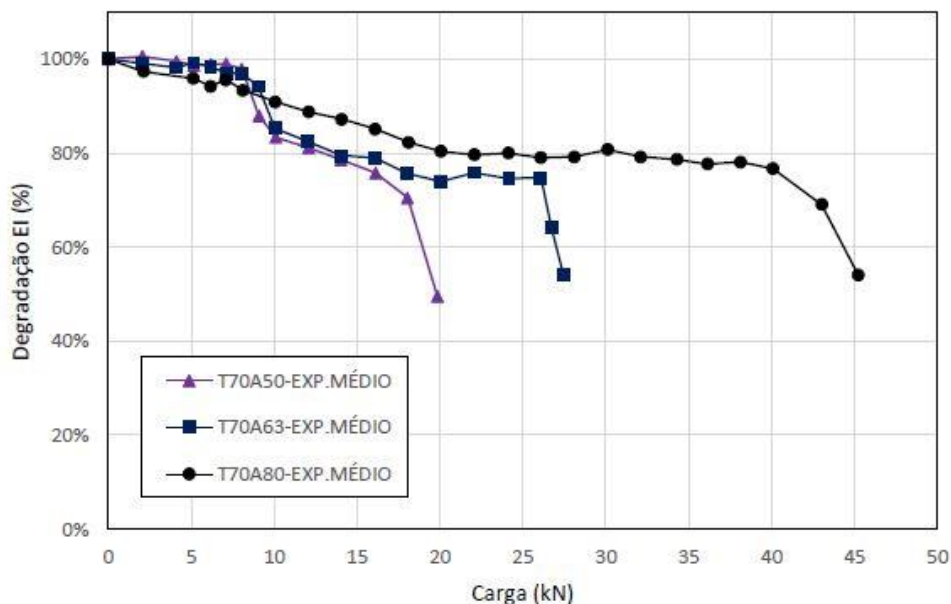
Em vista dessa complexidade de se aferir a rigidez de elementos de concreto armado fissurados, a ABNT NBR 6118:2014 propõe utilizar o modelo analítico da expressão (2.8), conjuntamente com o valor secante do módulo de elasticidade do concreto ($E_{c,s}$). A partir dessa expressão (2.9), denominada como uma rigidez equivalente do elemento ($(EI)_{eq}$), há uma ponderação entre os estádios I e II, obtendo um valor mais aproximado do real.

$$(EI)_{eq} = E_{c,s} I_{eq} \quad (2.9)$$

Nos estudos de Lima (2017), foi investigada a degradação da rigidez de vigas de concreto armado submetidas a um processo de dano progressivo. Na execução da experimentação, foram ensaiadas vigas com quatro valores de relação água/cimento e três valores de taxa de armadura, alterando o diâmetro das barras de aço longitudinais. Foi constatado que quando os elementos atingem o colapso ainda conservam entre 50% e 60% de sua rigidez inicial. Além disso, também foi observado que, com o aumento da taxa de armadura, a degradação da rigidez se deu para um nível de carga mais elevado. Contudo, a variação da taxa de armadura não alterou o comportamento do Diagrama de Degradação da Rigidez, conservando a rigidez residual entre 40% a 60% da inicial na região de colapso do elemento. Essa influência da armadura sobre a degradação da rigidez pode ser observada na Figura 2.16. Nos resultados apresentados no

gráfico, foi utilizada uma relação água/cimento de 0,70, alterando-se a taxa de armadura com a utilização de barras de $\phi 5,0$, $\phi 6,3$ e $\phi 8,0$.

Figura 2.16: Diagrama de degradação da rigidez percentual.



Fonte: Lima (2017)

Dessa forma, Lima (2017) desenvolveu em sua pesquisa uma metodologia capaz de estimar a rigidez à flexão e de uma viga de concreto armado a partir de suas características dinâmicas, avaliando as alterações da frequência natural das vigas. Vale ressaltar que a frequência natural é uma característica do material, sendo assim, é possível basear o seu estudo para qualquer tipo de elemento de concreto armado, independentemente de sua seção em particular.

2.5. Manifestações patológicas e reforço de estruturas de concreto armado

Elementos de concreto armado se deterioram com o passar do tempo, seja por erros de concepção do projeto, erros de execução com materiais de baixa qualidade, erros de utilização do espaço ou até mesmo por um envelhecimento natural da estrutura. Sendo assim, ao surgirem manifestações patológicas ou a estrutura passar a ficar comprometida, há a necessidade de se intervir, reforçando ou reparando esses elementos.

Souza e Ripper (1998) definem que recuperação ou reparo de uma estrutura é quando a intervenção não implica em introduzir materiais com a finalidade de aumentar ou reconstituir a capacidade de carga da estrutura, sendo reforço definido como o caso contrário. De acordo com

os autores, reforço é utilizado para corrigir falhas de projeto ou execução, aumentar a capacidade de carga da estrutura e por necessidade de mudança na concepção estrutural.

Em situações que seja necessário adotar uma técnica de reparo em uma estrutura danificada, é imprescindível que se conheçam as causas das manifestações patológicas. As causas dos processos de deterioração podem ser intrínsecas, sendo essas inerentes às próprias estruturas, com sua origem nos materiais durante as fases de execução ou de utilização; ou extrínsecas, aquelas que independem do corpo estrutural em si, como os fatores externos que atacam a estrutura (SOUZA; RIPPER, 1998). Diante disso, a origem das manifestações patológicas pode advir ou de causas naturais, sendo físicas (intemperismo), químicas (ataque de sulfatos e cloretos) e biológicas (proliferação de plantas e fungos); ou falhas humanas durante o projeto, construção ou utilização; ou por ações mecânicas (recalques ou acidentes).

Para cenários onde a alternativa do reforço estrutural seja mais adequada, deve-se definir ainda a opção mais compatível do tipo de reforço. Dentre esses, destacam-se a utilização de perfis metálicos, aumento de seção e incremento de armadura, utilização de fibras de carbono e materiais compósitos, como concretos de alto desempenho, o qual será destaque neste trabalho.

De acordo com Souza e Ripper (1998), o concreto convencional é o material mais utilizado para recuperar e reforçar estruturas de concreto armado. Segundo os autores, um dos aspectos que se deve ter mais atenção na utilização desse material é em minimizar a diferença de retração do concreto novo com o concreto antigo. Para isso, utilizam-se aditivos plastificantes, para reduzir a relação água/cimento da mistura, ou em determinados casos, aditivos expansores.

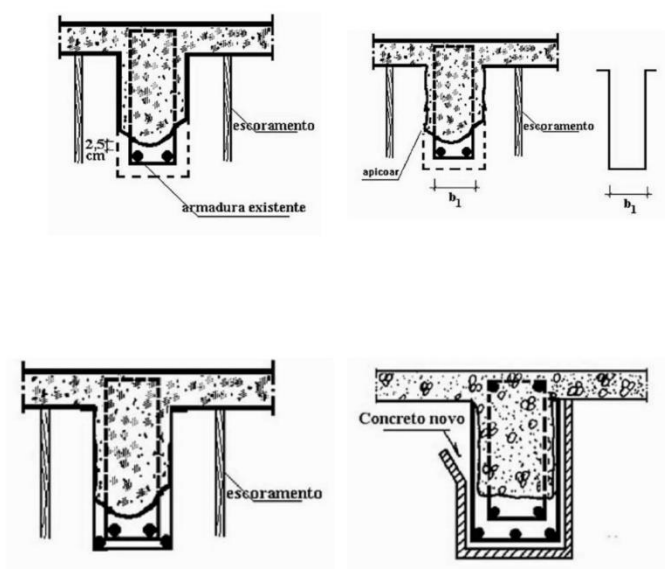
Ao se recuperar ou reforçar uma estrutura, o material incorporado deve ter, no mínimo, a mesma resistência do material antigo (EMMONS; VAYSBURD, 1996). Em certas ocasiões, o concreto utilizado como reforço pode receber incorporações de outros materiais para melhorar suas propriedades, como polímeros, sílica ativa e fibras.

Segundo Emmons e Vaysburd (1996), ao projetar um sistema de reparo, é necessário considerar os elementos antigos e novos como parte de um sistema composto, e não isoladamente. Os autores definem que a compatibilidade de um sistema de reparo é dada pelo equilíbrio das propriedades e dimensões físicas, químicas e eletroquímicas entre o material do substrato e de reparo. Esse equilíbrio garante que a estrutura reparada resista a tensões aplicadas por cargas externas, mudanças de volume e efeitos químicos, resultando em uma maior durabilidade.

Compreender esse conceito de sistemas para selecionar o material de reparo é um dos fatores determinantes para garantir um desempenho satisfatório, assim como método de aplicação, preparo da superfície, práticas de construção e inspeção.

Um caso recorrente de deterioração em estruturas, e que será objeto de estudo semelhante deste trabalho, são vigas que tiveram sua capacidade de carga à flexão reduzida, necessitando assim, de um reforço para a armadura longitudinal. Um método comum e eficiente para esse caso, é o aumento da seção transversal da peça. Souza e Ripper (1998) indicam que para essa técnica de reforço, é necessário cortar a face inferior e apicoar as laterais da viga, descobrindo toda a armadura inferior. Para o encaixe dos novos estribos que sustentarão as novas armaduras longitudinais, deve-se criar sulcos verticais nas faces laterais das vigas. Na Figura 2.17 apresenta-se o processo da técnica de aumento de seção transversal de uma viga.

Figura 2.17: Reforço de vigas com aumento de seção



Fonte: Souza e Ripper (1998)

2.6. Aderência do concreto

2.6.1. Considerações gerais

O estudo de aderência do concreto tem a finalidade de se avaliar o comportamento e a transmissão de esforços nas ligações entre os componentes do material. Um exemplo claro é a utilização do concreto armado, em que o desempenho da estrutura depende de um trabalho conjunto de dois materiais com características distintas, o aço e o concreto (GUSMÃO, 2017).

Dessa maneira, ao incluir um novo componente na mistura, é importante conhecer suas características mecânicas e sua adesão com os demais materiais constituintes.

Os principais estudos de aderência do concreto baseiam-se na aderência aço-concreto e concreto-concreto. De acordo com Santana (2004), existe uma similaridade entre os dois estudos. Em ambos os casos a ligação entre os materiais é constituída de uma zona de transição entre eles, sendo essa zona o elo mais fraco da ligação. Dessa forma, estudar maneiras de aprimorar a zona de transição entre dois materiais distintos resultará em uma melhor transmissão de esforços entre eles, ou seja, uma ligação mais forte.

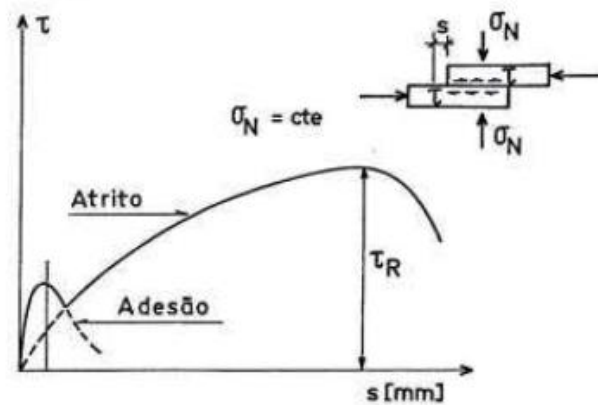
Considerando o caso mais usual, o concreto armado, a capacidade última do elemento estrutural depende da eficiência da transmissão de esforços entre o concreto e o aço, assegurada pela aderência. De acordo com Leonhardt (1979), os principais fatores que contribuem para uma boa aderência aço-concreto são adesão e atrito. Segundo o autor, adesão é o efeito físico-químico entre a pasta de cimento e a armadura, sendo o atrito um efeito mecânico, entre o concreto e as nervuras das barras de aço. Levando em consideração as fibras de aço, as deformações e irregularidades em sua forma geométrica contribuem para intensificar o atrito, e consequentemente, sua eficácia na transmissão dos esforços.

2.6.2. Aderência concreto-concreto

A utilização de um concreto novo sobre um concreto já existente é muito comum em situações de reparo e reforço de estruturas de concreto armado. Portanto, uma boa aderência entre o material antigo e o aplicado é fundamental para cumprir com o objetivo dessa aplicação.

De acordo com Souza (1990), a aderência concreto-concreto ocorre inicialmente devido à adesão entre o concreto antigo e o concreto novo e, posteriormente, ao atrito (Figura 2.18). Segundo o autor, adesão é o fenômeno físico-químico que ocorre entre os concretos durante as reações de hidratação do cimento, com a pasta do concreto novo penetrando nas ranhuras do concreto antigo, comportando-se como uma colagem entre os materiais.

Figura 2.18: Mecanismo de aderência entre concretos



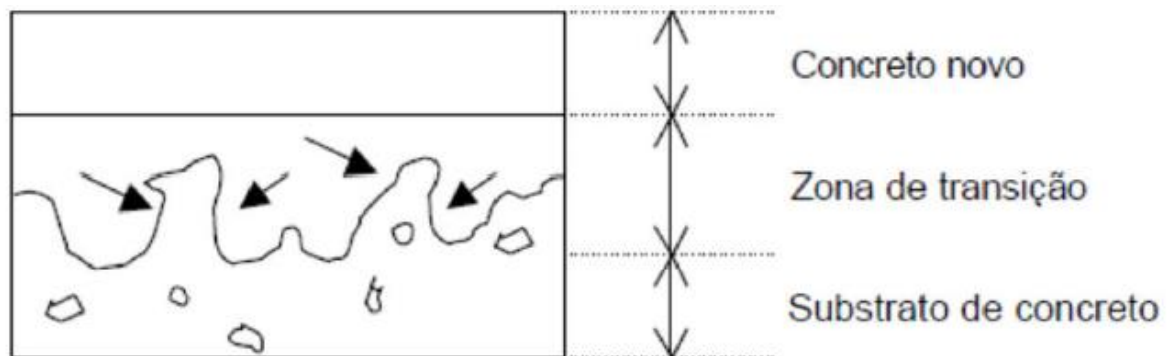
Fonte: Souza (1990)

A adesão entre dois concretos de idades diferentes é influenciada pelos seguintes fatores (SOUZA, 1990):

- Rugosidade da superfície entre os dois materiais;
- Tratamento da superfície do concreto antigo;
- Uso de agentes adesivos;
- Modo de aplicação do concreto novo.

A partir do instante em que a adesão é rompida, a aderência concreto-concreto decorre por meio do atrito. O atrito é o fenômeno mecânico, que ocorre a partir de tensões de compressão no concreto novo, provocadas por ações externas, retração ou expansão do mesmo concreto (SOUZA, 1990). Esse fenômeno ocorre devido às saliências presentes na superfície do concreto antigo, proporcionando um intertravamento na região de transição antes de ocorrer o deslizamento relativo entre os materiais (Figura 2.19).

Figura 2.19: Zona de transição entre concretos de idades distintas



Fonte: Adaptado de Emmons e Vaysburd (1996)

Segundo Souza (1990), os seguintes fatores influenciam no atrito entre dois concretos de idades distintas:

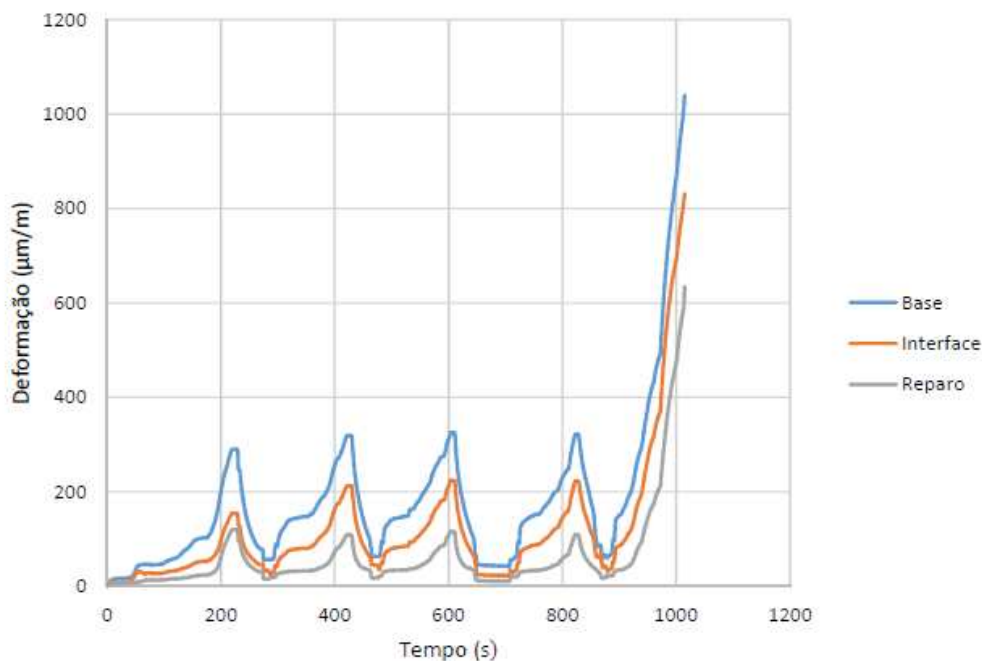
- Forma e tamanho dos agregados;
- Rugosidade da superfície entre os dois materiais;
- Resistência à compressão do concreto;
- Tensão de compressão aplicada externamente à ligação;
- Existência de cargas cíclicas.

2.6.3. Aderência CPR-concreto convencional

Ao estudar a utilização do concreto de pós reativos como um material de reparo ou reforço em estruturas de concreto convencional, é concebível inferir que a aderência entre os materiais terá um comportamento semelhante ao discutido no item 2.6.2., uma vez que a adesão e o atrito entre dois concretos de idades diferentes são os principais fatores que influenciam na aderência. A adesão é influenciada, principalmente, pela preparação da superfície do concreto antigo, e o atrito, pela rugosidade da superfície entre os materiais. Além disso, neste caso a ligação entre os materiais também será constituída das mesmas três zonas representadas na Figura 2.19.

A aderência entre CPR e concreto convencional foi objeto de estudo de Lemes (2019). Em sua pesquisa, foi investigada a influência do ângulo de inclinação da interface (zona de transição) na resistência de aderência. Os resultados apresentaram ruptura coesiva em quase todos os casos, indicando uma boa aderência entre os materiais. Também foi observado que o aumento da rigidez da interface ocasionou maiores concentrações de tensões no material de reparo, sendo os picos de tensão mais próximos da zona de transição. Ao mesmo tempo, uma interface mais rígida gerou maiores deformações no material base, o concreto convencional (Figura 2.20). Por fim, Lemes (2019) concluiu que o CPR apresenta bom coeficiente de atrito, ou seja, uma pequena preparação da superfície pode ser o suficiente para se garantir uma boa aderência. Essa mesma conclusão foi constatada por Al-Osta *et al.* (2017), porém com a utilização de UHPC, outro tipo de concreto de alto desempenho com componentes semelhantes ao CPR.

Figura 2.20: Diagrama deformação-tempo na interface entre CPR e CC



Fonte: Lemes (2019)

2.7. Estudos utilizando o CPR como reforço em um elemento estrutural de concreto armado

2.7.1. Al-Osta et al. (2017)

Al-Osta *et al.* (2017) avaliaram a eficácia de duas técnicas distintas de reforço de vigas de concreto armado, cada uma delas com três configurações diferentes. Como material de reforço, foi utilizado concreto de ultra alto desempenho incorporado com fibras de aço.

A primeira técnica se baseia em lançar o material de reforço *in loco*, utilizando um molde sobre a viga a ser reforçada, enquanto a segunda técnica utiliza o material de reforço pré-fabricado, aderido à viga por meio de um adesivo epóxi. Para ambas as técnicas avaliadas, alternou-se as faces das vigas a serem reforçadas, no primeiro caso utilizou-se uma camada de reforço apenas na face inferior. No segundo, foram reforçadas as duas laterais da viga com concreto de alto desempenho. E para o terceiro caso, foi aplicado o reforço tanto nas laterais quanto na face inferior.

Os ensaios foram realizados com o objetivo de se avaliar atributos comportamentais, como propagação de fissuras, rigidez, aderência entre as camadas de concreto convencional e concreto de reforço, além da carga de ruptura à flexão. Foram observadas melhorias

significativas nas duas técnicas estudadas, com o maior ganho de carga para o reforço aplicado nas três faces tracionadas da viga. O único ponto negativo constatado foi a perda da ductilidade do elemento reforçado, apresentando uma ruptura por esmagamento da face comprimida da viga. No entanto, é possível corrigir esse detalhe no projeto, garantindo que a ruptura ocorra pelo escoamento da armadura principal da viga.

O estudo concluiu a eficiência das técnicas avaliadas em virtude do ganho de resistência mecânica, controle da propagação das fissuras, aumento da rigidez da peça e boa aderência entre a superfície da viga e o reforço, com a peça apresentando um comportamento monolítico, mesmo sem preparação do substrato do concreto convencional. O trabalho ainda comparou os resultados experimentais com modelos analíticos e em elementos finitos, apresentando resultados compatíveis.

2.7.2. Karthik e Sundaravadivelu (2017)

Karthik e Sundaravadivelu (2017) estudaram o comportamento de vigas danificadas reparadas com uma camada de Concreto de Pós Reativos. Foram utilizadas sete vigas de dimensões 120x10x20 cm, moldadas com concreto convencional C30 e curadas por 28 dias. Uma viga foi usada como referência e ensaiada até a carga última, enquanto as demais foram estudadas com três diferentes tipos de técnicas de recuperação.

Foram realizados ensaios de flexão a quatro pontos em laboratório, as vigas foram solicitadas até 90% da carga última, de acordo com a viga controle. A partir disso, foram realizadas três técnicas de recuperação: encamisamento da viga com CPR em suas três faces que recebem esforços de tração; adição de uma camada de CPR apenas na face mais tracionada da viga; e injeção de CPR nas fissuras, seguidas de grampeamento. Para cada tipo de técnica, alternou-se as camadas de CPR entre 10 mm e 20 mm. Como preparo da superfície que viria a receber o reparo, foi executada uma limpeza, retirando a poeira, e utilizada uma esmerilhadeira para tornar a superfície mais áspera, para aprimorar a ligação entre o concreto antigo com o CPR adicionado.

Foi constatado após os ensaios que os três métodos foram capazes de, pelo menos, recuperar a resistência original do elemento. As vigas com a camada de 20 mm de espessura de CPR apresentaram os melhores resultados para as três técnicas, com aumento de até 22,9% em relação à resistência original para a viga encamisada.

Dessa forma, concluiu-se a partir do estudo que o Concreto de Pós Reativos é um material viável de ser utilizado como reparo de estruturas sob esforços de flexão. Fato que é reforçado ao não se observar nenhum caso de descolamento entre as camadas de concreto.

2.7.3. Deng et al. (2018)

No trabalho de Deng *et al.* (2018) foi estudado o comportamento flexural de vigas de concreto armado reforçadas com dois tipos distintos de compósitos: Concreto de Pós Reativos (CPR) e Concreto Reforçado com Fibras de Alta Ductilidade (CRFAD). O primeiro material possui uma composição padrão de CPR com incremento de fibras de aço com as pontas enganchadas. Enquanto isso, o CRFAD é composto apenas por uma mistura de cimento, areia, água e fibras de álcool polivinílico (PVA).

Foram desenvolvidos quatro modelos experimentais: uma viga controle sem nenhum tipo de reforço; reforço de CRFAD aplicado apenas na face mais tracionada; outro modelo com uma camada de CRFAD apenas na face mais comprimida; e o reforço de CPR aplicado apenas na face mais comprimida. A partir disso, por meio de ensaios de flexão a quatro pontos, avaliou-se a distribuição de fissuras, tipo de ruptura, capacidade de carga, ductilidade e deformação do concreto.

Observou-se pelos resultados um ganho significativo de resistência para peças reforçadas na face mais tracionada, com diminuição das fissuras, apresentando uma ruptura típica de vigas super armadas. Por outro lado, houve um grande aumento da ductilidade de peças reforçadas na face mais comprimida, com ruptura característica de elementos sub armados.

Em vista disso, o estudo concluiu que o aumento da capacidade de carga para controlar as fissuras, a partir de uma proporção muito alta de reforço, pode comprometer a ductilidade do elemento, passando a apresentar uma ruptura frágil. Por fim, propôs-se uma formulação para prever a capacidade de carga à flexão, considerada segura, consistente e conservadora.

2.7.4. Hadi et al. (2018)

Hadi *et al.* (2018) pesquisaram o uso de CPR como material de reforço a partir de um encamisamento de pilares circulares. Além do CPR, também foi estudado o uso de fibras de carbono, separados e conjuntamente. Foi investigado o comportamento axial e flexural dos pilares.

Foram confeccionados 16 pilares com 150 mm de diâmetro e 800 mm de altura, ensaiados à compressão concêntrica, excêntrica e flexão a 4 pontos. Os corpos de prova foram divididos em quatro grupos: o primeiro sem nenhum tipo de reforço, utilizado como referência; no segundo grupo de pilares, foram reforçados com uma camada dupla de fibra de carbono; o terceiro grupo recebeu uma camada de encamisamento de CPR com 25 mm de espessura; enquanto o quarto grupo foi reforçado tanto com uma camada de 25 mm de CPR quanto uma camada simples de fibra de carbono.

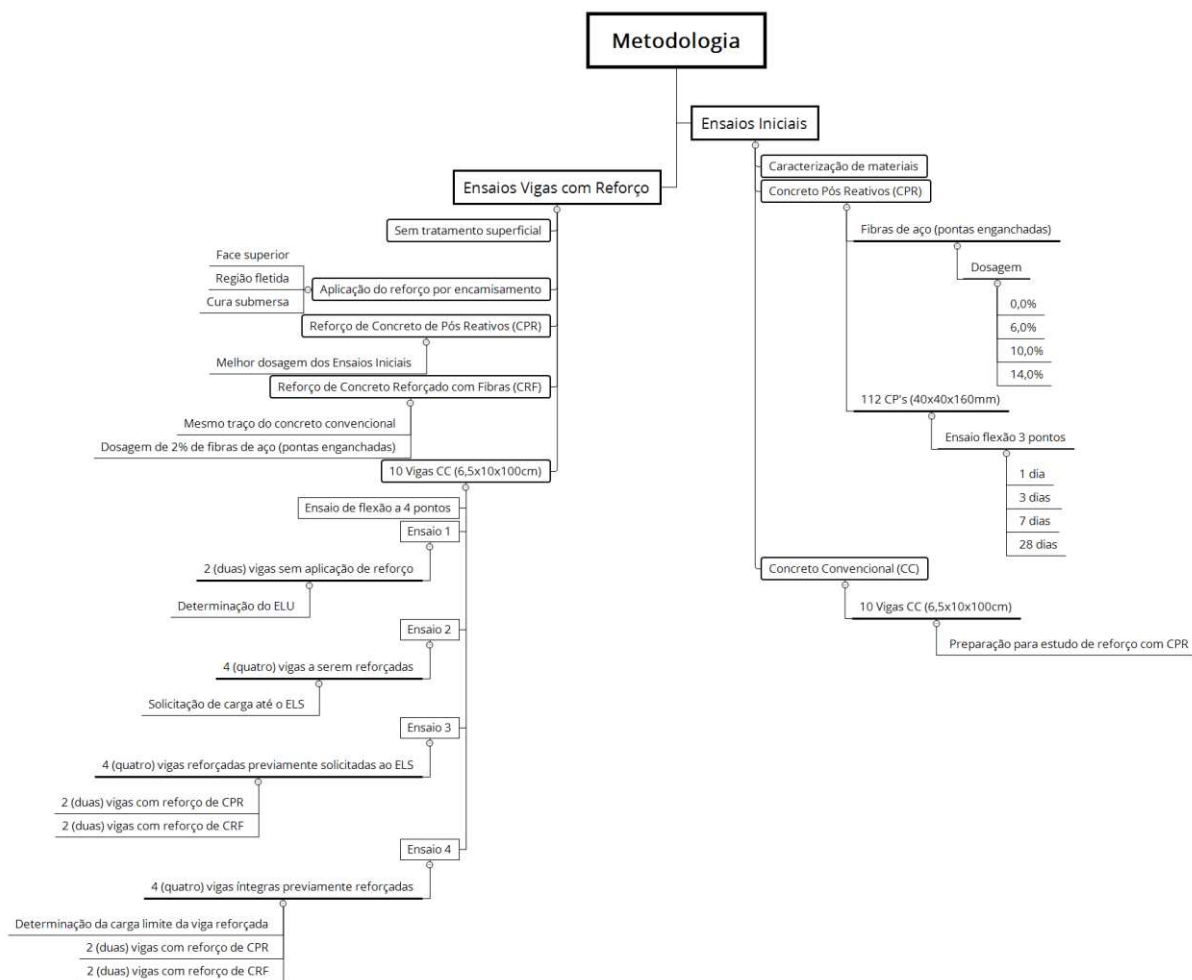
Os resultados demonstraram que o reforço com CPR melhorou significativamente a resistência à flexão e a absorção de energia, mas em relação a ductilidade, apresentou resultados inferiores que a fibra de carbono. As amostras revestidas com CPR em conjunto com as fibras de carbono apresentaram maior carga axial final e ductilidade em relação aos demais grupos.

Em vista disso, o estudo concluiu que a técnica de encamisamento de pilares, tanto com CPR como com fibras de carbono, é uma ótima metodologia para reforço de pilares.

3.1. Generalidades

Neste Capítulo são apresentados o programa experimental desenvolvido no trabalho, as propriedades e características dos materiais utilizados na experimentação, a descrição da instrumentação e equipamentos utilizados nos ensaios, assim como os procedimentos para executá-los. Uma síntese da metodologia aplicada neste trabalho é apresentada na Figura 3.1.

Figura 3.1: Programa experimental



Fonte: O autor

3.2. Características dos modelos experimentais

Os modelos experimentais desenvolvidos neste trabalho são vigas de concreto armado, de dimensões reduzidas, solicitadas até o ELS e posteriormente reforçadas com encamisamento de CPR e CRF em sua região fletida. As vigas foram produzidas a partir de um traço de concreto convencional para classe de resistência C20 e classe C30, sendo utilizado esse mesmo traço para o reforço de CRF, porém com adição de fibras de aço com as pontas enganchadas. Para a produção do reforço de CPR, foi utilizado o traço desenvolvido por Machado (2019), adicionando-se, também, o tipo de fibras de aço relatada anteriormente. A utilização das fibras se deu em razão desse tipo de reforço utilizado trabalhar essencialmente à tração, pretendendo-se, assim, aumentar a resistência e a ductilidade do compósito a esse tipo de solicitação.

Primeiramente, foram estudadas diferentes dosagens de fibras de aço na mistura do CPR. Produziu-se uma mistura controle sem fibra e, em seguida, foram produzidas misturas com 6%, 10% e 14% de fibras sobre a massa de cimento. A partir disso, foram produzidos corpos de prova prismáticos de dimensões 40x40x160 mm (base x altura x comprimento), que foram ensaiados na flexão a 3 pontos em uma prensa manual. A dosagem que apresentasse a melhor resistência para o ensaio de tração na flexão seria estudada como reforço.

Posteriormente, foram produzidas dez vigas de concreto armado convencional com dimensões de 65x100x1000 mm (base x altura x comprimento), em dois lotes de concretagens de cinco vigas cada, sendo o primeiro para concreto de classe C30 e o segundo de classe C20. Para cada lote, as vigas foram preparadas para quatro tipos de ensaio de tração na flexão a quatro pontos:

- 1) Ensaio 1: Solicitação até o estado limite último, com o objetivo de se obter a carga última das vigas;
- 2) Ensaio 2: Solicitação de 60% da carga última obtida no ensaio 1, simulando o estado limite de serviço da viga, conforme Lima (2017);
- 3) Ensaio 3: Ruptura em vigas reforçadas por encamisamento de CPR e CRF em sua região fletida, após solicitação das vigas ao estado limite de serviço no ensaio 2;
- 4) Ensaio 4: Ensaio em viga íntegra (sem sofrer qualquer tipo de solicitação prévia) reforçada por encamisamento de CPR e CRF em sua região fletida, com o objetivo de se obter um parâmetro comparativo para um possível ganho de resistência obtido no ensaio 3.

3.3. Características dos materiais utilizados na produção dos modelos experimentais

3.3.1. Cimento

Para a produção da viga concreto convencional e do reforço de CRF, foi utilizado um cimento CP II-E-32 da Holcim. Para a produção do CPR, foi utilizado um cimento CP V-ARI da Holcim. Suas propriedades físicas e mecânicas foram determinadas a partir de ensaios de caracterização determinados pelas normas vigentes, conforme é apresentado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Características físicas e mecânicas dos cimentos

Caracterização dos Cimentos			
Característica	CP-II-E-32	CP-V-ARI	Método de Ensaio
Massa específica (g/cm ³)	2,965	3,065	NBR NM 23:2001
Área específica (m ² /kg)	460	544	NBR 16372:2015
Índice de finura (%)	0,6	0,1	NBR 11579:2012
Consistência normal (%)	31	32,8	NBR NM 43:2003
Tempo de pega (hh:mm)	Início	11:55	NBR NM 65:2003
	Fim	12:56	
Expansibilidade (%)	Frio	0,1	NBR 11582:2016
	Quente	0,2	
Resistência a compressão (MPa)	3 dias	12,3	NBR 7215:1996
	7 dias	25,2	
	28 dias	39,2	

Fonte: O autor

3.3.2. Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado para a produção da viga de concreto convencional e do reforço de CRF foi uma areia natural quartzosa proveniente do Rio Piranga, originária de Porto Firme/MG. Para a produção do CPR, foi utilizada uma areia quartzosa industrial fornecida pela Mineração Jundu/SP, proveniente de Analândia/SP. A caracterização dos materiais de acordo com as normas vigentes está apresentada na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Caracterização do agregado miúdo

Caracterização do Agregado Miúdo			
Características	Areia Natural	Areia Industrializada	Método de Ensaio
Massa específica (g/cm ³)	2,594	2,651	NBR NM 52:2009
Massa unitária (g/cm ³)	1,429	1,535	NBR NM 45:2006
Absorção de água (%)	1,21	0,18	NBR NM 30:2001
Dimensão máxima característica (mm)	4,80	1,00	NBR NM 248:2003
Diâmetro médio (D50)	0,60	0,63	NBR NM 248:2003

Fonte: O autor

3.3.3. Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado para a produção da viga de concreto convencional e do reforço de CRF foi uma brita gnáissica com $D_{\text{máx}} = 9,5$ mm, originária de São Geraldo/MG. A caracterização do material de acordo com as normas vigentes está apresentada na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Caracterização do agregado graúdo

Caracterização do Agregado Graúdo		
Característica	Brita	Método de ensaio
Dimensão máxima característica (mm)	9,5	NBR NM 248:2003
Módulo de finura	5,41	NBR NM 248:2003
Massa específica (g/cm ³)	2,996	NBR NM 52:2009
Massa unitária seca e solta (g/cm ³)	1,531	NBR NM 45:2006
Massa unitária compactada (g/cm ³)	1,652	NBR NM 45:2006
Absorção de água (%)	0,51	NBR NM 30:2001
Material pulverulento (%)	1,65	NBR NM 46:2003

Fonte: O autor

3.4.4. Sílica Ativa

Para a produção do concreto de pós reativos, foi utilizada uma sílica ativa comercializada pela Elkem/SP. A caracterização do material de acordo com as normas vigentes está apresentada na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Caracterização da sílica ativa

Sílica Ativa		
Características	Valor	Método de Ensaio
Massa específica (g/cm ³)	2,20	NBR 16605:2017
Área específica (m ² /kg)	9653	NBR 16372:2015

Fonte: O autor

3.4.5. Resíduo de Granito

Para a produção do concreto de pós reativos, foi utilizado um resíduo de granito proveniente da cidade de Cachoeiro de Itapemirim/ES. A caracterização do material de acordo com as normas vigentes está apresentada na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Caracterização do resíduo de granito

Resíduo de Granito		
Características	Valor	Método de Ensaio
Massa específica (g/cm ³)	2,58	NBR 16605:2017
Área específica (m ² /kg)	899	NBR 16372:2015

Fonte: O autor

3.3.6. Aço

Para a produção das vigas, foram utilizadas barras de aço CA-60 da ArcelorMittal. As armaduras longitudinais foram compostas por barras de Ø5,0mm, enquanto os estribos por barras de Ø4,2 mm. Na Tabela 3.6 são apresentadas algumas características mecânicas dos aços utilizados.

Tabela 3.6: Características mecânicas do aço

Diâmetro	Tipo	Limite de Escoamento f_y (MPa)	Limite de Resistência f_u (MPa)	Método de Ensaio
4,2	CA-60	752	771	NBR ISO 6892-1:2013
5,0	CA-60	689	729	

Fonte: O autor

3.3.7. Fibras de Aço

Para a produção Concreto Reforçado com Fibras e do Concreto de Pós Reativos, foram incorporadas fibras de aço do tipo Dramix 3D 45/30BL com pontas enganchadas, comercializada pela ArcelorMittal. As fibras estão em conformidade com a ABNT: NBR 15530:2007 – Fibras de Aço para Concreto. Na Tabela 3.7 são apresentadas as características geométricas da fibra de aço.

Tabela 3.7: Características geométricas da fibra de aço Dramix 3D 45/30 BL

Caracterização das Fibras de Aço de Pontas Enganchadas	
Característica	Valor
Fator de Forma (l/d)	45
Comprimento (mm)	30
Diâmetro (mm)	0,62
Resistência à Tração (kN/cm ²)	127,0

Fonte: O autor

3.4.5. Aditivo Superplastificante

Para a produção do concreto de pós reativos, foi utilizado o superplastificante MC Powerflow 1108 da MC Bauchemie, um superplastificante sintético de 3ª geração à base de polímeros policarboxilatos. Na Tabela 3.8 são apresentadas algumas características do produto.

Tabela 3.8: Características do aditivo superplastificante

Aditivo Superplastificante			
Estado Físico	Cor	Densidade (g/cm ³)	Dosagem
Líquido	Marron	1,08	0,2-5,0% sobre o peso do cimento

Fonte: O autor

3.5. Características dos concretos produzidos

3.5.1. Concreto convencional (CC)

O concreto convencional utilizado nas vigas foi produzido com o objetivo de se atingir uma resistência à compressão aos 28 dias de 20,0 MPa para o Lote 1 e 30,0 MPa para o Lote 2. O traço foi obtido pelo método ABCP/ACI, de acordo com a caracterização de cada material utilizado. Foi utilizada uma quantidade de material suficiente para a produção de 05 (cinco) vigas e 14 (quatorze) corpos de prova controle em apenas uma mistura, cerca de 60 L de concreto. Esse procedimento foi realizado duas vezes, totalizando 10 (dez) vigas produzidas.

3.5.2. Concreto reforçado com fibras (CRF)

O concreto reforçado com fibras utilizado como reforço foi produzido a partir do mesmo traço utilizado para a produção do concreto convencional das vigas, incorporando-se 2% de fibras de aço de pontas enganchadas. Utilizou-se esse volume de fibras devido ao bom ganho de resistência à tração na flexão obtido por Song e Hwang (2004) e ao ganho de ductilidade de Ou *et al.* (2011).

3.5.3. Concreto de pós reativos (CPR)

Para a produção do CPR, utilizou-se o traço em massa obtido por Machado (2019), apresentado na Tabela 3.9. A partir desse traço, foi preparada uma mistura controle com 0% de fibra de aço (CPR-0F) e outras três com, respectivamente, 6% (CPR-6F), 10% (CPR-10F) e 14% (CPR-14F) sobre a massa de cimento utilizada.

Tabela 3.9: Traços utilizados na produção do CPR

Material	CPR-0F		CPR-6F		CPR-10F		CPR-14F	
	Traço em massa	Consumo (kg/m ³)	Traço em massa	Consumo (kg/m ³)	Traço em massa	Consumo (kg/m ³)	Traço em massa	Consumo (kg/m ³)
Cimento CPV ARI	1,000	856,34	1,000	856,34	1,000	856,34	1	856,34
Areia fina	1,101	941,62	1,101	941,62	1,101	941,62	1,101	941,62
Pó de granito	0,235	204,01	0,235	204,01	0,235	204,01	0,235	204,01
Sílica ativa	0,246	212,72	0,246	212,72	0,246	212,72	0,246	212,72
Superplastificante	0,040	34,25	0,040	34,25	0,040	34,25	0,040	34,25
Água	0,220	184,83	0,220	184,83	0,220	184,83	0,220	184,83
Fibras de aço	0	0	0,060	51,38	0,100	85,63	0,140	119,89







Fonte: O autor

3.6. Produção dos modelos experimentais

3.6.1. Vigas e corpos de prova cilíndricos de concreto convencional

3.6.1.1. Equipamentos utilizados

Tabela 3.10: Equipamentos utilizados para a produção do concreto convencional

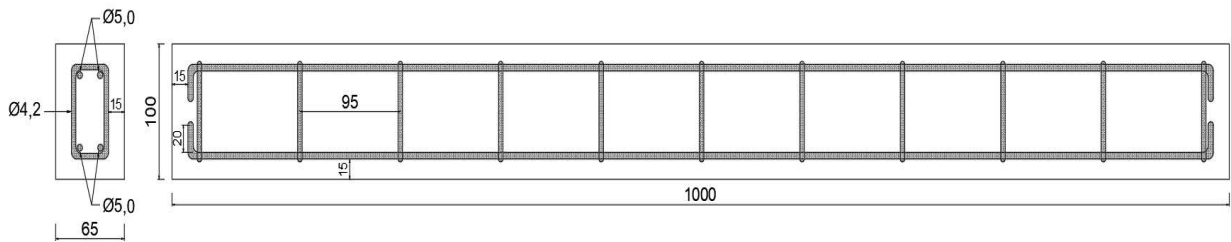
Equipamento	Descrição
	Betoneira com capacidade de 400 litros
	Vibrador de imersão
	Mesa vibratória
	Formas de madeira 65x10x100 mm; espessura 2,0 cm
	Forma tronco cônica h = 30 cm com base metálica para <i>slump test</i>
	Moldes metálicos cilíndricos 10x20 cm

Fonte: O autor

3.6.1.2. Procedimento

Foram produzidos modelos reduzidos de vigas de concreto armado, com dimensões nominais de 65x100x1000 mm. Para as armaduras longitudinais de tração e porta estribos, foram utilizadas barras de aço CA-60 com diâmetro de $\varnothing 5,0$ mm. A armadura transversal foi composta por estribos de aço CA-60 com diâmetro de $\varnothing 4,2$ mm e espaçamento a cada 9,5 cm. Utilizou-se cobertura superior, inferior e laterais de 1,5 cm. Na Figura 3.2 é apresentado o detalhamento do elemento produzido.

Figura 3.2: Detalhamento da viga de concreto armado



Fonte: O autor

A armadura foi cortada, dobrada e amarrada no Laboratório de Materiais de Construção da UFV. Antes de se iniciar a concretagem, untou-se as formas de madeira com óleo para facilitar a desmoldagem. Na Figura 3.3 são apresentados as armaduras montadas e o conjunto de formas de madeira. Os materiais utilizados na concretagem estão demonstrados na Figura 3.4.

Figura 3.3: Conjunto de formas e armaduras montadas



Fonte: O autor

Figura 3.4: Materiais preparados para a produção do concreto convencional



Fonte: O autor

Ao finalizar a mistura, iniciou-se o preenchimento das formas das vigas. Primeiramente, a forma foi preenchida com 1,5 cm de concreto, o suficiente para se atingir o cobrimento inferior e posicionar a armadura. Posteriormente, a armadura foi fixada com um arame nos sarrafos superiores da forma. Para os cobrimentos laterais, utilizou-se tarugos de aço de diâmetro $\varnothing 16,0$ mm (Figura 3.5). Com a armadura imobilizada na forma, preencheu-se o restante com concreto. Para o adensamento, foi utilizada a mesa vibratória por 30 segundos. Durante o adensamento, retirou-se os tarugos laterais, certificando-se da retirada de todas as bolhas de ar.

Figura 3.5: Detalhe dos tarugos posicionados para cobertura lateral



Fonte: O autor

Ao fim do preenchimento, as superfícies superiores das vigas foram regularizadas com o auxílio de uma régua (Figura 3.6), preencheu-se os CP's controle com o restante do concreto da betoneira (Figura 3.7) e realizou-se o adensamento com o vibrador de imersão. A desforma foi realizada 24 horas após a sua confecção. As vigas e os corpos de prova foram armazenados em tanque de cura até a idade dos ensaios. Todo o procedimento foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção da UFV.

Figura 3.6: Formas das vigas preenchidas com concreto



Fonte: O autor

Figura 3.7: Corpos de prova preenchidos com concreto








Fonte: O autor

3.6.2. Corpos de prova de CPR

3.6.2.1. Equipamentos utilizados

Tabela 3.11: Equipamentos utilizados para a produção do CPR

Equipamento	Descrição
	Cuba com capacidade de 20 litros
	Misturador vertical
	Mesa de <i>flowtable</i>
	Sacos plásticos
	Moldes de madeira prismáticos 40x40x160 mm

Fonte: O autor

3.6.2.2. Procedimento

Para a produção do CPR, utilizou-se um misturador de eixo vertical com capacidade de 20 litros (Figura 3.8). Antes de serem introduzidos no misturador, todos os materiais secos, incluindo as fibras de aço, foram homogeneizados em um saco plástico. Untou-se a cuba de 20 L com um pano úmido, para evitar a perda de material e facilitar a mistura. A água utilizada na mistura foi previamente resfriada a aproximadamente 10 °C e misturada com o aditivo superplastificante. Após essa preparação, todos os materiais foram inseridos na cuba e o misturador foi ligado até a homogeneização completa da mistura. Esse procedimento se repetiu para as quatro concretagens. O tempo de homogeneização variou para cada mistura, devido a quantidade de fibras de aço presente, que ao aumentar a dosagem, obstruíam a rotação do eixo do misturador. Foi necessário realizar movimentos de subida e descida do eixo para auxiliar na homogeneização.

Figura 3.8: Misturador vertical com capacidade de 20 L utilizado na produção do CPR



Fonte: O autor

Ao fim dos procedimentos, foi aferida a fluidez do CPR na mesa de *flowtable*. Logo após, foram moldados dezesseis corpos de prova prismáticos de dimensões 40x40x160mm para cada mistura (Figura 3.9), para serem ensaiados nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias. Por fim, o adensamento do material foi realizado com 30 batidas em 30 segundos da mesa de *flowtable*.

Figura 3.9: Corpos de prova prismáticos moldados











Fonte: O autor

Realizou-se a desforma dos CP's 24 h após sua confecção. Esses foram armazenados em tanque de cura, onde permaneceram até a idade dos ensaios. Todo o procedimento foi executado no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Federal de Viçosa.

3.6.3. Reforço de CPR em viga de CC por encamisamento da região fletida

3.6.3.1. Equipamentos utilizados

Tabela 3.12: Equipamentos utilizados na produção do reforço de CPR

Equipamento	Descrição
	Cuba com capacidade de 20 litros
	Misturador vertical
	Pedra de carborundum
	Sacos plásticos
	Mesa vibratória
	Formas de madeira 105x120x500 mm; espessura 2,0 cm, com abertura central de 65 mm, para encamisamento da viga
	Moldes metálicos cilíndricos 5x10 cm, conforme ABNT NBR 7215:2019
	Moldes de madeira prismáticos 40x40x160 mm

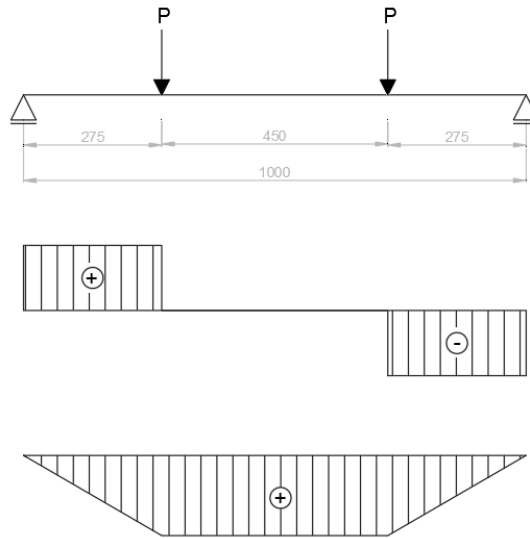
Fonte: O autor

3.6.3.2. Procedimento

A viga foi projetada para um ensaio de flexão a quatro pontos, com cargas aplicadas a 22,5 cm do seu eixo central, ou seja, 45,0 cm espaçadas entre si, conforme indicado na Figura 3.10.

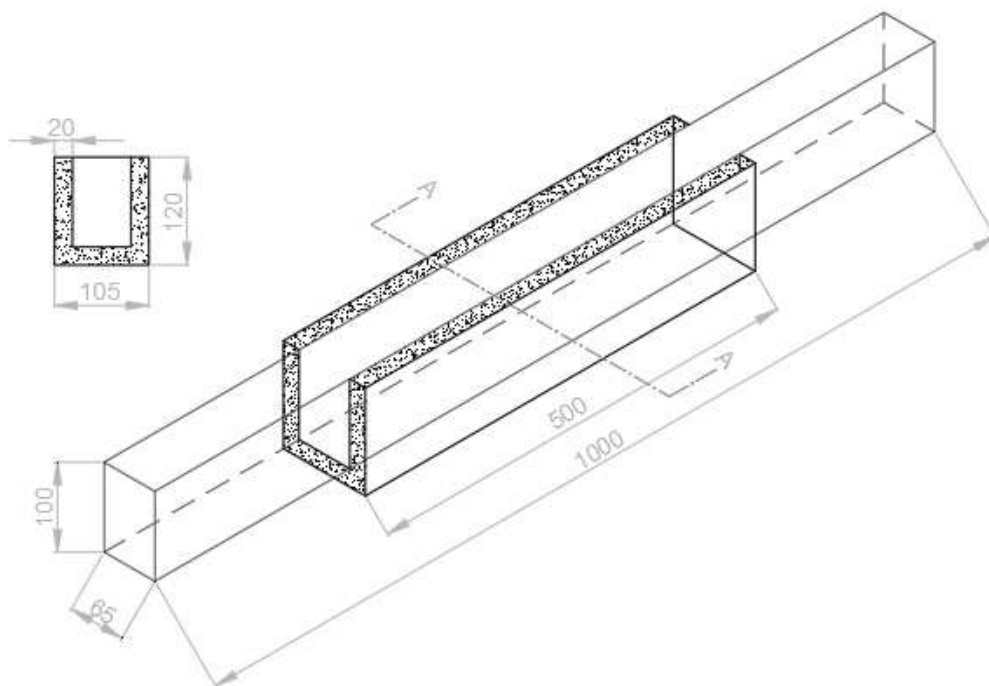
Dessa maneira, foi definido um reforço estrutural apenas em sua região fletida, indicada pelo Diagrama de Momentos Fletores (DMF) apresentado também na Figura 3.10. Foi determinado uma espessura de reforço de 2,0 cm, nas duas faces laterais e no fundo da viga conforme realizado por Karthik e Sundaravadivelu (2017). O desenho esquemático da viga reforçada está apresentado na Figura 3.11.

Figura 3.10: Esquema de aplicação da carga na viga, incluindo DEC e DMF



Fonte: O autor

Figura 3.11: Desenho esquemático da viga reforçada



Fonte: O autor

Antes de se produzir o material de reforço, foi necessário preparar a superfície da viga a ser reforçada. Dessa forma, foi utilizada a pedra de carborundum para remover a nata de exsudação das superfícies laterais e do fundo da viga (Figura 3.12). Para finalizar a limpeza e retirar o pó da nata que ficou impregnado nessas superfícies, foi usado um pano molhado. Optou-se por esse tipo de preparação mais simples com o objetivo de se avaliar a aderência entre os dois materiais, sem qualquer método para aprimorar a adesão ou o atrito entre eles, conforme constatado nos experimentos de Lemes (2019) e Al-Osta *et al.* (2017).

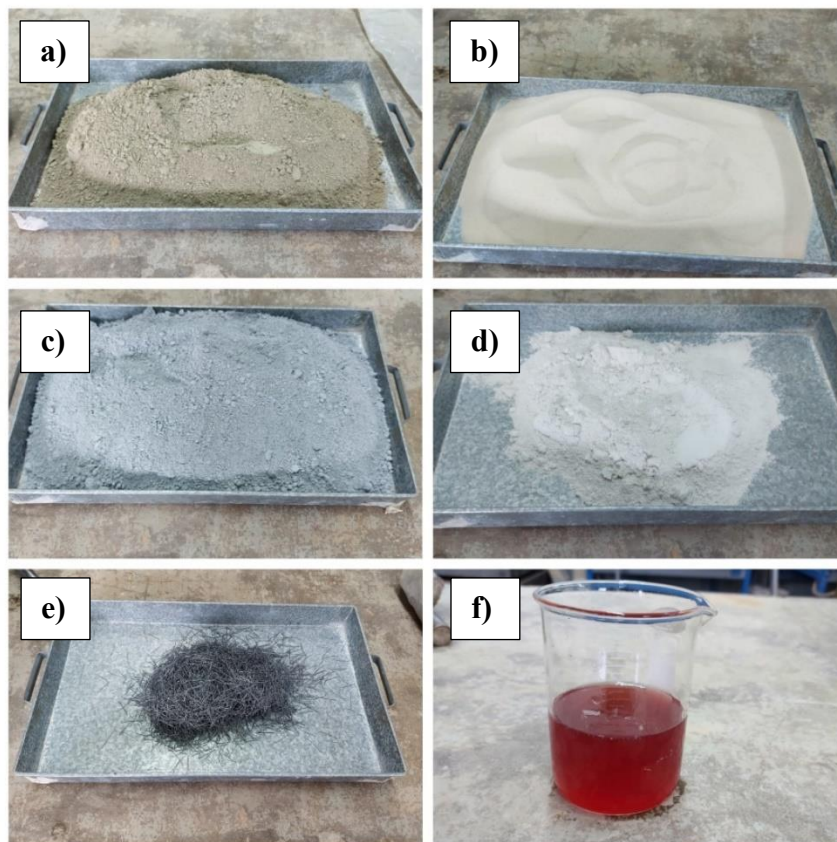
Figura 3.12: Limpeza da superfície da viga a ser reforçada com a pedra de carborundum



Fonte: O autor

Com a viga preparada para ser reforçada, foi iniciada a elaboração do material de reforço. A produção do CPR desde a pesagem dos materiais até a cura da viga e dos corpos de prova foi idêntica ao prescrito no item 3.6.2.2, com adensamento do reforço da viga sendo realizado na mesa vibratória por um minuto. Foi utilizado o mesmo traço do CPR apresentado na Tabela 3.9, com a inclusão de 14% de fibras (conforme item 4.2.5) de aço de pontas enganchadas (Figura 3.13). Além do reforço da viga, foram moldados corpos de prova para ensaios controle de flexão a três pontos na prensa manual e de módulo de elasticidade. Todo o procedimento foi executado no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Federal de Viçosa.

Figura 3.13: Materiais utilizados na produção do CPR (a) cimento, b) areia industrializada, c) sílica ativa, d) resíduo de granito, e) fibras de aço e f) aditivo superplastificante)



Fonte: O autor

3.6.4. Reforço de CRF em viga de CC por encamisamento da região fletida

3.6.4.1. Equipamentos utilizados

Tabela 3.13: Equipamentos utilizados na produção do reforço de CRF

Equipamento	Descrição
	Betoneira com capacidade de 150 litros
	Pedra de carborundum
	Vibrador de imersão
	Mesa vibratória
	Formas de madeira 105x120x500 mm; espessura 2,0 cm, com abertura central de 65 mm, para encamisamento da viga
	Forma tronco cônica com base metálica para <i>slump test</i>
	Moldes metálicos cilíndricos 10x20 cm

Fonte: O autor

3.6.4.2. Procedimento

O projeto do reforço e a preparação da viga a ser reforçada foram idênticos ao prescrito no item 3.6.3.2. Esse modelo experimental se diferenciou apenas pela utilização do CRF como material de reforço. Para a sua produção, utilizou-se o mesmo traço do concreto convencional

da viga, acrescentando-se 2% de fibras de aço de pontas enganchadas, conforme realizado por Song e Hwang (2004) e Ou *et al.* (2011).

Os materiais (Figura 3.14) foram previamente pesados e misturados na betoneira, medindo-se o *slump* do CRF ao final da mistura. Além do reforço da viga, foram moldados corpos de prova para ensaios controle de compressão direta, compressão diametral e módulo de elasticidade. Os corpos de prova foram adensados com o vibrador de imersão, enquanto a viga foi adensada na mesa vibratória. Todos foram armazenados em tanque de cura, onde permaneceram até a idade dos ensaios. Todo o procedimento foi executado no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Federal de Viçosa.

Figura 3.14: Materiais utilizados no preparo do CRF (a) cimento, b) areia natural, c) brita 0 e d) fibras de aço)






Fonte: O autor

3.7. Ensaaios dos modelos experimentais

3.7.1. Estudo da dosagem de fibras de aço em corpos de prova de CPR

3.7.1.1. Equipamentos utilizados

Tabela 3.14: Equipamentos utilizados para os ensaios de flexão a três pontos e compressão no CPR

Equipamento	Descrição
	Máquina universal de ensaios, da EMIC, com capacidade de aplicação de 100 tf
	Prensa manual dotada de anel dinâmico com capacidade de 4000 kgf
	Extensômetro digital para leitura da deformação do anel dinâmico

Fonte: O autor

3.7.2.2. Procedimento

Foram executados ensaios de flexão a 3 pontos nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias. Após retirar os corpos de prova do tanque de cura nessas respectivas idades, suas medidas de base e altura foram aferidas com um paquímetro e assim registradas. Foram realizadas marcações nos CP's para garantir o distanciamento de 10 cm entre os apoios e a aplicação central da carga durante o ensaio. Para o rompimento dos CP's a flexão, foi utilizada uma prensa manual dotada de um anel dinâmico de capacidade 4.000 kgf (Figura 3.15). Para cada idade, foram rompidos quatro corpos de prova. Após o ensaio de flexão, os CPs foram levados à compressão direta na Máquina Universal de Ensaios EMIC100 de capacidade 100 tf (Figura 3.16). Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção da UFV.

Figura 3.15: Ensaio de flexão a 3 pontos em CP prismático



Fonte: O autor

Figura 3.16: Ensaio de compressão em CP prismático










Fonte: O autor

3.7.2. Estudo do reforço de encamisamento da região fletida nas vigas

3.7.2.1. Equipamentos utilizados

Tabela 3.15: Equipamentos utilizados para o ensaio de flexão a quatro pontos na viga

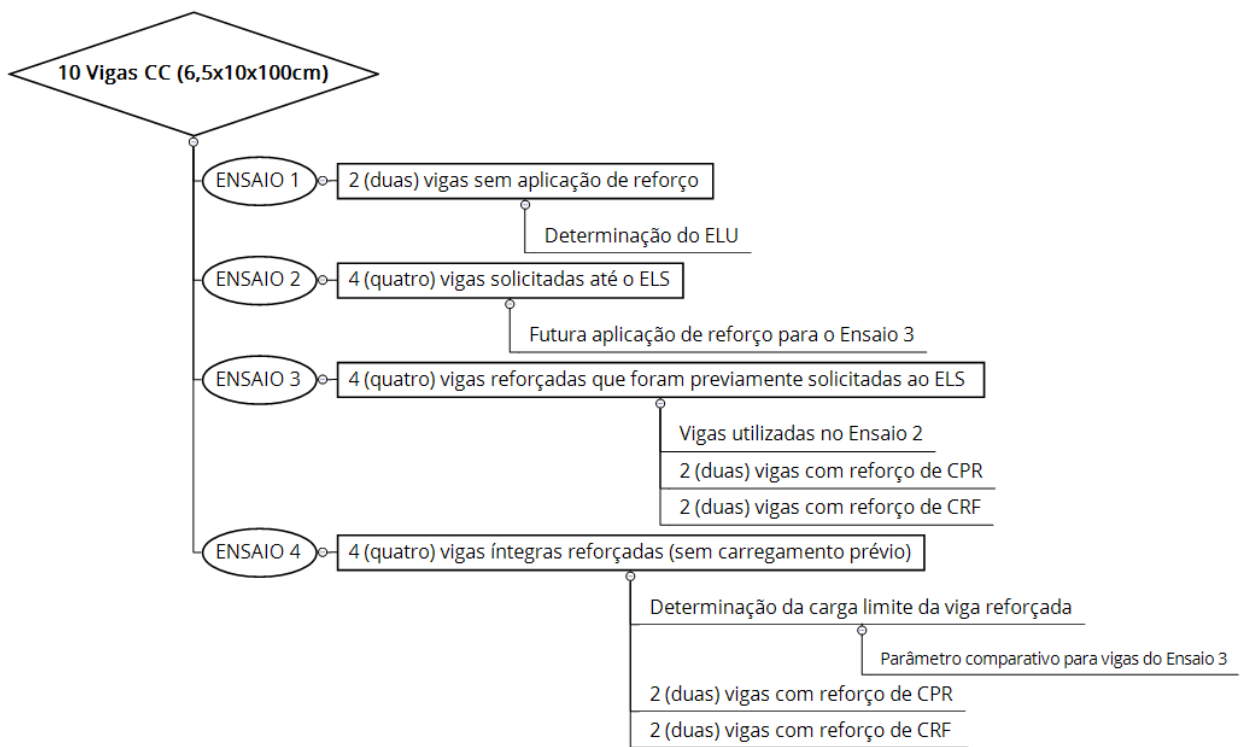
Equipamento	Descrição
	Máquina universal de ensaios, da EMIC, modelo DL60000, com capacidade de aplicação de 60 tf
	Perfil I metálico como base de apoio para o carregamento
	Dispositivo da EMIC DP6.05 para ensaios de flexão a quatro pontos
	Transdutor de deslocamento modelo WA/20 mm
	SAD, da HBM, modelo Quantum MX840A, configurados a uma taxa de amostragem de 5,0 Hz
	Célula de carga da HBM, modelo C6A/200 kN
	Neoprene, utilizado para acomodação dos apoios na aplicação da carga
	Cantoneira metálica dimensões 5x5 cm utilizada para auxiliar medição dos DT's
	Base magnética
	Computador para utilização do <i>software</i> Tesc, daVirmaq
	Notebook Asus para utilização do <i>software</i> Catmaneasy AP
	Lupa com marcação em décimos de milímetros para visualização da espessura das fissuras

Fonte: O autor

3.7.2.2. Procedimento

Os ensaios de flexão a quatro pontos nas vigas foram realizados em quatro etapas, conforme fluxograma da Figura 3.17. Primeiro, uma viga foi carregada até o estado limite último para se obter experimentalmente a sua carga última. Em seguida, de acordo com esse valor último obtido, outra viga foi solicitada em 60% dessa carga, simulando o seu estado limite de serviço (LIMA, 2017). A partir disso, essa mesma viga solicitada ao ELS foi reforçada com CPR ou CRF em sua região fletida, realizando então, um ensaio de ruptura na viga com reforço, buscando-se obter uma recuperação parcial ou total de sua resistência inicial. Paralelamente, foi realizado um ensaio de ruptura de uma viga íntegra reforçada com CPR/CRF, isto é, a viga não sofreu qualquer tipo de solicitação prévia de carga, com o objetivo de se obter um parâmetro para o ganho de resistência do reforço na viga solicitada ao ELS.

Figura 3.17: Fluxograma ensaio de flexão a quatro pontos das vigas



Fonte: O autor

Os ensaios foram realizados na máquina universal DL60000 do Laboratório de Ensaios Mecânicos, que fica no complexo de laboratórios de engenharia da UFV (LABENGE), incluindo montagem e instrumentação das vigas (Figura 3.18). Como base de apoio, foi utilizado um perfil I metálico com tarugos de aço soldados ao perfil, espaçados entre si em 90 cm, para uma condição de carregamento biapoiada. Para a flexão em quatro pontos, foi utilizado

o dispositivo DP6.05 da EMIC, de 45,0 cm de comprimento, posicionado no vão central da viga, gerando uma aplicação de carga distanciada de 22,5 cm do centro da viga (Figura 3.10). Foi utilizada uma fita de Neoprene nos dois pontos de aplicação da carga e nos dois apoios, com o intuito de se corrigir pequenas acomodações da superfície no início do carregamento.

Figura 3.18: Montagem do ensaio na EMIC DL60000

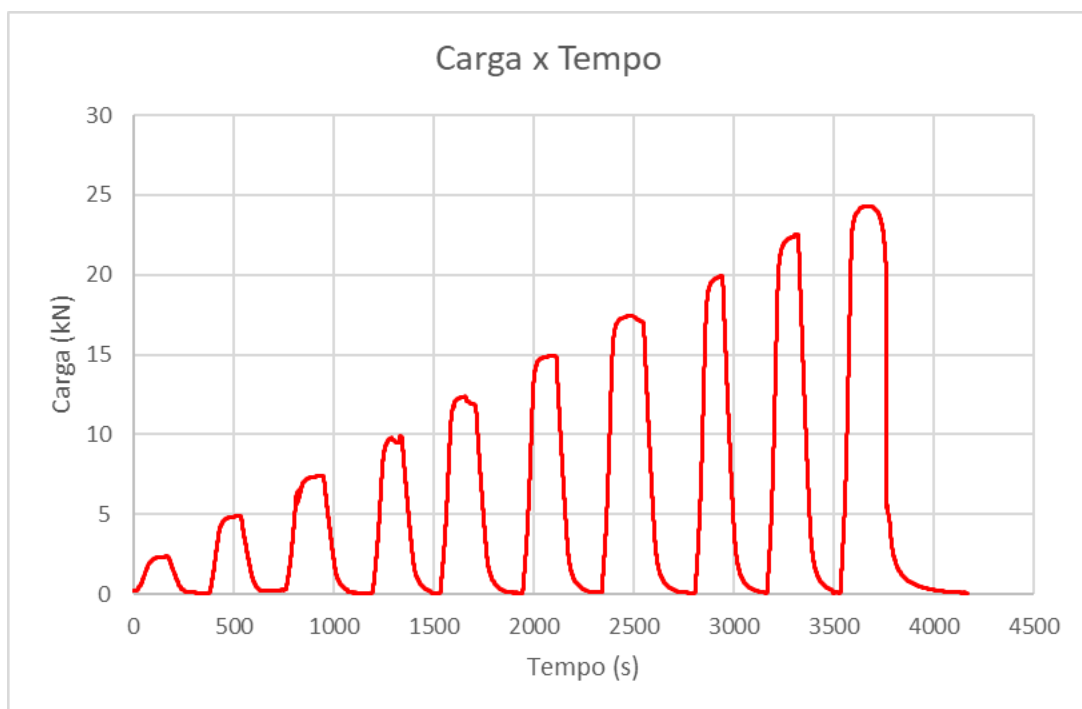


Fonte: O autor

Para determinação da evolução da flecha da viga durante o procedimento, foram utilizados dois transdutores de deslocamento (DT) com curso total de 20 mm, posicionados no centro do vão, em cada um dos lados da viga. Cantoneiras metálicas de dimensões 5x5 cm foram coladas com cianoacrilato nas laterais para auxiliar a leitura dos transdutores. Os DT's foram fixados no perfil I metálico por meio de uma base magnética. Para leitura da carga aplicada, utilizou-se uma célula de carga de 200 kN, da HBM, modelo C6A.

Com a montagem e instrumentação da viga finalizados, foi iniciada a preparação para leitura dos dados do ensaio. A célula de carga e os transdutores de deslocamento foram conectados a um sistema de aquisição de dados (SAD) da HBM, modelo Quantum MX840A, ligado a um notebook portando o *software* Catmaneasy AP. Foi configurada uma taxa de amostragem de dados para leitura de carga e flecha do SAD de 5,0 Hz. Para operar a EMIC DL60000, utilizou-se o *software* Tesc, da Virmaq. Durante o ensaio, foram efetuados ciclos de carga e descarga determinando uma taxa para a duração do carregamento e descarregamento de cada ciclo ter 1 (um) minuto. A cada ciclo, foi acrescido 10% da carga última obtida a partir do ensaio ao estado limite último. Na Figura 3.19 são mostrados os ciclos de carga e descarga progressivo realizado nas vigas, com acréscimo de 10% da carga última a cada ciclo.

Figura 3.19: Ciclos de carga e descarga progressivos



Fonte: O autor

4.1. Considerações preliminares

Neste Capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos no presente trabalho. Inicialmente, são evidenciados os resultados do estudo da influência da dosagem de fibras de aço na resistência à tração na flexão do CPR. Para isso, foram realizados ensaios de flexão a três pontos em corpos de prova prismáticos de CPR, variando a dosagem de fibras de aço de pontas enganchadas em 0, 6, 10 e 14%.

Na sequência são apresentados e discutidos os resultados do estudo da utilização do CPR como reforço de vigas de concreto armado convencional. Foi projetado um reforço por encamisamento da viga apenas em sua região fletida, utilizando a melhor dosagem de fibras obtida no primeiro estudo. Além disso, também foram realizados ensaios utilizando concreto convencional reforçado com fibras com o mesmo tipo de reforço, com o intuito de se obter um parâmetro comparativo para o comportamento do CPR.

4.2. Estudo da influência da dosagem de fibras de aço na resistência à tração na flexão do CPR

Por meio desse estudo buscou-se avaliar a influência do aumento da dosagem de fibras de aço nas características mecânicas do Concreto de Pós Reativos, mantendo-se o mesmo traço para todas as misturas. A seguir são apresentados os gráficos da evolução da resistência à tração na flexão e compressão direta nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias de cura. Na Tabela 4.1 são apresentadas as descrições das nomenclaturas utilizadas para a identificação de cada mistura. As tabelas com os resultados completos são apresentadas no Apêndice A.

Tabela 4.1: Nomenclaturas para identificação das misturas

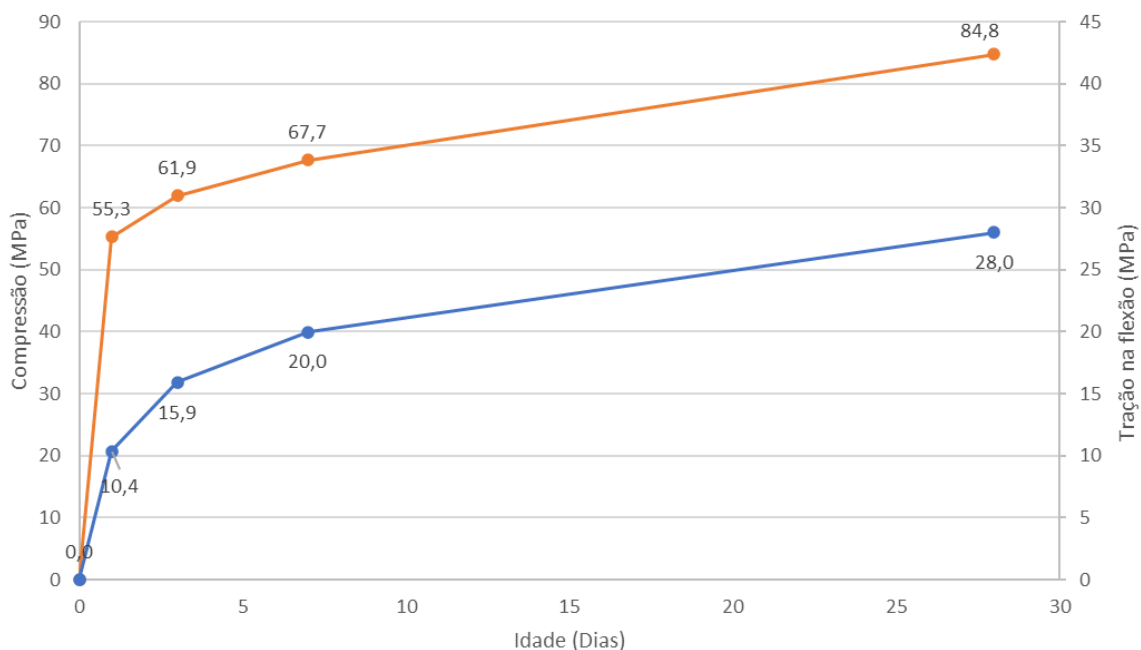
Mistura	Descrição
CPR-0F	Sem adição de fibras de aço
CPR-6F	Adição de 6% de fibras de aço sobre a massa de cimento
CPR-10F	Adição de 10% de fibras de aço sobre a massa de cimento
CPR-14F	Adição de 14% de fibras de aço sobre a massa de cimento

Fonte: O autor

4.2.1. CPR sem adição de fibras de aço (CPR-0F)

São apresentados na Figura 4.1 os resultados dos ensaios nos corpos de prova prismáticos do CPR-0F, sem adição de fibras no compósito. O eixo vertical direito é referente à tração na flexão, com resistência de 28,0 MPa aos 28 dias, enquanto o eixo vertical esquerdo se refere à compressão direta, com resistência de 84,8 MPa aos 28 dias.

Figura 4.1: Evolução da resistência do CPR-0F

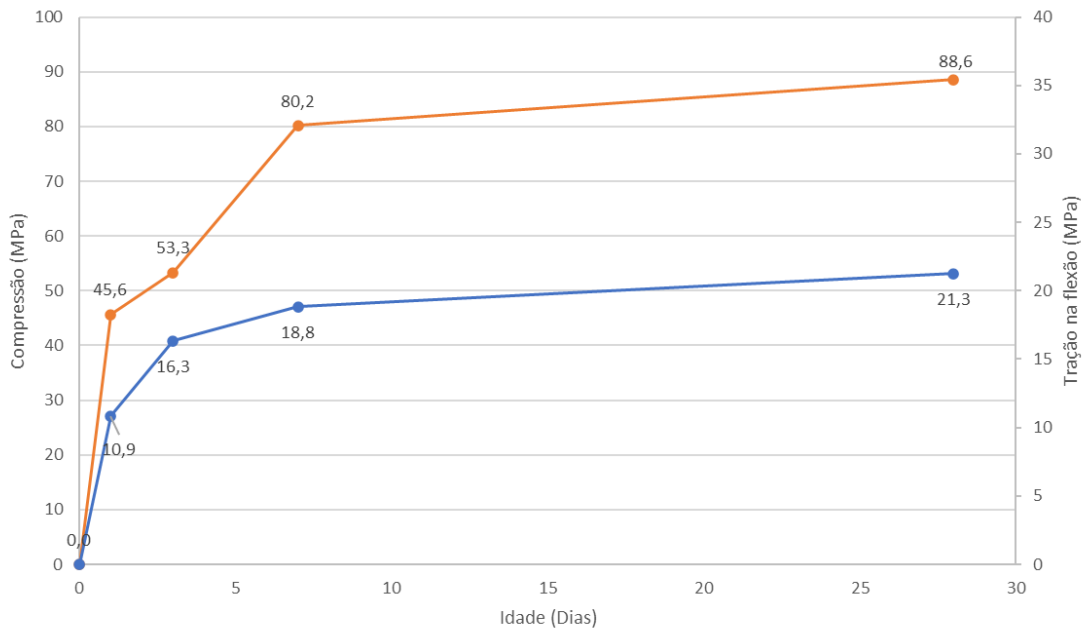


Fonte: O autor

4.2.2. CPR com 6% de fibras de aço (CPR-6F)

Pode-se observar na Figura 4.2 a evolução da resistência à tração na flexão e à compressão dos CP's prismáticos do CPR-6F, com adição de 6% de fibras de aço. O eixo vertical esquerdo é referente à tração na flexão, com resistência aos 28 dias de 21,3 MPa, e o eixo esquerdo se trata da resistência à compressão, atingindo 88,6 MPa aos 28 dias,

Figura 4.2: Evolução da resistência do CPR-6F

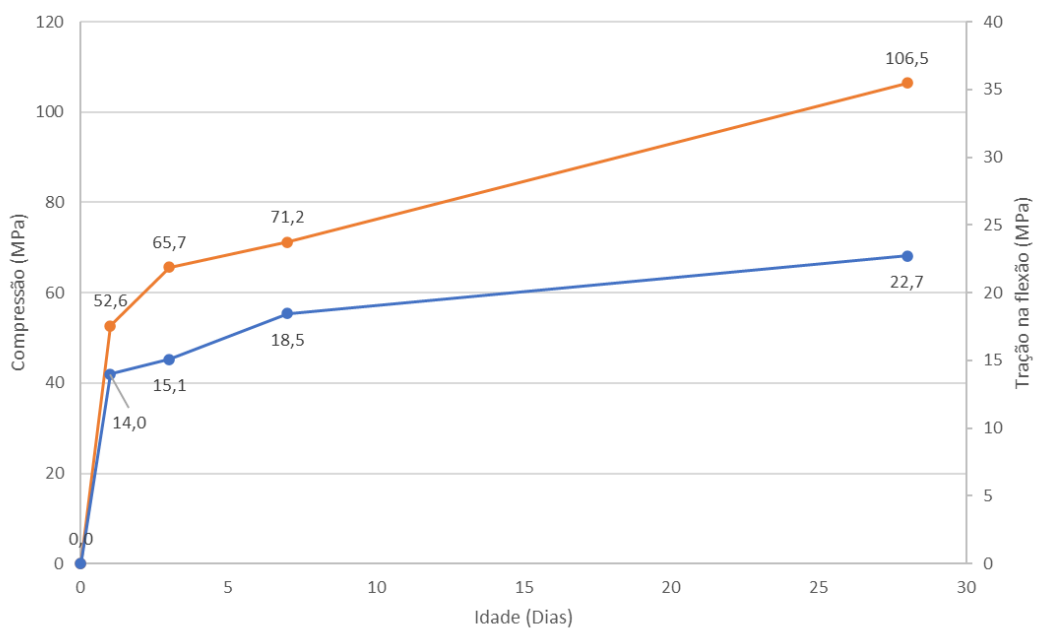


Fonte: O autor

4.2.3. CPR com 10% de fibras de aço (CPR-10F)

Na Figura 4.3 a seguir estão exibidos os resultados da evolução da resistência do CPR-10F, com adição de 10% de fibras de aço. O modelo apresentou resistência aos 28 dias à tração na flexão de 22,7 MPa e à compressão de 106,5 MPa.

Figura 4.3: Evolução da resistência do CPR-10F

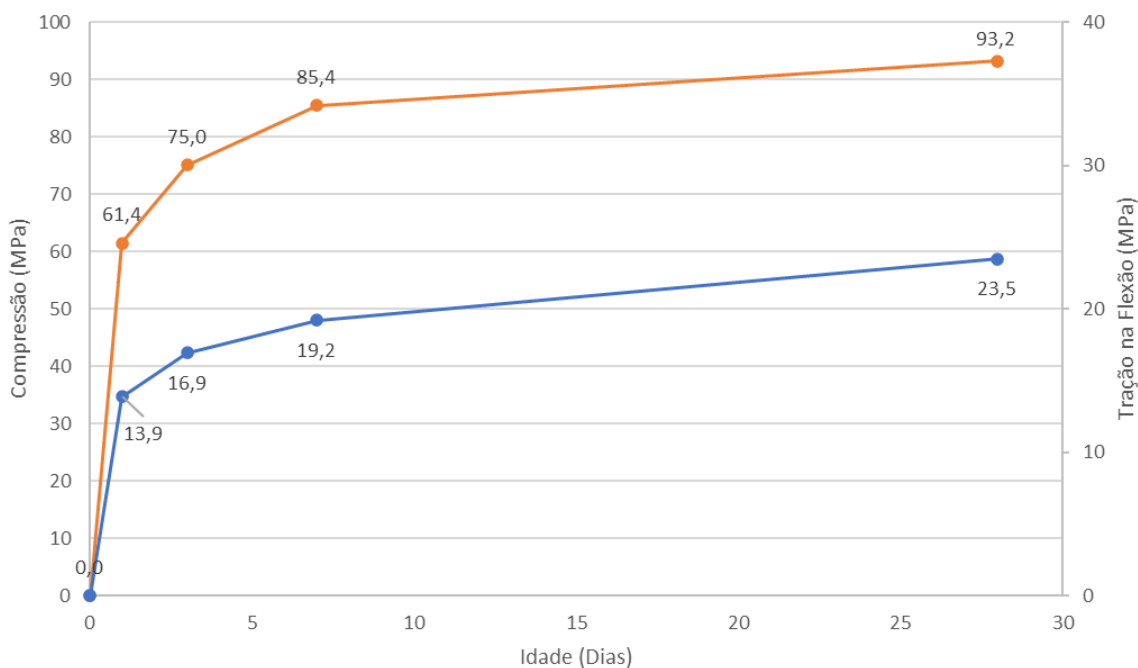


Fonte: O autor

4.2.4. CPR com 14% de fibras de aço (CPR-14F)

Os resultados do CPR-14F, com adição de 14% de fibras de aço, são evidenciados na Figura 4.4. O modelo obteve resistência à compressão de 93,2 MPa e à tração na flexão de 23,5 MPa, ambos aos 28 dias.

Figura 4.4: Evolução da resistência do CPR-14F

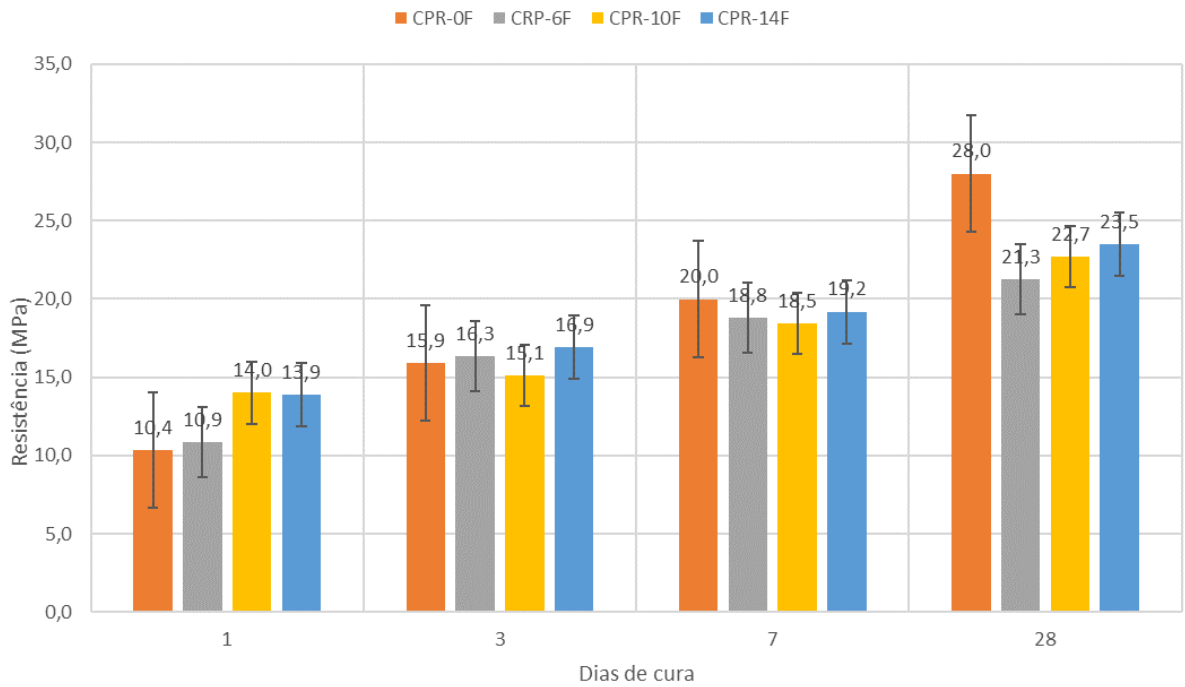


Fonte: O autor

4.2.5. Comparativo entre as dosagens

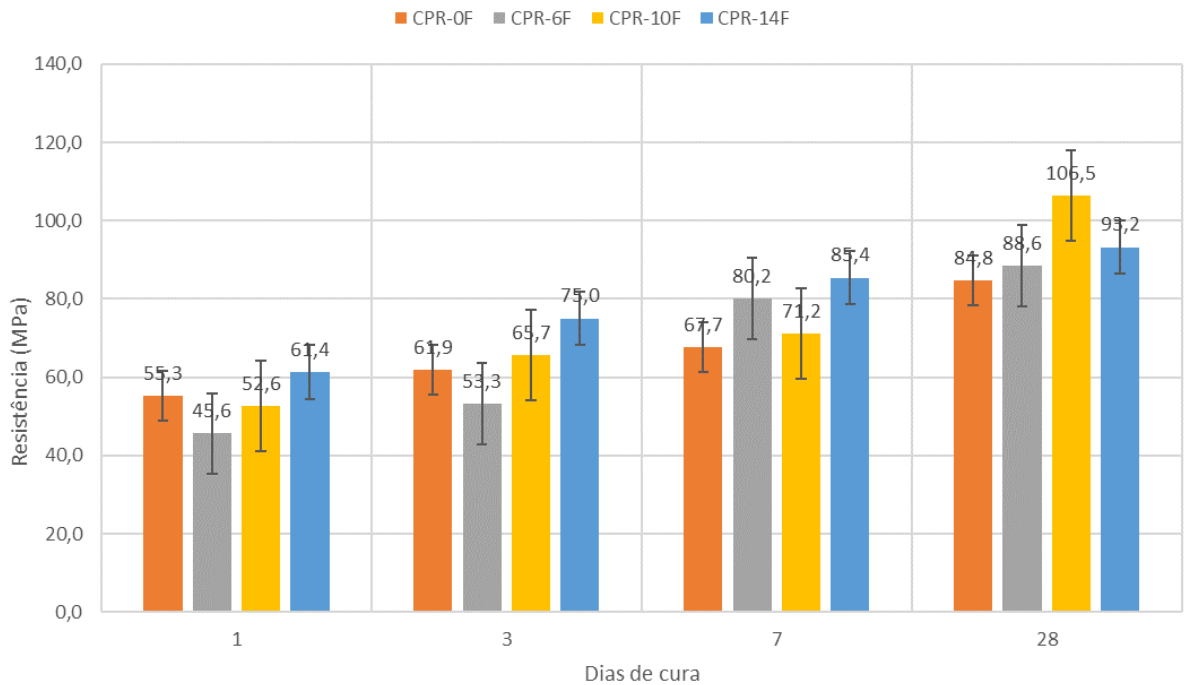
Os resultados obtidos de resistência à tração na flexão e à compressão de todos os ensaios estão representados, respectivamente, na Figura 4.5 e na Figura 4.6, com indicação do erro padrão para cada dado. Com o objetivo de se avaliar a influência da dosagem das fibras de aço na resistência do traço, foi realizada uma análise de variância (ANOVA) com os resultados tanto para resistência à tração na flexão, quanto para resistência à compressão, ao nível de 5% de significância. Para os dois casos, foi obtido $F_{\text{calculado}} > F_{\text{crítico}}$ e $P_{\text{valor}} > 0,05$, ou seja, os resultados não possuem diferença significativa ao nível de significância de 5%. As tabelas da ANOVA estão apresentadas no Apêndice A.

Figura 4.5: Comparativo de resistência à tração na flexão do CPR variando a dosagem de fibras de aço



Fonte: O autor

Figura 4.6: Comparativo de resistência à compressão do CPR variando a dosagem de fibras de aço

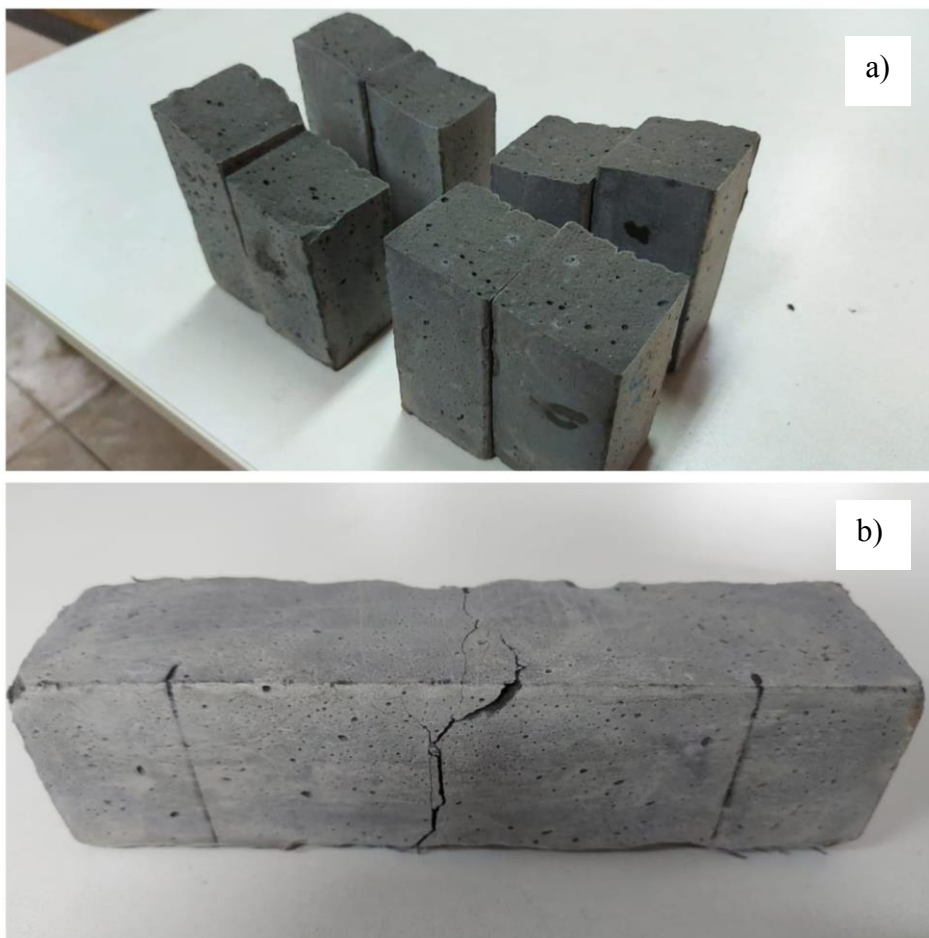


Fonte: O autor

Como os valores não possuem diferença significativa, pode-se concluir que o aumento da dosagem das fibras de aço de pontas enganchadas utilizadas não influenciou na resistência do CPR. Além disso, os valores obtidos de resistência podem ser considerados iguais ao nível de 5% de significância.

Em vista desse resultado, qualquer dosagem poderia ser utilizada no traço a ser aplicado como reforço nas vigas. Contudo, em virtude deste trabalho ter o objetivo de se verificar a viabilidade de se aplicar o CPR como reforço de um elemento estrutural, foi definido o uso do traço com incorporação das fibras devido ao seu modo de ruptura dúctil, contrário ao CPR sem fibras. Assim, optou-se pela utilização da dosagem de 14% com o intuito de se observar a trabalhabilidade e aplicação do CPR na forma do reforço com uma quantidade maior de fibras. Pode-se observar na Figura 4.7 que o CPR sem a inclusão de fibras de aço (Figura 4.7.a) apresentou uma ruptura brusca e destrutiva, enquanto que no CPR com a incorporação de fibras (Figura 4.7.b) o CP se manteve íntegro, apresentando apenas fissuras na região do colapso.

Figura 4.7: Modos de ruptura do corpo de prova de CPR a) sem fibras de aço b) com fibras de aço



Fonte: O autor

4.2.6. Discussão dos resultados

Conforme abordado no item 4.2.5., do ponto de vista estatístico, os resultados apresentados na Figura 4.5 e na Figura 4.6 não possuem diferença significativa ao nível de 5%, logo podem ser considerados iguais. Entretanto, os artigos em geral não argumentam sobre a realização de uma análise de variância com os dados obtidos, e fazem avaliações de acordo com os dados brutos alcançados.

Diante disso, é possível realizar considerações com base nos resultados e observações dos ensaios de flexão a 3 pontos dos corpos de prova prismáticos. Dentre eles, a alta resistência à flexão do traço de CPR sem fibras de aço foi algo, de certa forma, inesperado. É conhecido o fato de que o CPR possui uma resistência à tração superior que o concreto convencional, porém, esperava-se que a inclusão de fibras de aço na mistura, principalmente fibras mais longas, aprimorasse ainda mais essa característica mecânica (AL-TIKRITE; HADI, 2017).

Em relação aos resultados da resistência à flexão alcançada pelos corpos de prova prismáticos (Figura 4.5), Yazici *et al.* (2009) registraram 28,6 MPa com a cura submersa, Al-Tikrite e Hadi (2017) alcançaram resistências entre 10,6 MPa e 24,9 MPa, enquanto Salim *et al.* (2019) obtiveram valores de 11,1 MPa a 16,5 MPa, e Raza *et al.* (2021), de 14 MPa a 20 MPa. Sendo assim, os resultados atingidos aos 28 dias, entre 21,3 MPa e 28,0 MPa apresentaram valores condizentes com outras pesquisas sobre o assunto.

No que diz respeito ao modo de ruptura dos corpos de prova, Al-Tikrite e Hadi (2017) e Raza *et al.* (2021) relataram comportamentos idênticos, com os CP's sem a inclusão de fibras de aço apresentando uma ruptura brusca e destrutiva, enquanto os CP's com fibras se mantinham conectados devido às ações de ponte das fibras, conforme demonstrado na Figura 4.7. De acordo com o explicado por Brandt (2008) e Al-Tikrite e Hadi (2017), as fibras de aço auxiliaram, principalmente, no comportamento pós-pico do concreto, aumentando a ductilidade do corpo de prova, evitando a falha brusca.

Segundo Raza *et al.* (2021), a utilização das fibras de aço contribui mais para o aumento da resistência à compressão do que à tração do CPR, principalmente as microfibras. De acordo com os autores, presença das fibras reduzem as deformações laterais, restringindo a expansão do corpo de prova e aumentando a capacidade de absorção de energia. Ainda segundo eles, a maior contribuição da inclusão das fibras na tração é a prevenção da ruptura frágil.

Isso posto, conclui-se que a escolha da incorporação das fibras de aço no estudo da utilização do CPR como reforço da região tracionada de vigas é válida, uma vez que poderá contribuir para o aumento da ductilidade do material de reforço.

4.3. Estudo do reforço de CPR por encamisamento da região fletida

Por meio desse estudo buscou-se avaliar a utilização do Concreto de Pós Reativos como reforço de vigas de concreto armado convencional. Foi projetado um reforço por encamisamento da viga apenas em sua região fletida, realizando apenas uma limpeza da nata de exsudação na superfície a ser reforçada, com o intuito de se analisar a aderência entre os materiais. Além do CPR, também foram realizados experimentos utilizando Concreto Reforçado com Fibras de aço como mesmo tipo de reforço. Utilizou-se também o CRF com objetivo de se comparar o comportamento dos dois materiais. Na Figura 4.8 é apresentado o modelo de reforço utilizado nas vigas, uma com CPR, em destaque na figura, e outra com CRF ao fundo.

Figura 4.8: Vigas reforçadas com CPR e CRF em sua região fletida



Fonte: O autor

A seguir são apresentados, inicialmente, os resultados individuais dos ensaios de cada viga, descrevendo o comportamento observado durante os ciclos de carga e descarga. As identificações de cada viga quanto ao lote de concretagem e tipo de ensaio realizado estão evidenciadas na Tabela 4.2 e na Tabela 4.3, respectivamente. Em seguida são realizadas

análises comparativas entre os elementos antes e depois da utilização do reforço, assim como a comparação entre as vigas previamente solicitadas ao ELS e as vigas íntegras, como também uma análise entre o reforço de CPR e o reforço de CRF. Ao final é feita uma discussão acerca do comportamento observado para o conjunto de modelos. As tabelas com os resultados completos dos corpos de prova controle das concretagens dos reforços estão apresentadas no Apêndice A.

Tabela 4.2: Identificação quanto ao lote de concretagem das vigas ensaiadas na flexão a quatro pontos

Identificação		Descrição
1º Lote de vigas	V1	Viga íntegra reforçada com CRF
	V2	Viga íntegra reforçada com CPR
	V3	Viga solicitada ao ELS e posteriormente reforçada com CRF
	V4	Viga solicitada ao ELS e posteriormente reforçada com CPR
	V5	Viga sem reforço solicitada ao ELU
2º Lote de vigas	V6	Viga íntegra reforçada com CPR
	V7	Viga íntegra reforçada com CRF
	V8	Viga solicitada ao ELS e posteriormente reforçada com CPR
	V9	Viga solicitada ao ELS e posteriormente reforçada com CRF
	V10	Viga sem reforço solicitada ao ELU

Fonte: O autor

Tabela 4.3: Identificação das vigas quanto ao tipo de ensaio de flexão a quatro pontos

Identificação		Descrição	
Ensaio 1	V5	Vigas sem aplicação de reforço para determinação do ELU	
	V10		
Ensaio 2	V3	Vigas solicitadas até o ELS para futura aplicação de reforço	
	V4		
	V8		
	V9		
Ensaio 3	V3	Aplicação de reforço por encamisamento da região fletida em vigas previamente solicitadas ao ELS no ensaio 2	
	V9		CRF
	V4		CPR
	V8		
Ensaio 4	V1	Aplicação de reforço por encamisamento da região fletida em vigas íntegras, ou seja, sem carregamento prévio	
	V7		CRF
	V2		CPR
	V6		

Fonte: O autor

4.3.1. Ensaios de flexão a quatro pontos dos modelos experimentais

A seguir são descritos, os resultados observados durante os ensaios de flexão a quatro pontos realizados na Máquina Universal de Ensaios – EMIC DL60000. As vigas identificadas na Tabela 4.2 foram selecionadas aleatoriamente para a execução de cada ensaio. Primeiramente,

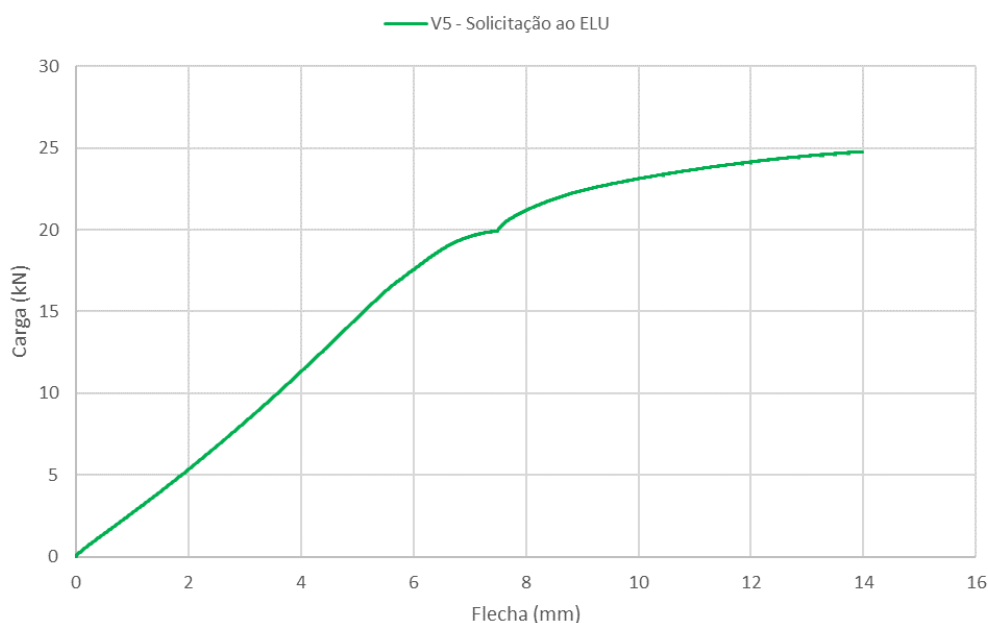
foram realizados os ensaios de solicitação ao Estado Limite Último da viga, conforme Tabela 4.3. Em seguida, foram realizados ensaios até o Estado Limite de Serviço, solicitando 60% da carga última encontrada anteriormente (LIMA, 2017). As vigas solicitadas ao ELS foram reforçadas com CPR e CRF, e então levadas a ruptura. Por fim, foram realizados ensaios em vigas íntegras reforçadas com CPR e CRF, ou seja, vigas que não sofreram carregamento prévio à aplicação do reforço. Essas também foram levadas à ruptura.

4.3.1.1. Ensaio 1 – Vigas sem reforço solicitadas ao ELU

a) Viga V5 – 1º Lote de vigas

Apresenta-se na Figura 4.9 o resultado do ensaio de flexão a quatro pontos da viga V5. Essa viga foi solicitada ao Estado Limite Último, com o objetivo de se inferir o valor da resistência à flexão do primeiro lote de vigas, adequando os ensaios seguintes de acordo com a carga máxima obtida. O carregamento foi definido a uma taxa de 20000 N/min, para finalizar após o colapso do elemento. A viga rompeu por compressão do concreto, atingindo uma carga máxima de 24,77 kN. A flecha máxima apresentada no centro do vão foi de 13,96 mm. Os corpos de prova controle do primeiro lote de vigas obtiveram resistência à compressão média aos 28 dias de 34,6 MPa e módulo de elasticidade de 32,0 GPa (Apêndice A).

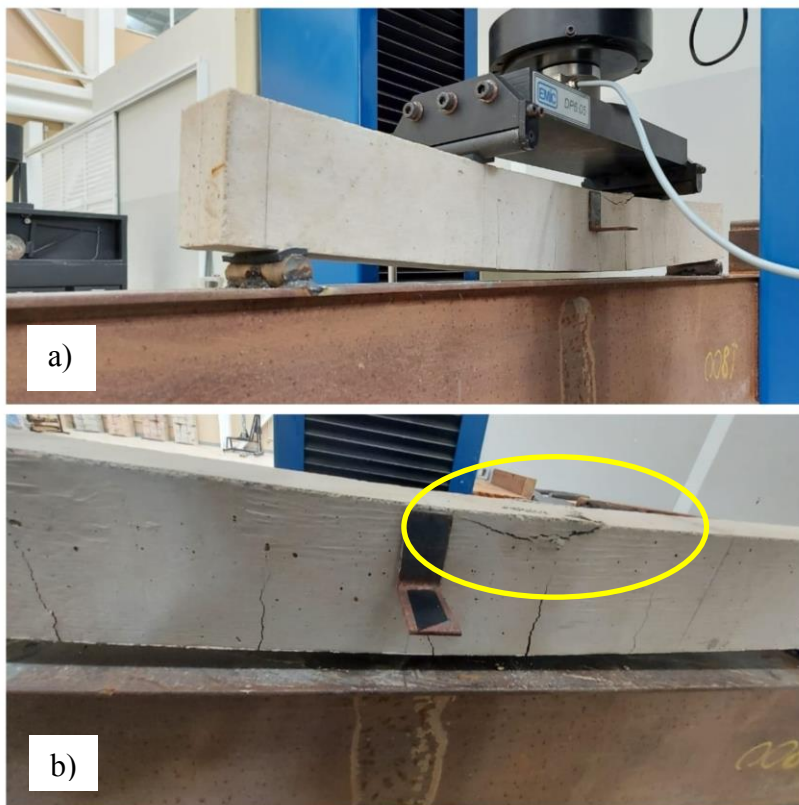
Figura 4.9: Carga x Flecha viga V5 – Solicitação ao ELU



Fonte: O autor

Pode-se notar pela Figura 4.10 o padrão das fissuras originadas pelo carregamento, se situando dentro do patamar de flexão pura da viga, região entre os pontos de aplicação de carga. Dessa maneira, fica evidenciado a região crítica da viga em que atuará o reforço projetado para os modelos experimentais (Figura 3.11). Além disso, é destacada na Figura 4.10.b a região de ruptura da viga V5.

Figura 4.10: Viga V5 – ELU a) Ruptura b) Detalhe ruptura na região de flexão pura

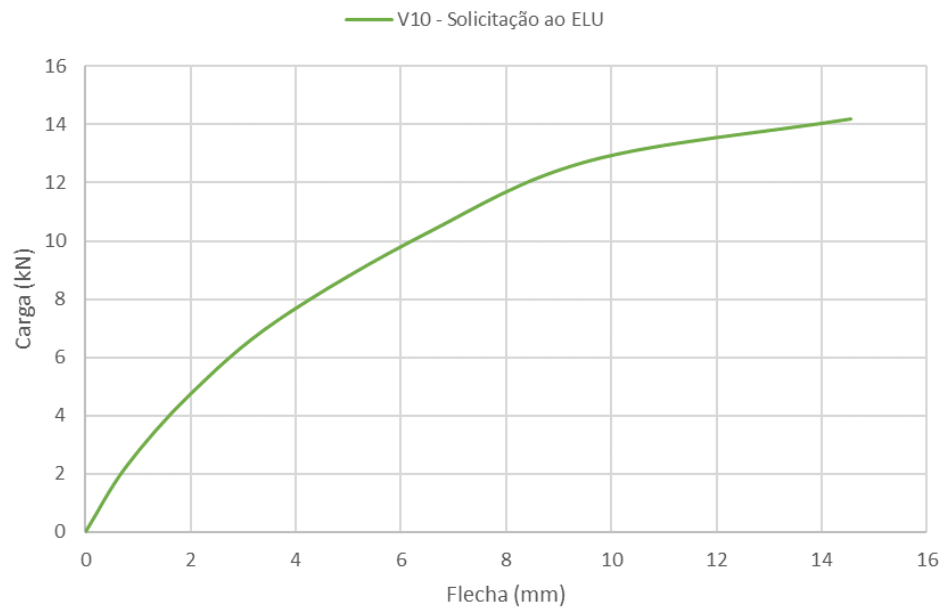


Fonte: O autor

b) Viga V10 – 2º Lote de vigas

Na Figura 4.11 estão apresentados os resultados do ensaio de ruptura na flexão a quatro pontos da viga V10, pertencente ao segundo lote de concretagem. A carga máxima obtida no ensaio foi de 14,20 kN, com ruptura por escoamento da armadura e flecha máxima de 14,55 mm. A Figura 4.12 evidencia o momento da ruptura da viga, com uma fissura originada dentro do patamar de flexão pura, região reforçada nos modelos experimentais. Vale ressaltar que as vigas V5 a V10 pertencem a diferentes lotes de concretagem, com classes de resistência C30 e C20, respectivamente. Os corpos de prova controle do segundo lote de vigas obteve resistência aos 28 dias de 20,6 MPa e módulo de elasticidade de 26,8 GPa (Apêndice A).

Figura 4.11: Carga x Flecha viga V10 – Solicitação ao ELU



Fonte: O autor

Figura 4.12: Ruptura viga V10



Fonte: O autor

4.3.1.2. Ensaio 2 – Vigas solicitadas ao ELS

a) Viga V3 – 1º Lote de vigas

A viga V3 foi solicitada inicialmente até o seu Estado Limite de Serviço, sendo 60% do valor da carga última encontrada na viga V5. Foi realizado um ciclo de carga e descarga progressivo no elemento, isto é, a cada ciclo foi acrescido 10% da carga total, até chegar aos 60% da carga última, como demonstrado na Figura 3.19 e descrito na Tabela 4.4. Foi definida uma taxa para uma duração de um minuto para cada ciclo de carregamento.

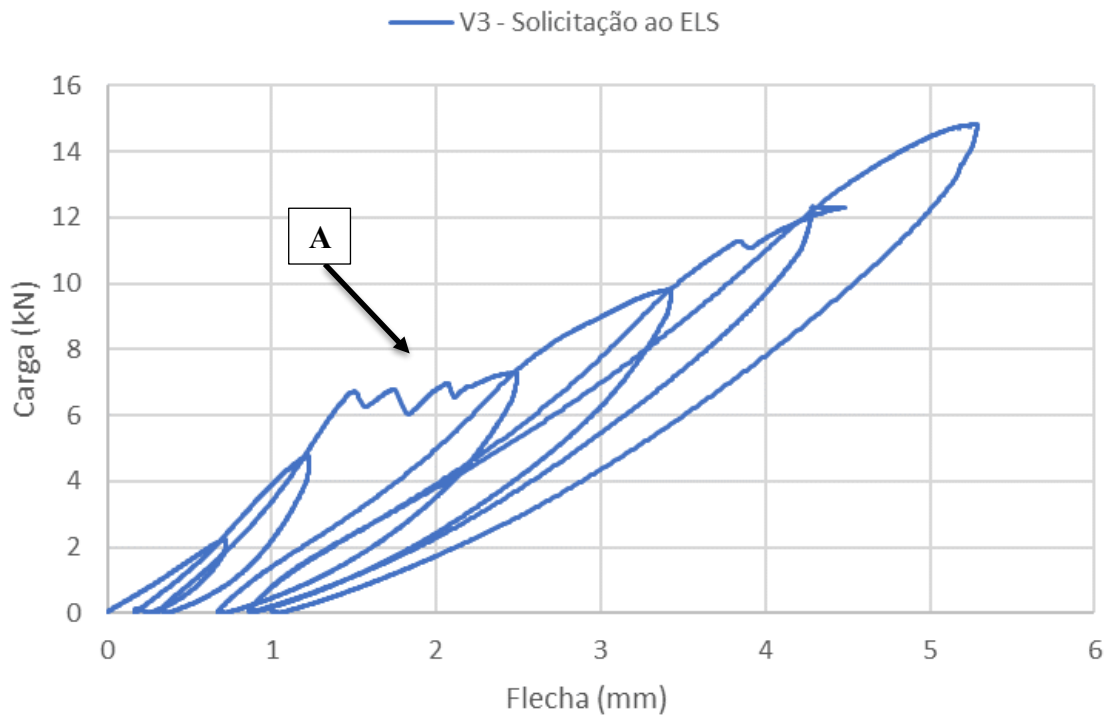
Tabela 4.4: Ciclos de carga e descarga até o ELS – V3

Ciclo	Carga (kN)	Taxa (N/min)
1	2,5	2500
2	5,0	5000
3	7,5	7500
4	10,0	10000
5	12,5	12500
6	15,0	15000

Fonte: O autor

Os resultados do ensaio estão apresentados na Figura 4.13. A abertura de fissura ocorreu por volta de 6,7 kN, durante o terceiro ciclo de carregamento, identificado no gráfico pelo Ponto A. A primeira fissura surgiu na face tracionada da viga, na direção do ponto de aplicação de carga (Figura 4.14). Nos ciclos seguintes foi possível observar o surgimento de novas fissuras dentro do patamar de flexão pura da viga, assim como o crescimento das fissuras existentes. Observa-se no gráfico da Figura 4.13 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** que a cada novo ciclo há um crescimento de uma flecha residual na viga, mesmo após o descarregamento. Ao final do procedimento, a flecha residual da viga foi de 1,00 mm.

Figura 4.13: Carga x Flecha viga V3 (ELS)



Fonte: O autor

Figura 4.14: Viga V3 após a solicitação de 60% de sua carga última



Fonte: O autor

b) Viga V4 – 1º Lote de vigas

De maneira análoga à viga V3, a viga V4 também foi solicitada ao Estado Limite de Serviço em ciclos de carregamento conforme Tabela 4.5.

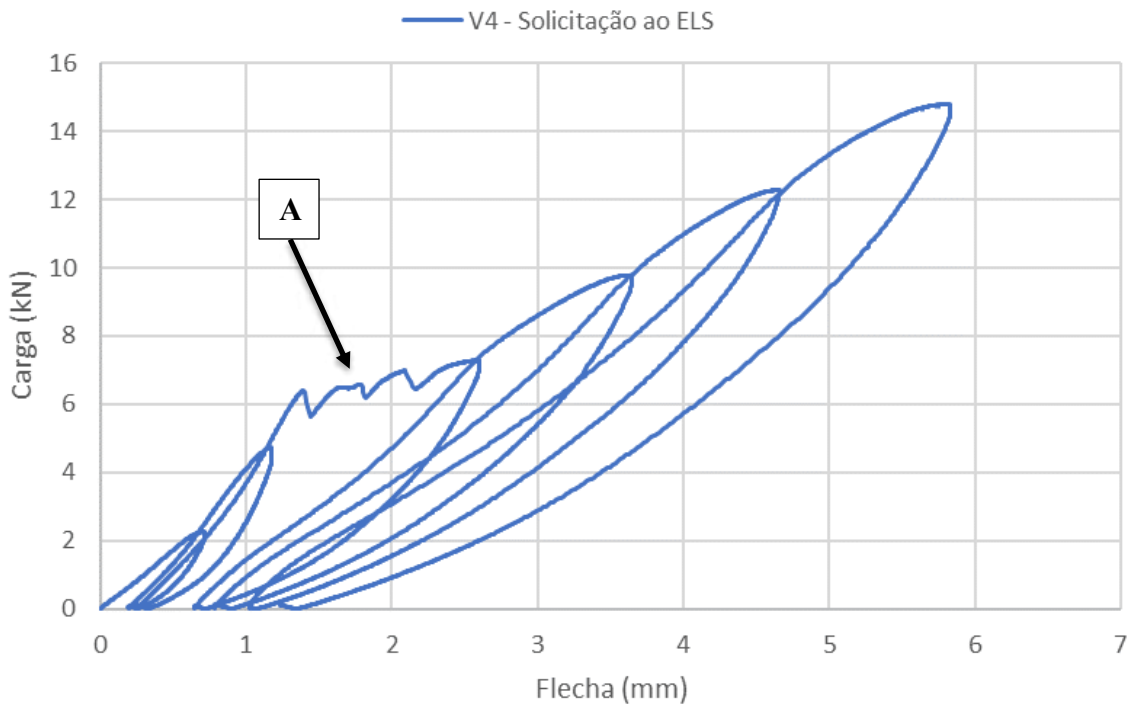
Tabela 4.5: Ciclos de carga e descarga até o ELS – V4

Ciclo	Carga (kN)	Taxa (N/min)
1	2,5	2500
2	5,0	5000
3	7,5	7500
4	10,0	10000
5	12,5	12500
6	15,0	15000

Fonte: O autor

Os resultados da solicitação ao ELS da viga V4 estão expostos na Figura 4.15. A abertura de fissuras ocorreu próximo à aplicação da carga, durante o terceiro ciclo do carregamento, na marca de 6,4 kN (Ponto A). Do quarto ciclo em diante, surgiram outras fissuras dentro do patamar de flexão pura viga, aumentando de comprimento até o final do procedimento (Figura 4.16). A flecha residual ao final do ensaio foi de 1,23 mm.

Figura 4.15: Carga x Flecha V4 ELS



Fonte: O autor

Figura 4.16: Fissuras dentro do patamar de flexão pura viga V4



Fonte: O autor

c) Viga V8 – 2º Lote de vigas

A seguir estão apresentados os resultados dos ensaios na viga V8, inicialmente solicitada até 60% de sua carga última. Por pertencer ao 2º lote de vigas, foi utilizado como referência para a carga última o valor obtido pela viga V10 no item 4.3.1.1. Na Tabela 4.6 são exibidos os detalhes do ensaio até o estado limite de serviço.

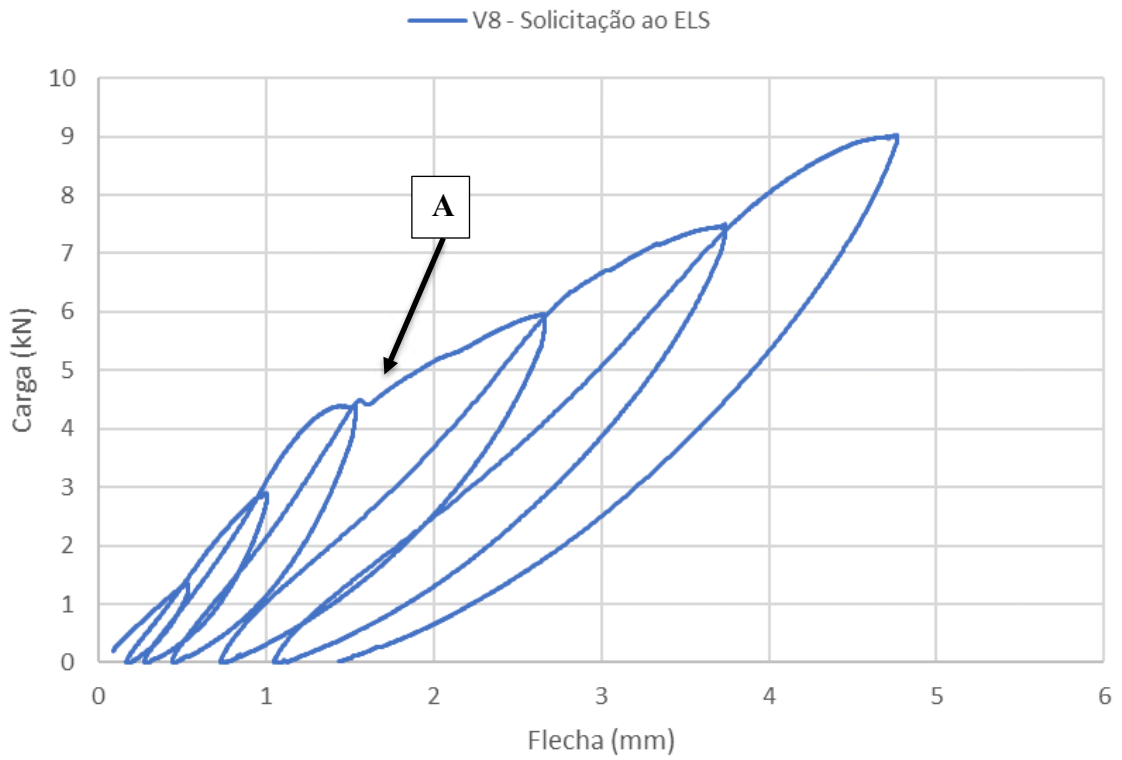
Tabela 4.6: Ciclo de carga e descarga viga V8 ELS

Ciclo	Carga (kN)	Taxa (N/min)
1	1,5	1500
2	3,0	3000
3	4,5	4500
4	6,0	6000
5	7,5	7500
6	9,0	9000

Fonte: O autor

Na Figura 4.17 estão apresentados os resultados do ensaio até o ELS para a viga V8. Foi observada a abertura de fissuras de 0,1 mm e 0,2 mm no quarto ciclo do carregamento (Ponto A). Ao final do procedimento, as fissuras apresentaram uma espessura de 0,6 mm. A flecha residual foi de 1,43 mm. Na Figura 4.18 estão expostas as fissuras apresentadas pela viga após a solicitação até o ELS. Nota-se que todas as fissuras estão presentes dentro do patamar de flexão pura da viga.

Figura 4.17: Carga x Flecha Viga V8 ELS



Fonte: O autor

Figura 4.18: Fissuração viga V8 após ELS



Fonte: O autor

d) Viga V9 – 2º Lote de vigas

A viga V9 também foi inicialmente solicitada até o Estado Limite de Serviço. Na Tabela 4.7 são apresentados os dados dos ciclos de carregamento e descarregamento na primeira etapa do ensaio. Os resultados do ensaio estão exibidos naFonte: O autor

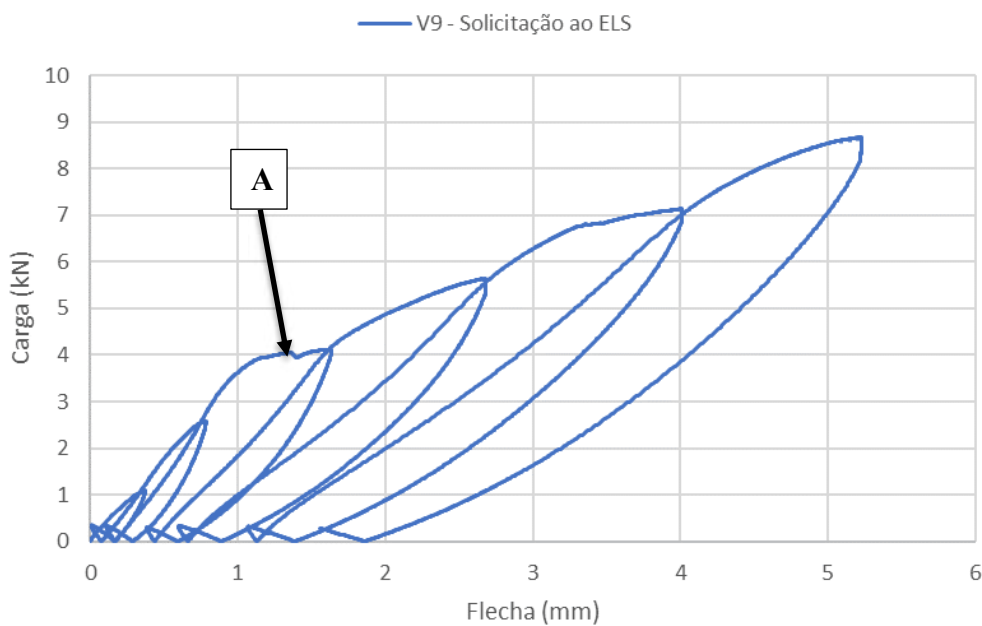
Figura 4.19.

Tabela 4.7: Ciclo de carga e descarga viga V9 ELS

Ciclo	Carga (kN)	Taxa (N/min)
1	1,5	1500
2	3,0	3000
3	4,5	4500
4	6,0	6000
5	7,5	7500
6	9,0	9000

Fonte: O autor

Figura 4.19: Carga x Flecha viga V9 ELS



Fonte: O autor

A abertura de fissuras ocorreu durante o terceiro ciclo do carregamento (Ponto A), com 0,1 mm de espessura, próxima ao ponto de aplicação da carga. Durante os demais ciclos, além do crescimento das fissuras existentes, novas fissuras surgiram, com espessura máxima de 0,6 mm até o fim do processo. Em sua grande maioria, as fissuras se situaram dentro do patamar de flexão pura da viga, conforme evidenciado na Figura 4.20. A flecha residual ao final do sexto ciclo foi de 1,55 mm.

Figura 4.20: Fissuras viga V9 após ELS



Fonte: O autor

4.3.1.3. Ensaio 3 – Aplicação de reforço em vigas solicitadas ao ELS

a) Viga V3 – 1º Lote de vigas – Reforço de CRF

Ao final da solicitação ao ELS, foi aplicado na viga V3 o reforço por encamisamento da região fletida com Concreto Reforçado com Fibras. Assim, a viga foi novamente levada a EMIC DL60000 para ser ensaiada até a ruptura. O ensaio prosseguiu novamente com ciclos de carga e descarga com a duração de um minuto e acréscimo de 10% da carga última por ciclo (Tabela 4.8). Porém, foram realizados ciclos até 100% da carga obtida no item 4.3.1.1.a., e posteriormente até o colapso. Nos ensaios controle, o CRF utilizado apresentou resistência à compressão aos 28 dias de 24,5 MPa, à tração por compressão diametral de 2,6 MPa e módulo de elasticidade de 31,1 GPa (Apêndice A).

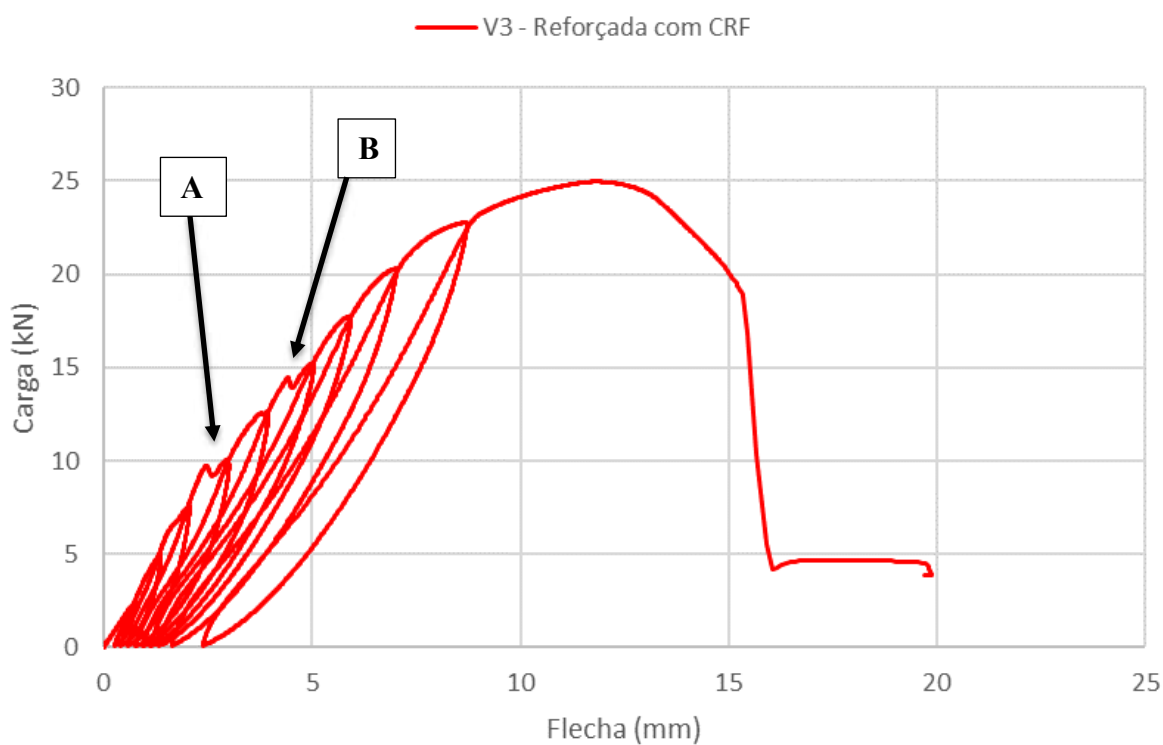
Tabela 4.8: Ciclos de carga e descarga da V3 reforçada

Ciclo	Carga (kN)	Taxa (N/min)
1	2,5	2500
2	5,0	5000
3	7,5	7500
4	10,0	10000
5	12,5	12500
6	15,0	15000
7	17,5	17500
8	20,0	20000
9	22,5	22500
10	25,0	25000

Fonte: O autor

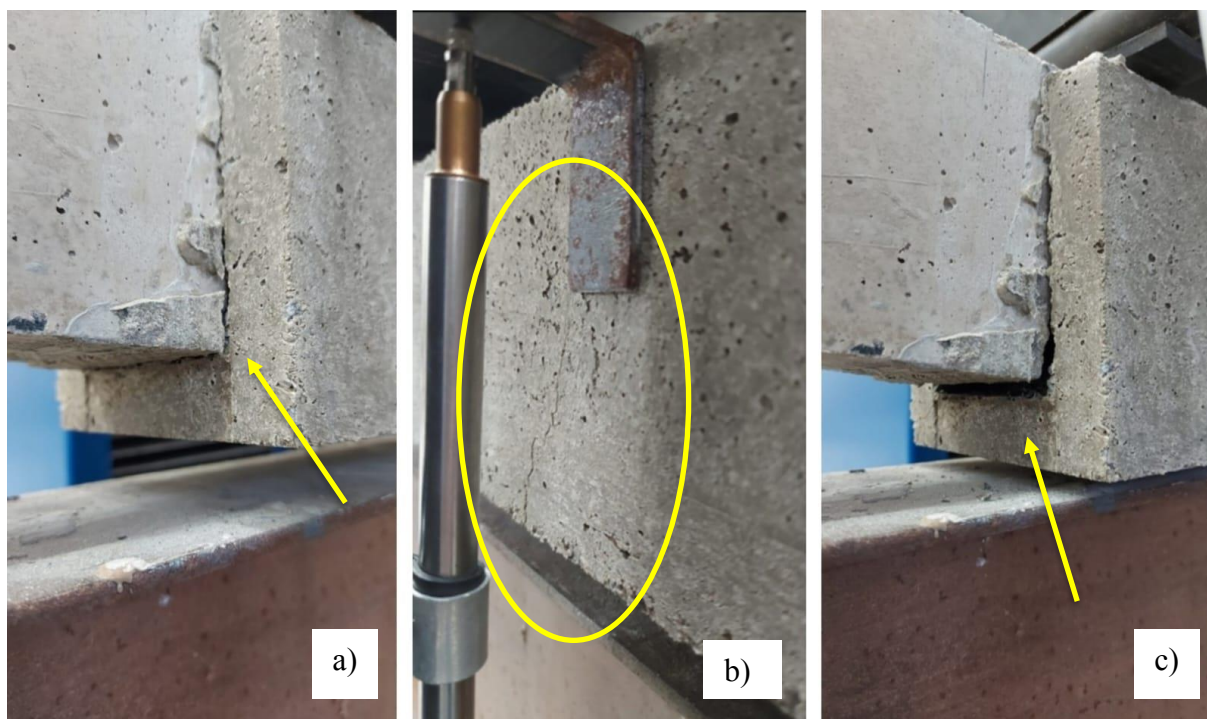
Os resultados do ensaio na viga V3 reforçada com CRF são apresentados na Figura 4.21. As primeiras fissuras ocorreram durante o quarto ciclo, em 9,8 kN, localizadas na interface do reforço com a viga, como demonstrado pelo Ponto A na Figura 4.22.a. Do sexto ciclo em diante também ocorreu abertura de fissuras no reforço de CRF no centro do vão, identificado no gráfico pelo Ponto B (Figura 4.22.b). Ao final do décimo ciclo, a viga recuperou 100% de sua carga última, rompendo por escoamento da armadura, próxima do ponto de aplicação da carga, no limite do reforço, conforme Figura 4.22.c.

Figura 4.21: Carga x Flecha viga V3 reforçada com CRF



Fonte: O autor

Figura 4.22: Viga V3 – reforçada CRF a) Abertura de fissuras interface b) Fissuras reforço c) Ruptura



Fonte: O autor

b) Viga V4 – 1º Lote de vigas – Reforço de CPR

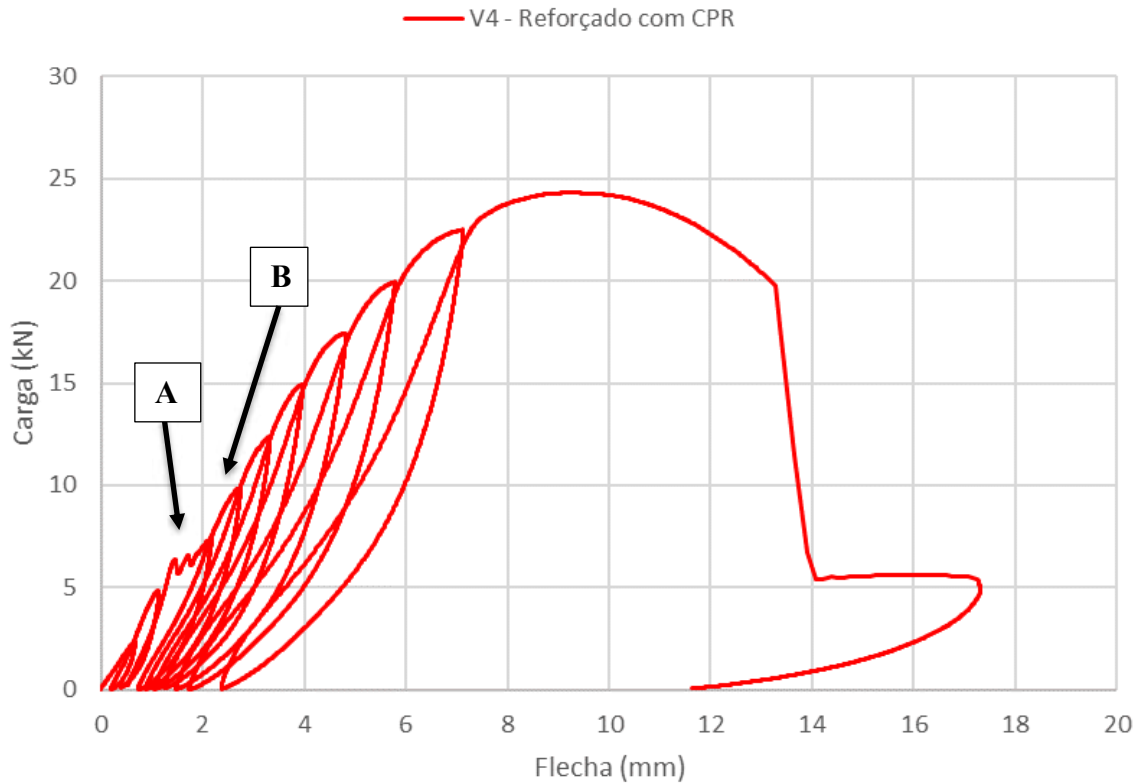
Após o ensaio até o Estado Limite de Serviço, a viga V4 foi reforçada com um encamisamento de CPR em sua região fletida. Os resultados do ensaio estão apresentados na Figura 4.23. Os detalhes de cada ciclo estão evidenciados na Tabela 4.9. Pelos ensaios controle, o CPR apresentou resistência média à tração na flexão de 25,6 MPa, à compressão de 84,9 MPa e módulo de elasticidade de 43,6 GPa (Apêndice A).

Tabela 4.9: Ciclos de carga e descarga viga V4 reforçada com CPR

Ciclo	Carga (kN)	Taxa (N/min)
1	2,5	2500
2	5,0	5000
3	7,5	7500
4	10,0	10000
5	12,5	12500
6	15,0	15000
7	17,5	17500
8	20,0	20000
9	22,5	22500
10	25,0	25000

Fonte: O autor

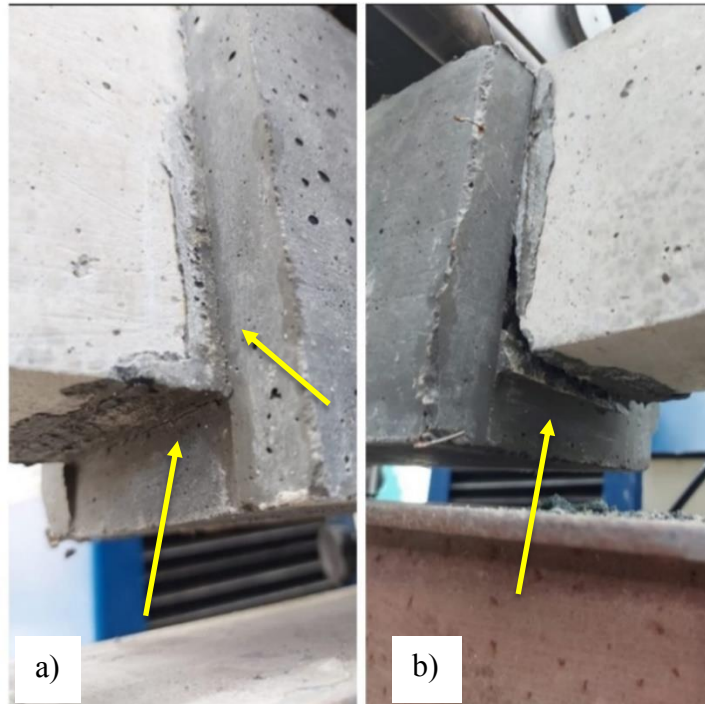
Figura 4.23: Carga x Flecha V4 reforçada com CPR



Fonte: O autor

Apesar da indicação do Ponto A no gráfico durante o terceiro ciclo, as primeiras fissuras visíveis surgiram após o quarto ciclo (Ponto B), na interface entre o CPR e a viga, conforme apontado na Figura 4.24.a. Esse tipo de comportamento no gráfico indica que a abertura de fissuras pode ter ocorrido na região dentro do reforço (patamar de flexão pura) durante o terceiro ciclo de carregamento. A viga foi solicitada até o colapso, recuperando sua resistência última e apresentando uma ruptura por escoamento da armadura, próximo do ponto de aplicação da carga, no limite do reforço, de acordo com Figura 4.24.b.

Figura 4.24: Viga V4 – Reforçada CPR a) Abertura de fissuras b) Ruptura



Fonte: O autor

c) Viga V8 – 2º Lote de vigas – Reforço de CPR

Após a solicitação ao ELS, a viga V8 foi reforçada com CPR em sua região fletida. Os dados do ensaio estão apresentados na Tabela 4.10. Após o carregamento até 100% da carga última obtida no item 4.3.1.1.b., a viga foi levada ao colapso, atingindo 19,79 kN, um ganho de resistência de 39,4% com o reforço. A flecha residual após o décimo ciclo foi de 1,38 mm. Pelos ensaios controle, o CPR apresentou resistência média à tração na flexão de 20,1 MPa, à compressão de 104,2 MPa e módulo de elasticidade de 42,8 GPa (Apêndice A).

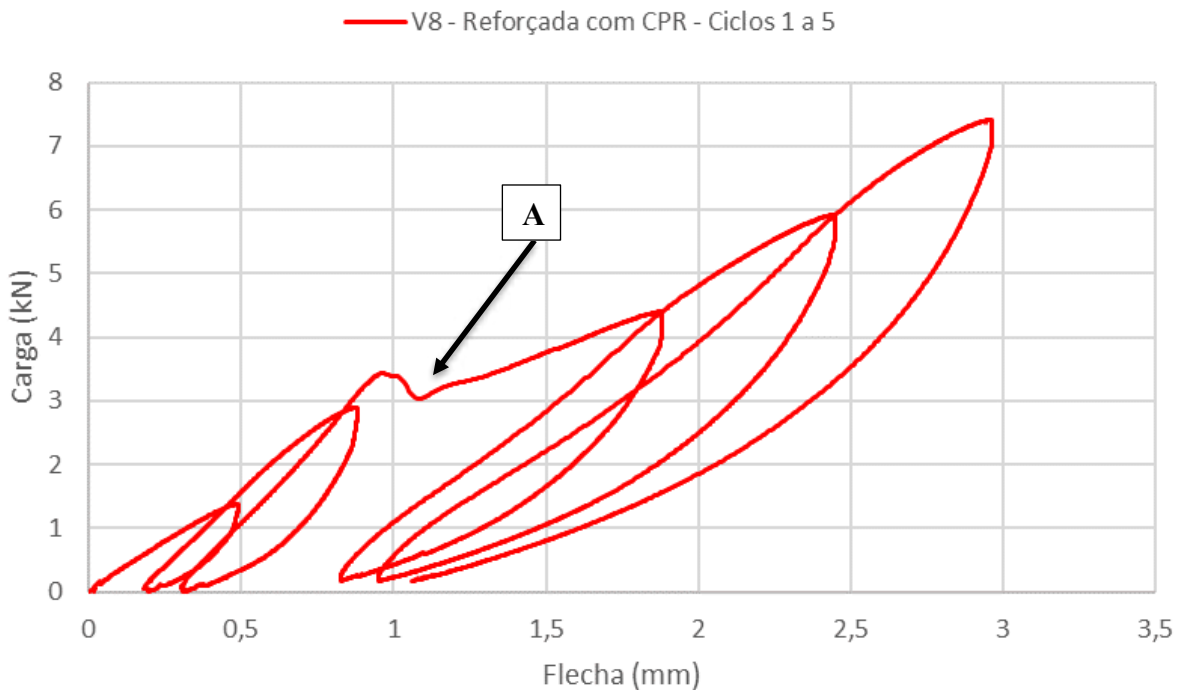
Tabela 4.10: Ciclo de carga e descarga viga V8 reforçada

Ciclo	Carga (kN)	Taxa (N/min)
1	1,5	1500
2	3,0	3000
3	4,5	4500
4	6,0	6000
5	7,5	7500
6	9,0	9000
7	10,5	10500
8	12,0	12000
9	13,5	13500
10	15,0	15000
11	Colapso	15000

Fonte: O autor

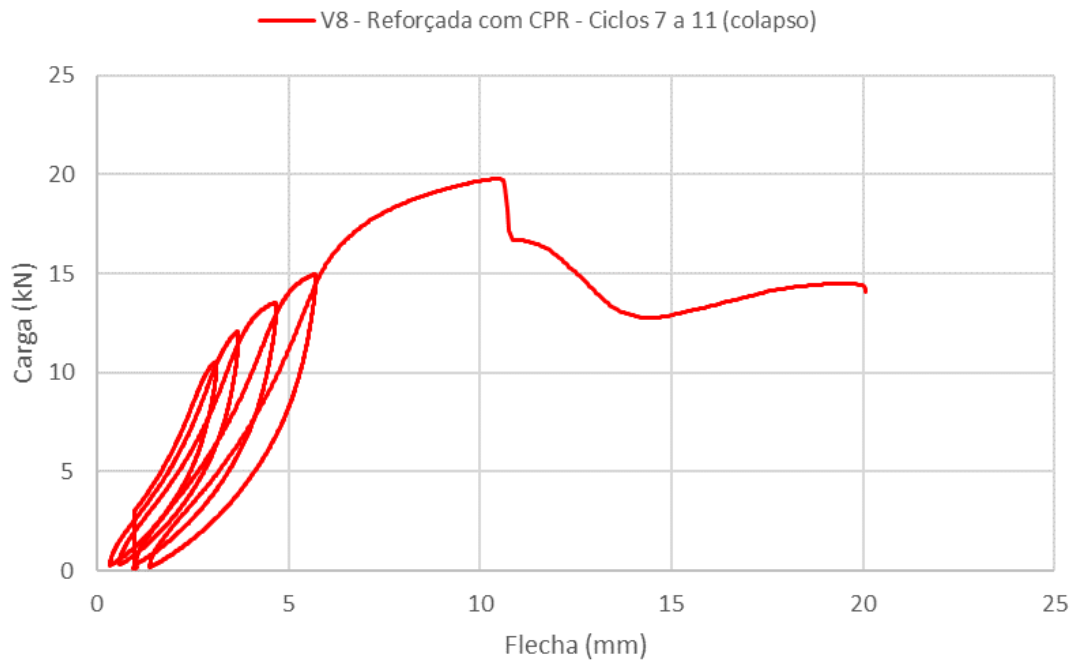
Devido a duas quedas de energia consecutivas no dia do ensaio, os dados do sexto carregamento do ensaio foram perdidos, dificultando a visualização dos dados. Assim, os resultados da viga V8 reforçada com CPR foram divididos em dois gráficos, um com os dados dos cinco primeiros ciclos (Figura 4.25), e outro com os ciclos restantes (Figura 4.26). Durante o ensaio, foi possível observar a abertura de fissuras durante o terceiro ciclo (Ponto A), surgindo na interface entre o CPR e a viga, como evidenciado na Figura 4.27.a. A ruptura ocorreu por escoamento da armadura tracionada, na interface entre a viga e o reforço, próximo ao ponto de aplicação da carga (Figura 4.27).

Figura 4.25: Carga x Flecha viga V8 reforçada - Ciclos 1 a 5



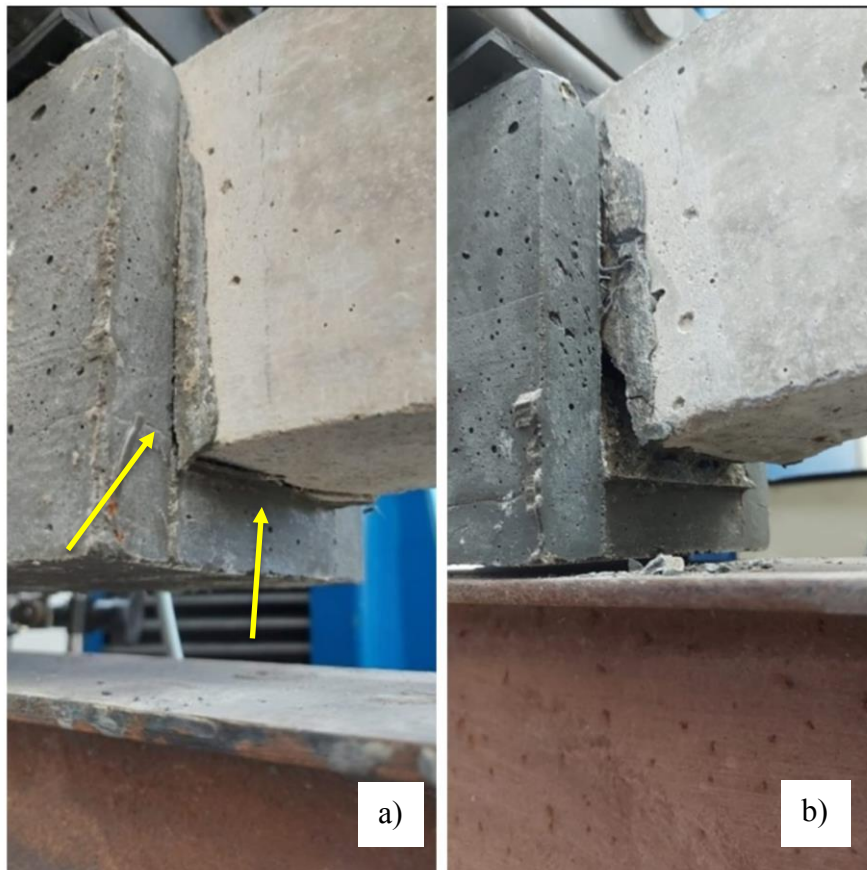
Fonte: O autor

Figura 4.26: Carga x Flecha viga V8 reforçada - Ciclos 7 a 11



Fonte: O autor

Figura 4.27: Viga V8 – Reforçada CPR a) Abertura de fissuras b) Ruptura



Fonte: O autor

d) Viga V9 – 2º Lote de vigas – Reforço de CRF

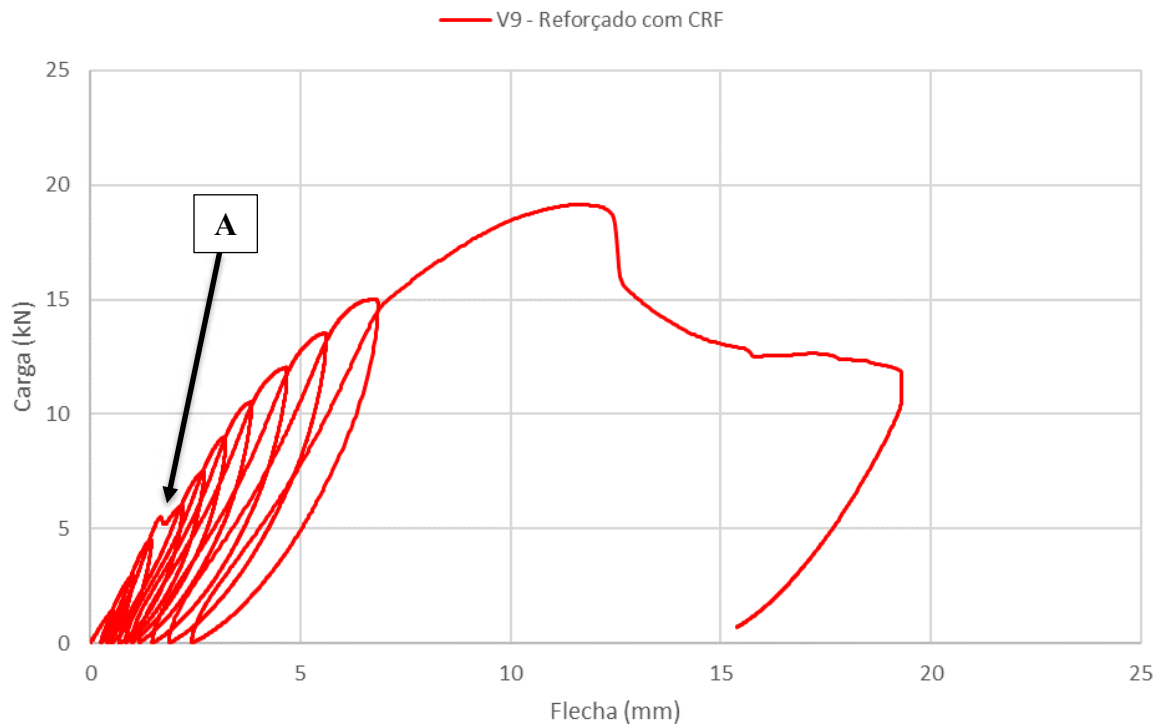
Analogamente à viga V8, a viga V9 foi reforçada com CRF e novamente solicitada a ciclos carregamento até 100% da carga obtida no item 4.3.1.1.b e, posteriormente, levada ao colapso, conforme Tabela 4.11. Os resultados estão exibidos na Figura 4.28. Após 28 dias, o CRF atingiu resistência à compressão de 24,3 MPa, à tração por compressão diametral de 2,6 MPa e módulo de elasticidade de 30,5 GPa (Apêndice A).

Tabela 4.11: Ciclos de carga e descarga viga V9 reforçada

Ciclo	Carga (kN)	Taxa (N/min)
1	1,5	1500
2	3,0	3000
3	4,5	4500
4	6,0	6000
5	7,5	7500
6	9,0	9000
7	10,5	10500
8	12,0	12000
9	13,5	13500
10	15,0	15000
11	Colapso	15000

Fonte: O autor

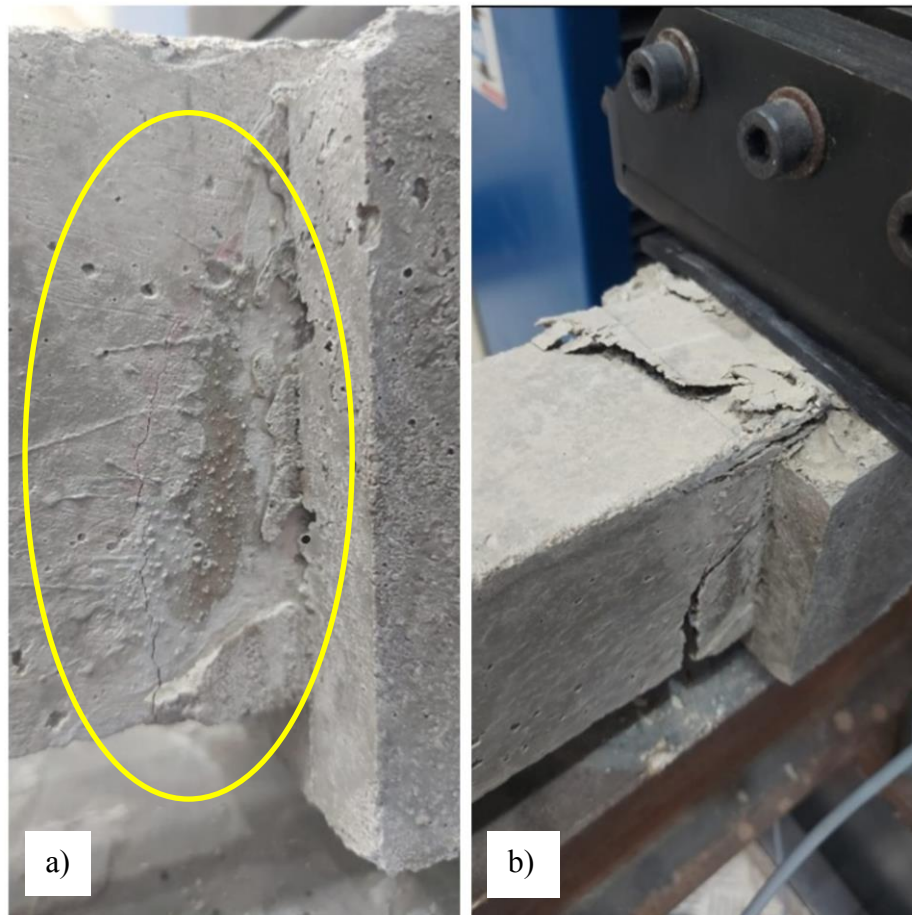
Figura 4.28: Carga x Flecha viga V9 Reforçada



Fonte: O autor

A abertura de fissuras ocorreu durante o quarto ciclo de carregamento, apontado no gráfico pelo Ponto A. Neste caso, foi reaberta a fissura existente fora da região de flexão pura que, conseqüentemente, se situou fora do reforço de CRF, como indicado na Figura 4.29.a. Essa mesma fissura também está indicada na Figura 4.20. Por se situar fora do reforço, foi possível monitorar a espessura da fissura durante o ensaio, iniciando com 0,2 mm no quarto ciclo, chegando a 3,0 mm no décimo ciclo. A ruptura da viga ocorreu por compressão do concreto, como pode ser observado na Figura 4.29.b. A carga máxima obtida foi de 19,14 kN, um ganho de resistência de 34,8%. A flecha residual após o décimo ciclo foi de 2,41 mm.

Figura 4.29: Viga V9 – Reforçada com CRF a) Abertura de fissuras b) Ruptura



Fonte: O autor

4.3.1.4. Ensaio 4 – Vigas íntegras reforçadas

a) Viga V1 – 1º Lote de vigas – Reforço de CRF

A viga V1 foi reforçada com CRF sem nenhum tipo de carregamento prévio. Foram realizados ciclos progressivos de carga e descarga conforme indicado na Tabela 4.12. Por pertencer ao primeiro lote de concretagem, utilizou-se como referência para a resistência total da viga, o valor da carga última obtida pela viga V5 no item 4.3.1.1. Após atingir 100% dessa carga no 10º ciclo de carregamento, a viga foi solicitada até a ruptura em um novo ciclo, atingindo uma carga máxima de 26,94 kN, um ganho de resistência de 8,8%. Os resultados do procedimento estão evidenciados na Figura 4.30. A resistência à compressão após 28 dias do CRF utilizado foi de 25,0 MPa, à tração por compressão diametral de 3,2 MPa e módulo de elasticidade de 30,1 GPa (Apêndice A).

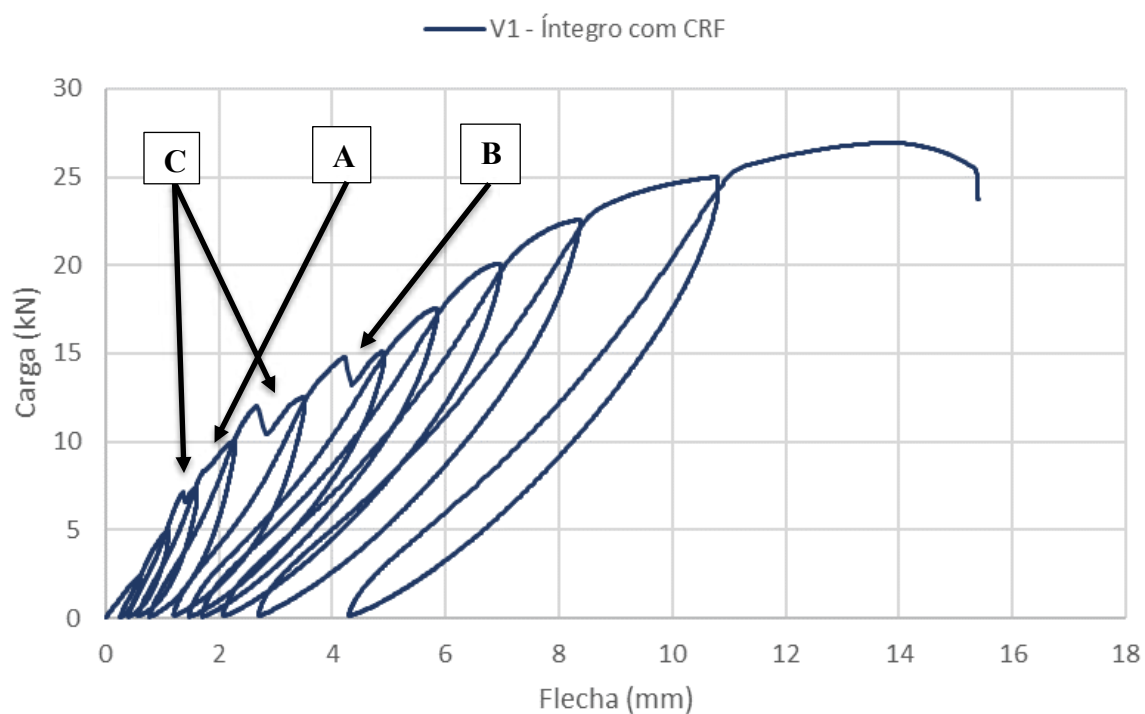
Tabela 4.12: Ciclos de carga e descarga viga V1

Ciclo	Carga (kN)	Taxa (N/min)
1	2,5	2500
2	5,0	5000
3	7,5	7500
4	10,0	10000
5	12,5	12500
6	15,0	15000
7	17,5	17500
8	20,0	20000
9	22,5	22500
10	25,0	25000
11	Colapso	25000

Fonte: O autor

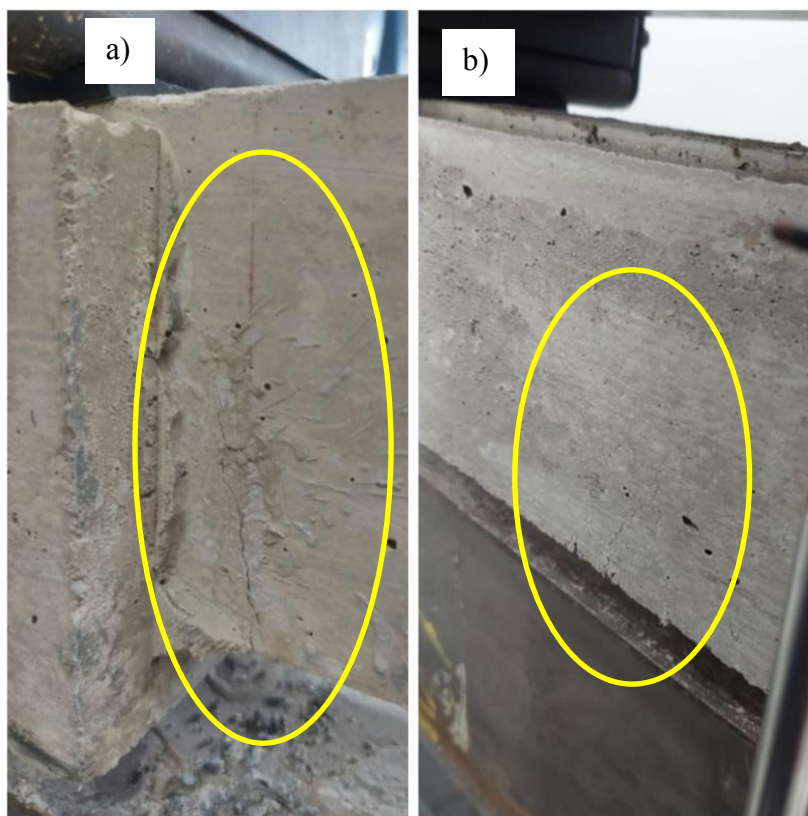
O surgimento das primeiras fissuras visíveis ocorreu do lado de fora do reforço, durante o quarto ciclo, indicado pelo Ponto A no gráfico da Figura 4.30 e evidenciado na Figura 4.31.a. A partir do sexto ciclo, passaram a surgir fissuras no reforço de CRF no centro do vão, identificado no gráfico pelo Ponto B (Figura 4.31.b). No entanto, conforme apontado pelo Ponto C na Figura 4.30, pode-se notar ruídos no terceiro e quinto ciclo, indicando possíveis aberturas de fissuras dentro da região do reforço (flexão pura). No decorrer do procedimento, percebe-se que também há uma flecha residual após o descarregamento de cada ciclo, chegando a 4,30 mm após o décimo ciclo. Ao colapsar, a viga apresentou uma ruptura por escoamento da armadura.

Figura 4.30: Carga x Flecha viga V1 – Íntegro com CRF



Fonte: O autor

Figura 4.31: Viga V1 – Íntegra CRF a) Abertura de fissuras b) Abertura de fissuras no reforço de CRF



Fonte: O autor

b) Viga V2 – 1º Lote de vigas – Reforço de CPR

De maneira análoga à viga V1, a viga V2 também foi reforçada de forma íntegra, isto é, sem nenhum tipo de carregamento prévio. Porém, a viga V2 foi reforçada com CPR. Na Tabela 4.13 são apresentados os dados dos ciclos de carregamento realizados. Após a solicitação de 100% da carga obtida pela viga V5 no item 4.3.1.1, a viga foi carregada em um novo ciclo até a ruptura, atingindo 22,67 kN. Assim, apesar de resistir à mais um ciclo após a carga máxima da viga sem reforço, não houve ganho de resistência. Os resultados do ensaio estão exibidos no. A resistência do CPR à compressão após 28 dias foi de 98,4 MPa, à tração na flexão de 23,5 MPa e módulo de elasticidade de 53,2 GPa (Apêndice A).

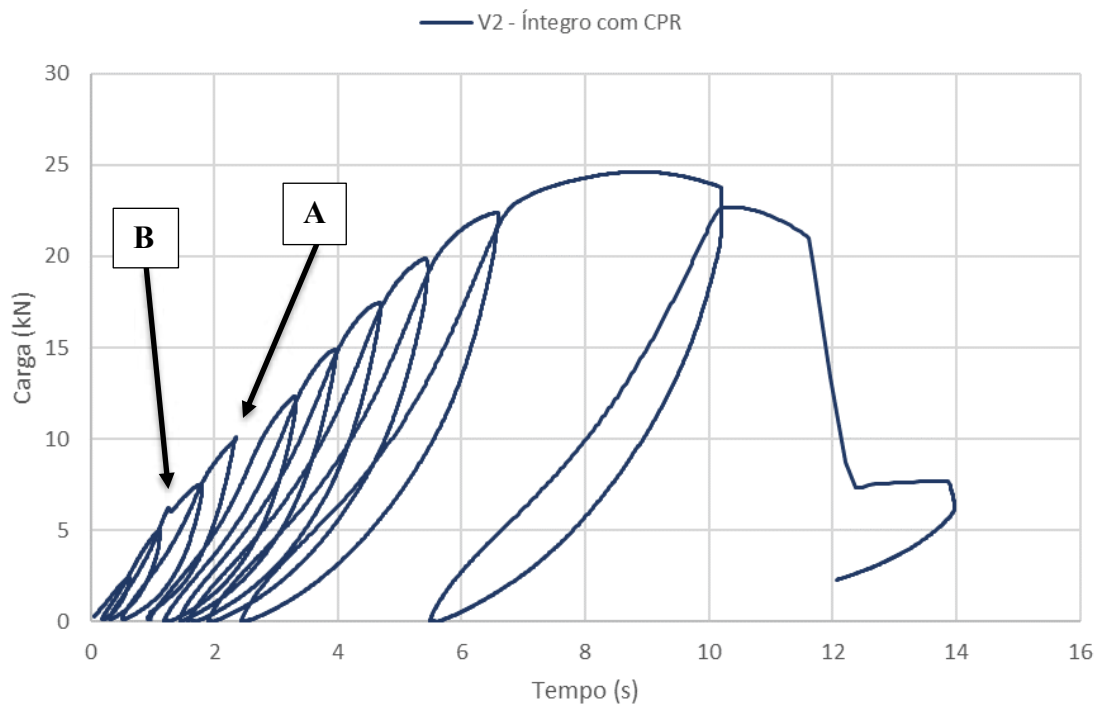
Tabela 4.13: Ciclos de carga e descarga viga V2

Ciclo	Carga (kN)	Taxa (N/min)
1	2,5	2500
2	5,0	5000
3	7,5	7500
4	10,0	10000
5	12,5	12500
6	15,0	15000
7	17,5	17500
8	20,0	20000
9	22,5	22500
10	25,0	25000
11	Colapso	25000

Fonte: O autor

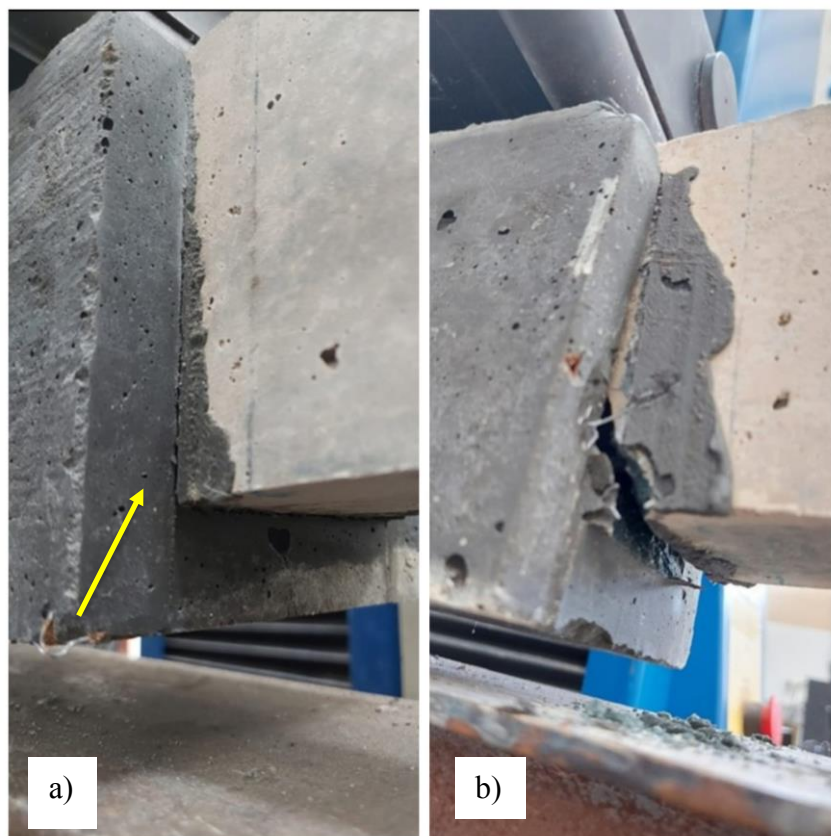
As primeiras fissuras observadas ocorreram na interface entre o CPR e o concreto da viga durante o quarto ciclo de carregamento, indicado pelo Ponto A no gráfico da Figura 4.32 e apontado na Figura 4.33.a. Na Figura 4.32, também é possível notar uma pequena interferência durante o terceiro ciclo (Ponto B), sugerindo uma abertura de fissuras dentro da região do reforço, onde não ficou visível durante o procedimento no laboratório. A ruptura ocorreu por escoamento da armadura, próxima do ponto de aplicação da carga, adjacente ao reforço de CPR, como pode ser observado na Figura 4.33.b. Durante os ciclos de carga e descarga, também pode-se perceber uma flecha residual no elemento, tendo um aumento considerável entre o nono e décimo ciclo, de 2,44 mm para 5,49 mm.

Figura 4.32: Carga x Flecha viga V2 - Íntegra com CPR



Fonte: O autor

Figura 4.33: Viga V2 – Reforçada com CPR a) Abertura de fissuras b) Ruptura



Fonte: O autor

c) Viga V6 – 2º Lote de vigas – Reforço de CPR

A viga V6 recebeu a aplicação do reforço de CPR sem nenhum carregamento prévio, assim como as vigas V1 e V2. Porém, como pertence ao 2º lote de concretagens, foi utilizado como referência de carga última o valor obtido pela viga V10 no item 4.3.1.1. Após atingir 100% da carga última por meio de ciclos de carga e descarga, a viga foi levada ao colapso, conforme indicado na Tabela 4.14. Os resultados estão apresentados na Figura 4.34. O CPR utilizado alcançou aos 28 dias resistência à tração na flexão de 24,4 MPa, à compressão de 88,9 MPa e módulo de elasticidade de 43,9 GPa (Apêndice A).

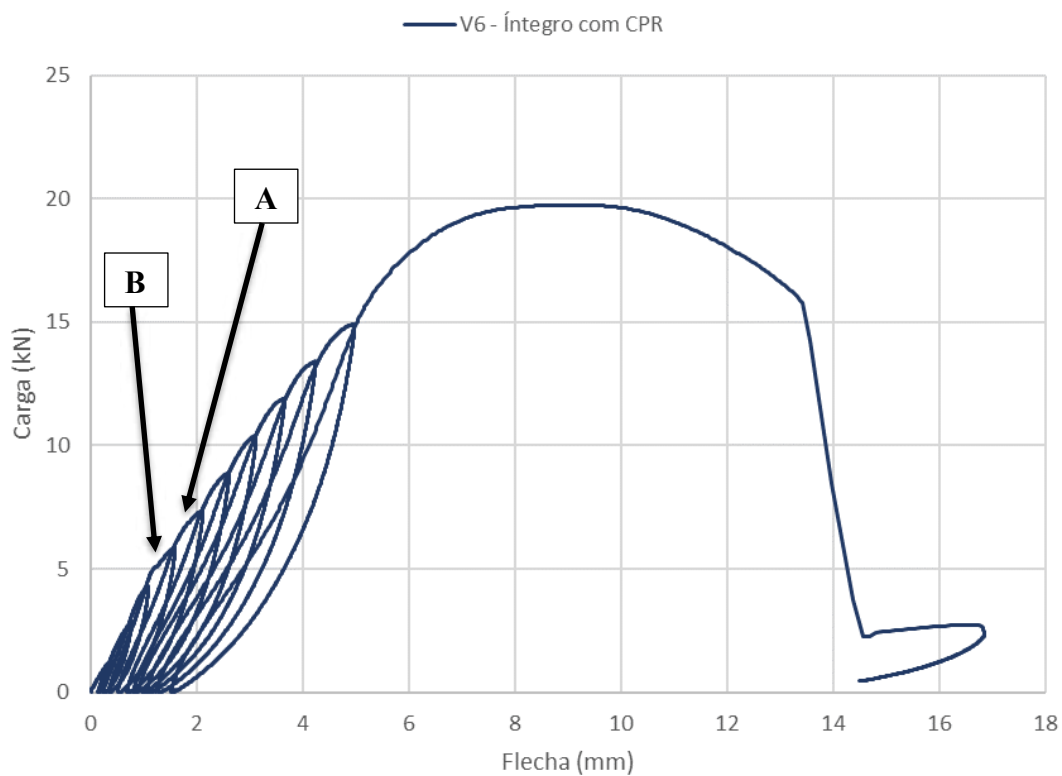
Tabela 4.14: Ciclos de carga e descarga viga V6

Ciclo	Carga (kN)	Taxa (N/min)
1	1,5	1500
2	3,0	3000
3	4,5	4500
4	6,0	6000
5	7,5	7500
6	9,0	9000
7	10,5	10500
8	12,0	12000
9	13,5	13500
10	15,0	15000
11	Colapso	15000

Fonte: O autor

Durante o procedimento, as primeiras fissuras ocorreram ao longo do quinto ciclo (Ponto A), na área tracionada da interface entre o CPR e a viga, conforme Figura 4.35.a. Contudo, pode-se notar um pequeno ruído no gráfico pelo Ponto B, no quarto ciclo, indicando uma possível abertura de fissura dentro da região de flexão pura onde foi aplicado o reforço. Após o décimo ciclo, a viga apresentou uma flecha residual de 1,52 mm. A ruptura ocorreu por escoamento da armadura (Figura 4.35.b), no mesmo ponto onde surgiram as primeiras fissuras, com carga máxima de 19,74 kN, um ganho de resistência de 39,0% em relação à viga sem reforço.

Figura 4.34: Carga x Flecha viga V6 – Íntegro com CPR



Fonte: O autor

Figura 4.35: Viga V6 – Íntegra CPR a) Abertura de fissuras b) Ruptura



Fonte: O autor

d) Viga V7 – 2º Lote de vigas – Reforço de CRF

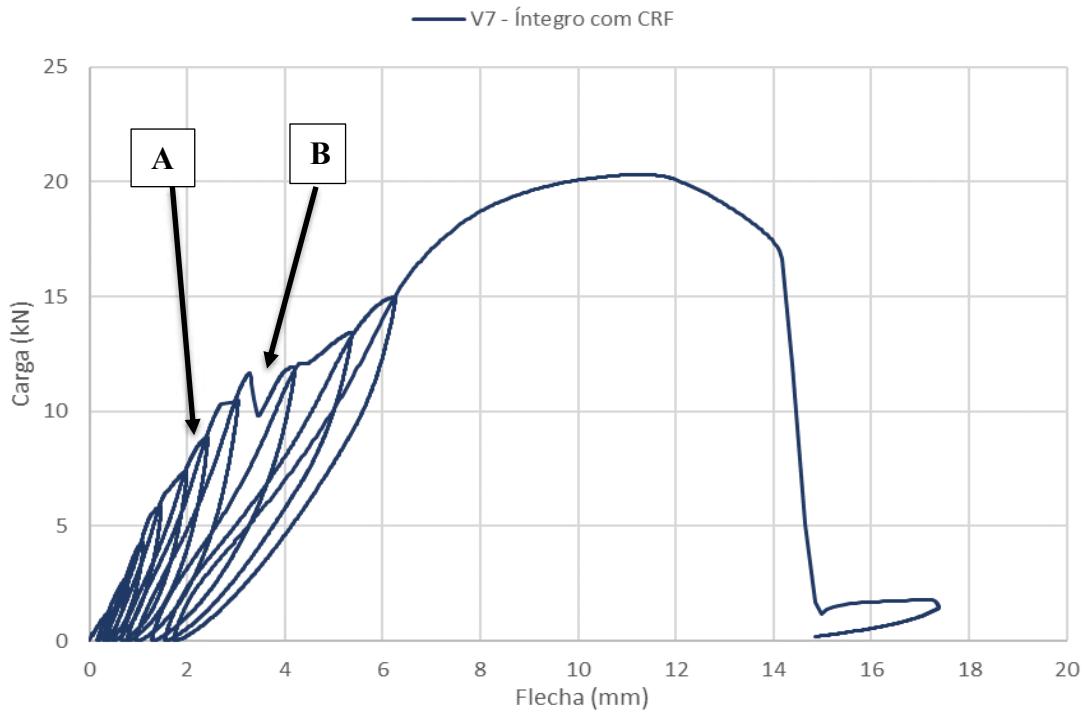
A viga V7 foi reforçada com CRF de forma íntegra, sem receber nenhum carregamento prévio. Os dados dos ciclos de carga e descarga estão apresentados na Tabela 4.15. Os resultados dos ensaios estão exibidos na Figura 4.36. O CRF apresentou resistência à compressão de 22,5 MPa, à tração por compressão diametral de 2,9 MPa e módulo de elasticidade de 29,4 GPa (Apêndice A).

Tabela 4.15: Ciclos de carga e descarga viga V7

Ciclo	Carga (kN)	Taxa (N/min)
1	1,5	1500
2	3,0	3000
3	4,5	4500
4	6,0	6000
5	7,5	7500
6	9,0	9000
7	10,5	10500
8	12,0	12000
9	13,5	13500
10	15,0	15000
11	Colapso	15000

Fonte: O autor

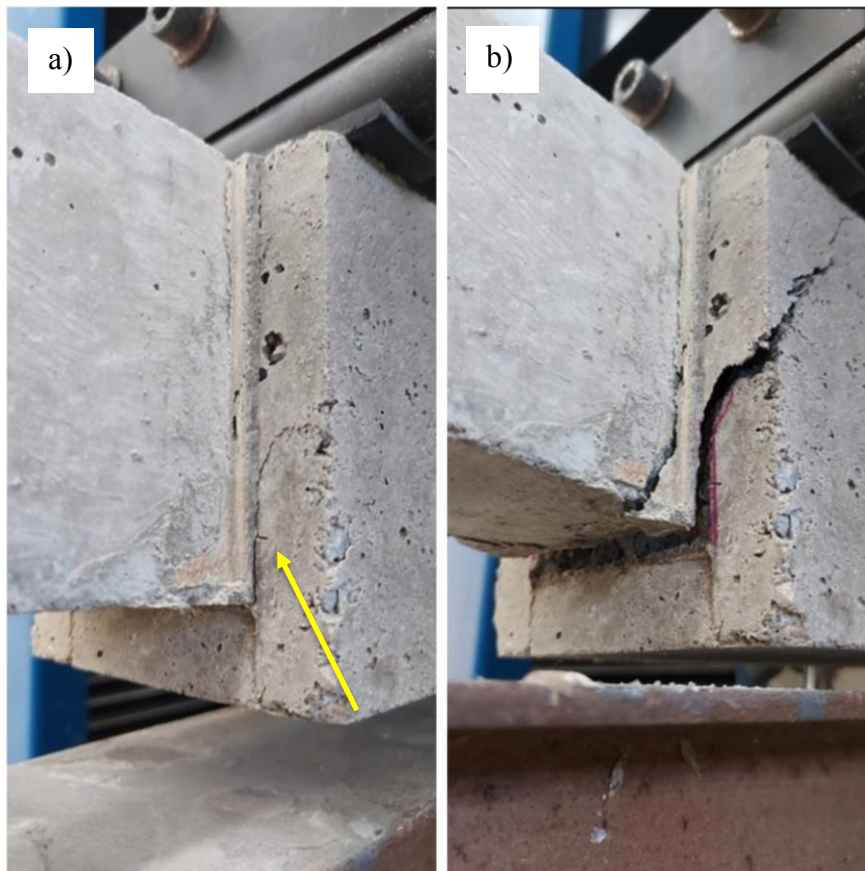
Figura 4.36: Carga x Flecha viga V7 – Íntegro com CRF



Fonte: O autor

Neste ensaio, a abertura de fissuras ocorreu durante o sexto ciclo de carregamento, na interface entre o reforço e a viga, apontado pelo Ponto A no gráfico da Figura 4.36 e indicado na Figura 4.37.a. No oitavo ciclo, surgiram fissuras no reforço de CRF (Ponto B), com espessura de 0,3 mm. Após o décimo ciclo, as fissuras no reforço apresentavam espessura de 0,6 mm. A flecha residual após o décimo ciclo foi de 1,72 mm. Não foi possível aferir com precisão a espessura das fissuras na interface do reforço. A ruptura ocorreu por escoamento da armadura (Figura 4.37.b), com 20,32 kN, sendo 43,1% a mais em relação a viga sem reforço.

Figura 4.37: Viga V7 – Íntegra CRF a) Abertura de fissuras b) Ruptura



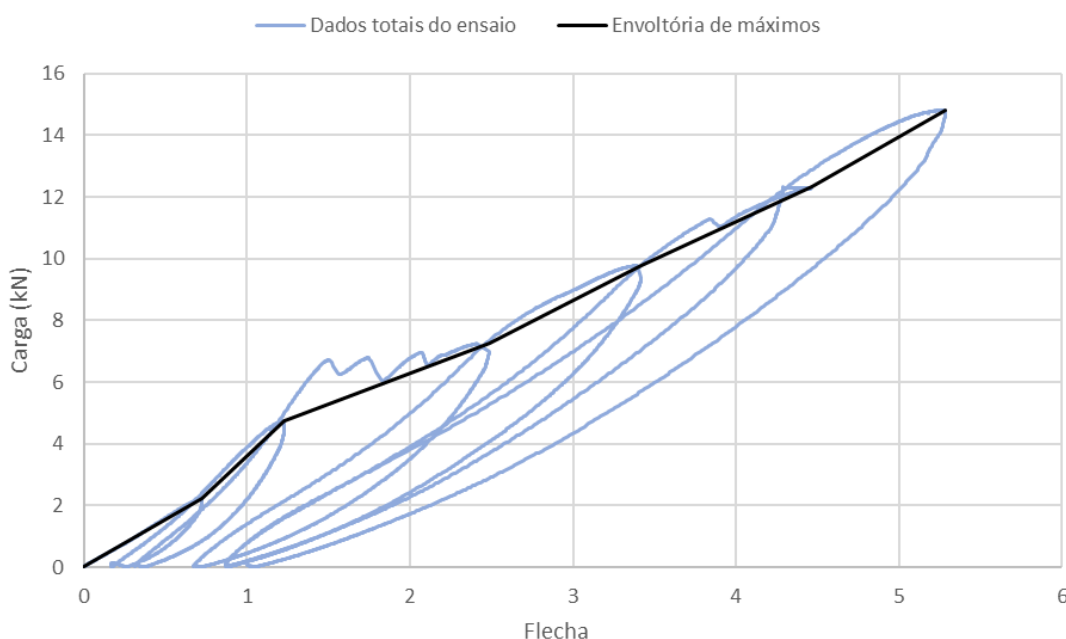
Fonte: O autor

4.3.2. Análise comparativa dos elementos reforçados

A seguir são realizadas análises comparativas do comportamento das vigas durante o carregamento. Primeiramente, são comparados os ensaios até o estado limite de serviço (ensaio 2) e após a aplicação do reforço nessas vigas (ensaio 3). Além disso, os resultados das vigas reforçadas após a solicitação prévia (ensaio 3) também são comparados com o comportamento das vigas íntegras com a aplicação do mesmo tipo de reforço (ensaio 4). Em seguida, são relacionados os resultados entre o reforço de CPR e o reforço de CRF, fazendo comparações entre as vigas do ensaio 3 e entre as vigas do ensaio 4.

Em todos os casos, foram considerados para fins de comparação os modelos experimentais do mesmo lote de concretagem, devido à diferença de resistência à flexão apresentada pelas vigas. Para facilitar a visualização dos dados, foram traçadas as envoltórias máximas dos gráficos apresentados no item 4.3.1, conforme explicitado na Figura 4.38. A tabela completa com os resultados das comparações está apresentada no Apêndice A.

Figura 4.38: Envoltória dos dados máximos dos ciclos de carga e descarga

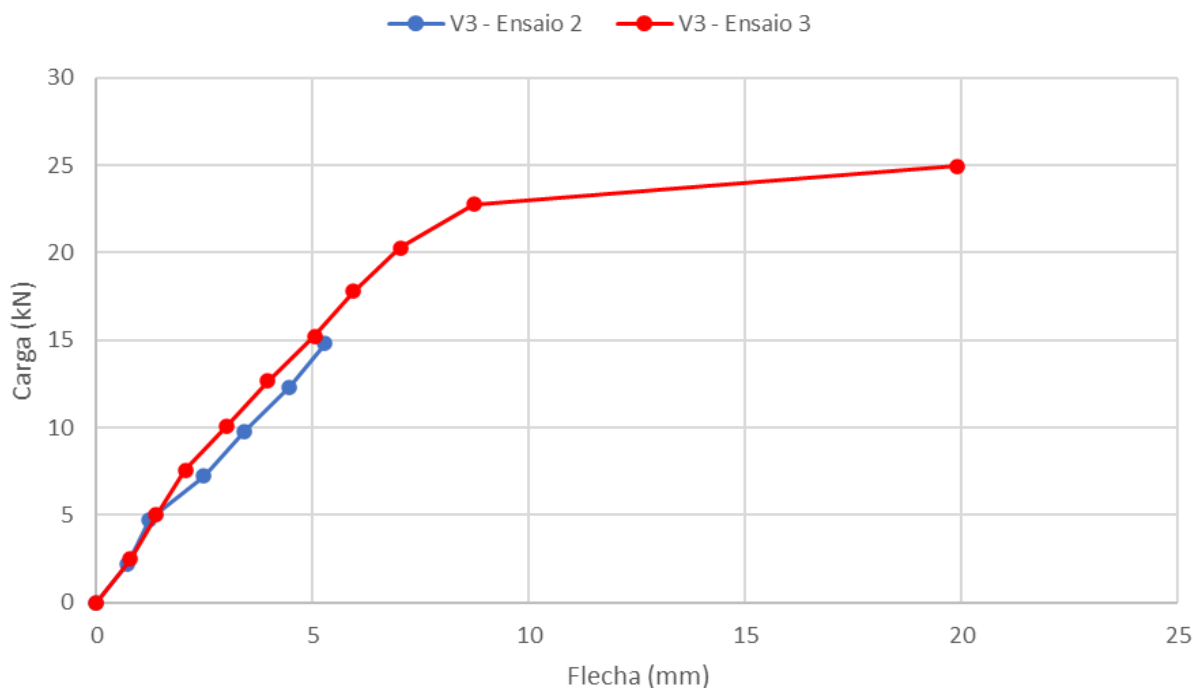


Fonte: O autor

4.3.2.1. Viga V3 – Ensaio 2 x Ensaio 3 e Ensaio 3 x Ensaio 4 – Reforço de CRF

São apresentados na Figura 4.39 os resultados comparativos da viga V3 antes (ensaio 2) e depois (ensaio 3) da aplicação do reforço de CRF. Ressalta-se que no ensaio 2 foram realizados seis ciclos de carga e descarga, contra dez ciclos do ensaio 3.

Figura 4.39: Carga x Flecha comparativo ensaio 2 x ensaio 3 (V3 – 1º Lote de vigas)

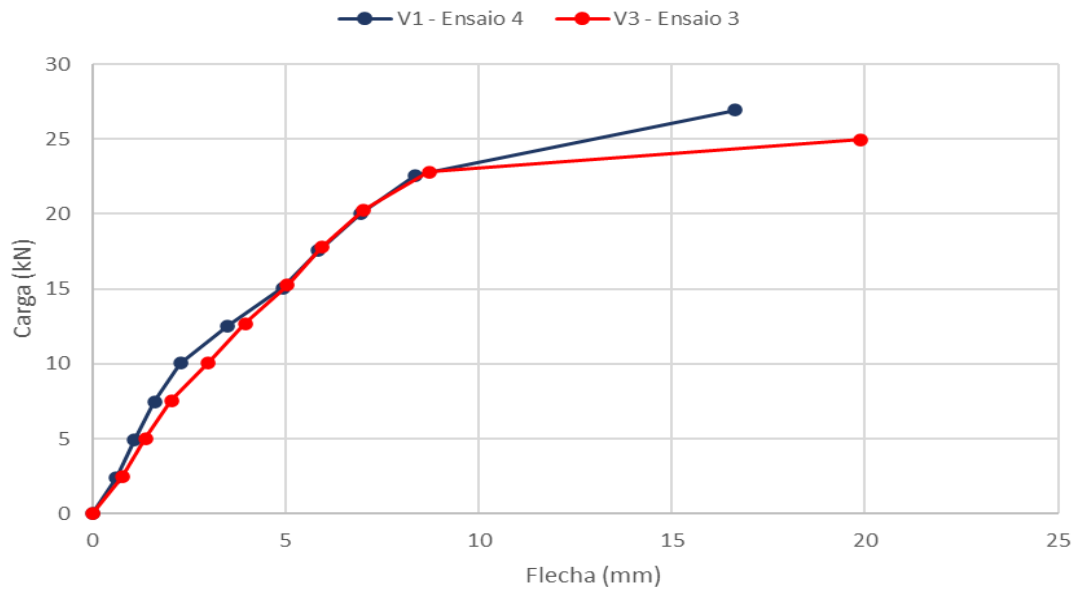


Fonte: O autor

Nota-se pela Figura 4.39 que houve uma pequena queda na rigidez no terceiro ciclo da viga sem reforço (ensaio 2). Em contrapartida, o elemento reforçado manteve sua rigidez praticamente constante até o oitavo ciclo. Até o sexto ciclo, percebe-se que houve uma diferença na deformação do elemento para um mesmo carregamento, com uma flecha de 5,29 mm no ensaio 2 e 5,05 mm no ensaio 3, uma redução de 4,5%.

Na Figura 4.40 são comparados os resultados dos ensaios 3 da viga V3 com o ensaio 4 da viga V1. Percebe-se que a viga V1 apresentou uma maior rigidez até o quinto ciclo, e ao final, no último ciclo. Devido à sollicitação ao ELS da viga V3 antes da aplicação do reforço, era esperado que V3 apresentasse uma rigidez inferior a V1. Ao final dos ensaios, a viga V1 apresentou uma flecha 16,3% menor que a viga V3, sendo 16,65 mm e 19,89 mm, respectivamente.

Figura 4.40: Carga x Flecha comparativo ensaio 3 x ensaio 4 (V3 x V1 – 1º Lote de vigas)

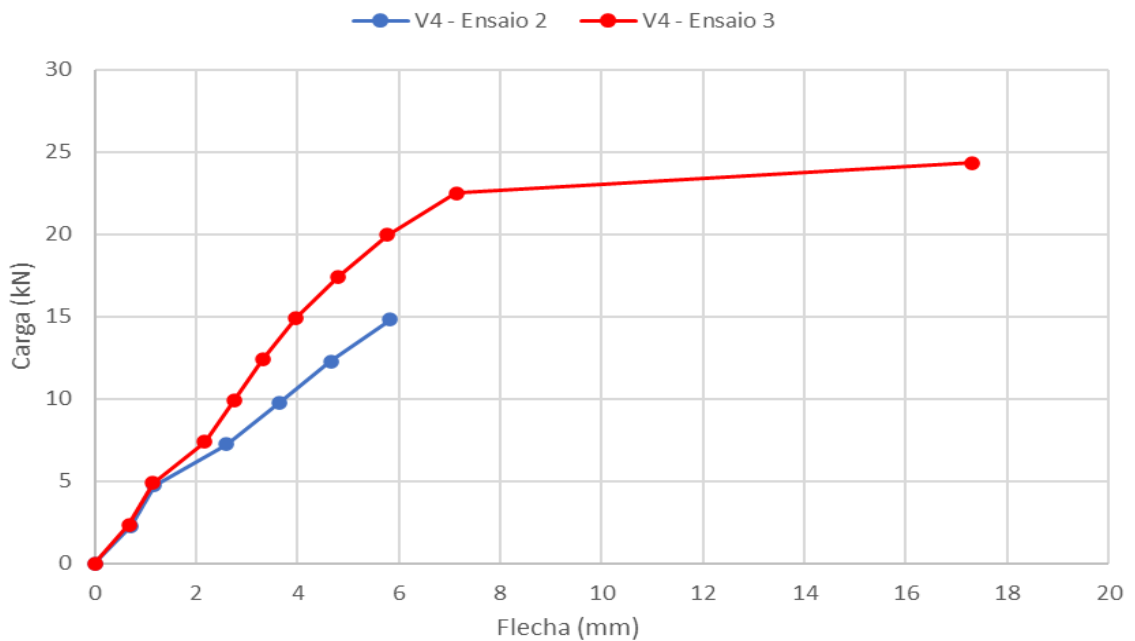


Fonte: O autor

4.3.2.2. V4 – Ensaio 2 x Ensaio 3 e Ensaio 3 x Ensaio 4 – Reforço de CPR

Os resultados comparativos dos ensaios 2 e 3 da viga V4, solicitada ao ELS e posteriormente reforçada com CPR, estão demonstrados na Figura 4.41.

Figura 4.41: Carga x Flecha comparativo ensaio 2 x ensaio 3 (V4 – 1º Lote de vigas)

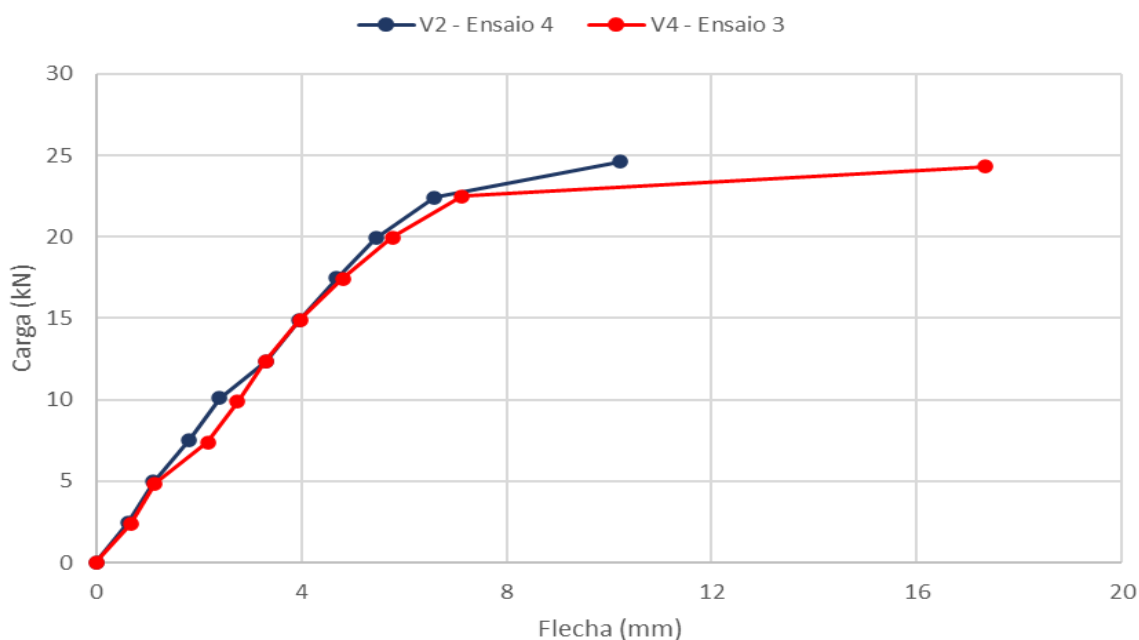


Fonte: O autor

Observa-se pelo gráfico da Figura 4.40 que houve um aumento da rigidez do elemento a partir do segundo ciclo do carregamento. Após o sexto ciclo, a viga V4 apresentou uma flecha de 3,98 mm no ensaio 3 e 5,83 mm no ensaio 2, uma redução de 31,7%.

São apresentados na Figura 4.42 os resultados dos ensaios 3 e 4 das vigas V4 e V2, respectivamente. Nota-se que a rigidez da viga V2 é maior que a da viga V4, conforme esperado, durante os ciclos 3 e 5, e ciclos 8 a 10. Ao final do procedimento, a viga V2 apresentou flecha de 10,21 mm e a viga V4 flecha de 17,32 mm, uma redução da viga íntegra para a previamente solicitada de 41,1%.

Figura 4.42: Carga x Flecha comparativo ensaio 3 x ensaio 4 (V4 x V2 – 1º Lote de vigas)

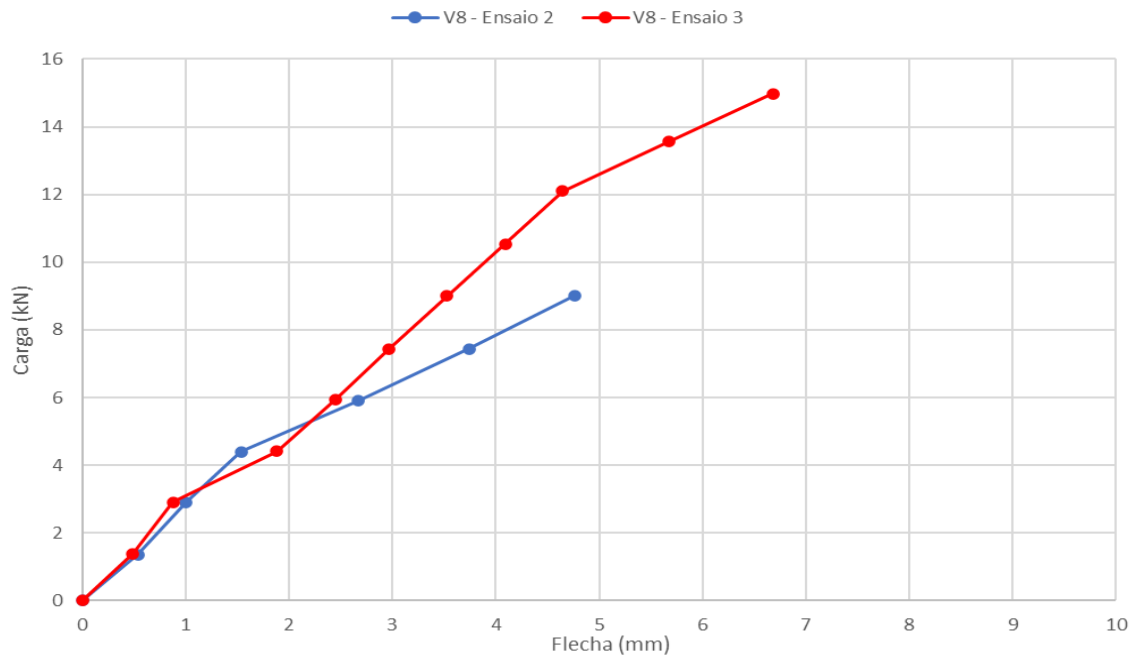


Fonte: O autor

4.3.2.3. V8 – Ensaio 2 x Ensaio 3 e Ensaio 3 x Ensaio 4 – Reforço de CPR

Na Figura 4.43 estão apresentados os resultados dos ensaios 2 e 3 da viga V8. Pode-se perceber um aumento da rigidez no elemento reforçado com CPR a partir do quarto ciclo de carregamento. Assim, ao final dos seis primeiros ciclos, pode-se notar a diferença da deformação entre os modelos, com uma flecha de 3,53 mm no ensaio 3 e 4,76 mm para o ensaio 2, uma redução de 25,8%. Ressalta-se que para o ensaio 3 da viga V8, os dados do sexto ciclo de carregamento foram perdidos, conforme explicitado no item 4.3.1.3. Com isso, para o traçado da envoltória, foi feita uma média aritmética entre os dados do quinto e sétimo ciclo.

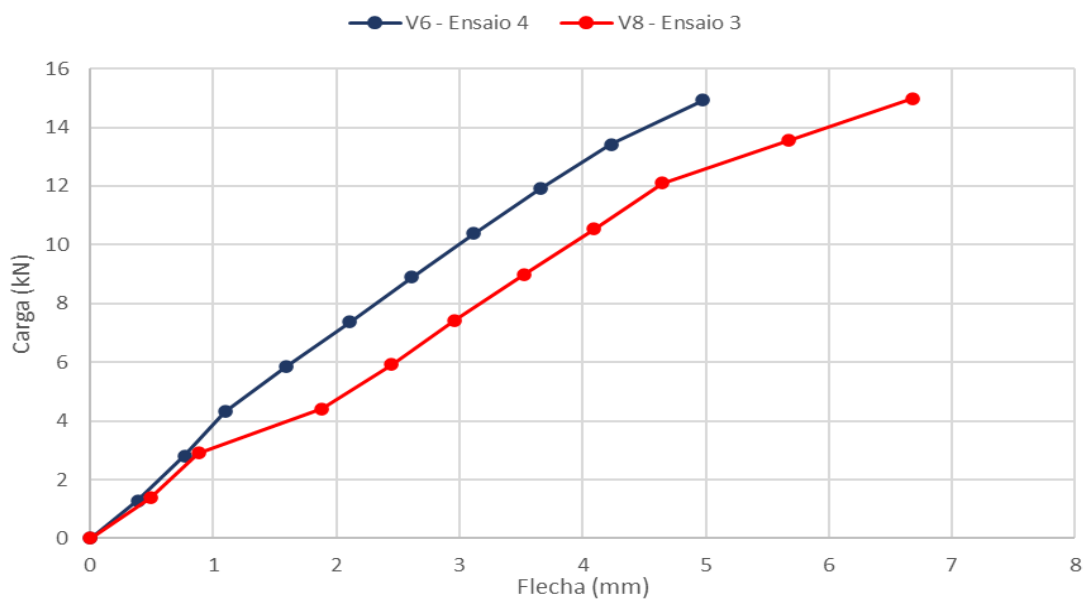
Figura 4.43: Carga x Flecha comparativo ensaio 2 x ensaio 3 (V8 – 2º Lote de vigas)



Fonte: O autor

Os resultados comparativos entre o ensaio 3 (V8) e ensaio 4 (V6) estão evidenciados na Figura 4.44. Nota-se pela inclinação da reta do gráfico uma rigidez maior da viga V6, conforme esperado, principalmente a partir do terceiro ciclo. A flecha após o décimo ciclo foi 25,4% menor para o ensaio 4, sendo de 4,98 mm, contra 6,68 mm do ensaio 3.

Figura 4.44: Carga x Flecha comparativo ensaio 3 x ensaio 4 (V8 x V6 – 2º Lote de vigas)

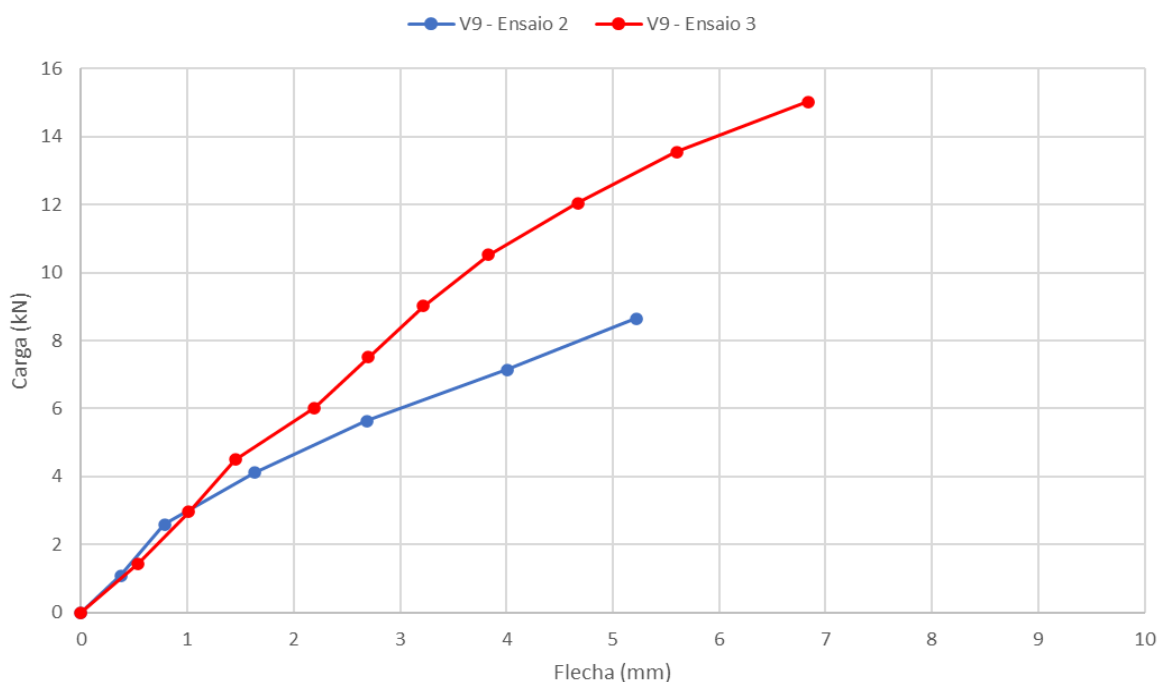


Fonte: O autor

4.3.2.4. V9 – Ensaio 2 x Ensaio 3 e Ensaio 3 x Ensaio 4 – Reforço de CRF

Na Figura 4.45 são apresentados os resultados dos ensaios 2 e 3 da viga V9. Observa-se um aumento da rigidez para a viga reforçada com CRF a partir do terceiro ciclo. Ao final dos seis primeiros ciclos, o modelo apresentou uma flecha de 5,22 mm para o ensaio 2 e de 3,22 mm para o ensaio 3, uma redução de 38,3%.

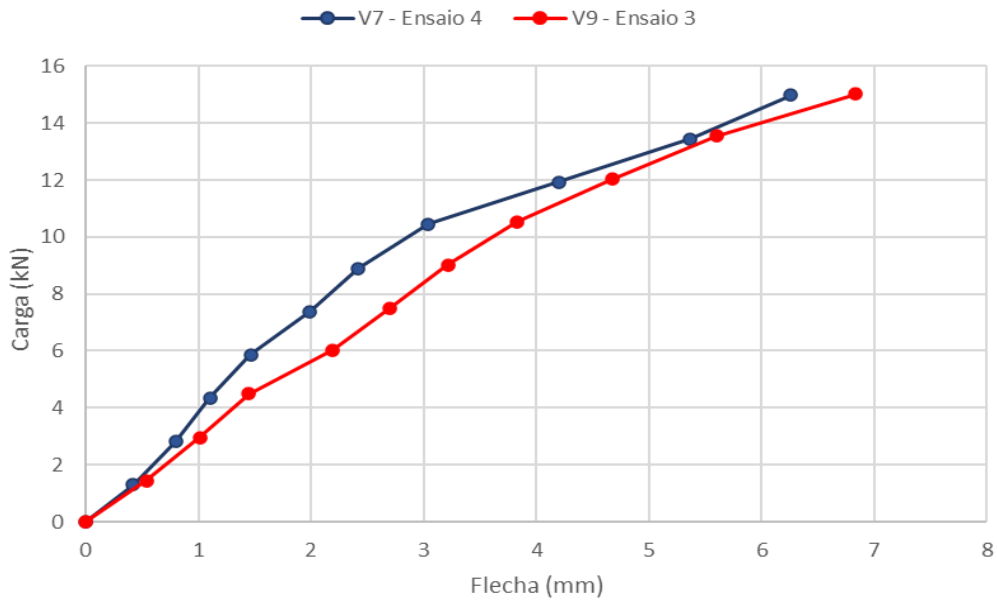
Figura 4.45: Carga x Flecha comparativo ensaio 2 x ensaio 3 (V9 – 2º Lote de vigas)



Fonte: O autor

Os gráficos comparativos entre o ensaio 3 (V9) e ensaio 4 (V7) estão evidenciados na Figura 4.46. Como esperado da viga íntegra V7, ela apresentou uma rigidez maior durante quase todo o procedimento, com uma flecha 8,5% menor após o décimo ciclo, de 6,26 mm, contra a flecha de 6,84 mm do ensaio 3.

Figura 4.46: Carga x Flecha comparativo ensaio 3 x ensaio 4 (V9 x V7 – 2º Lote de vigas)

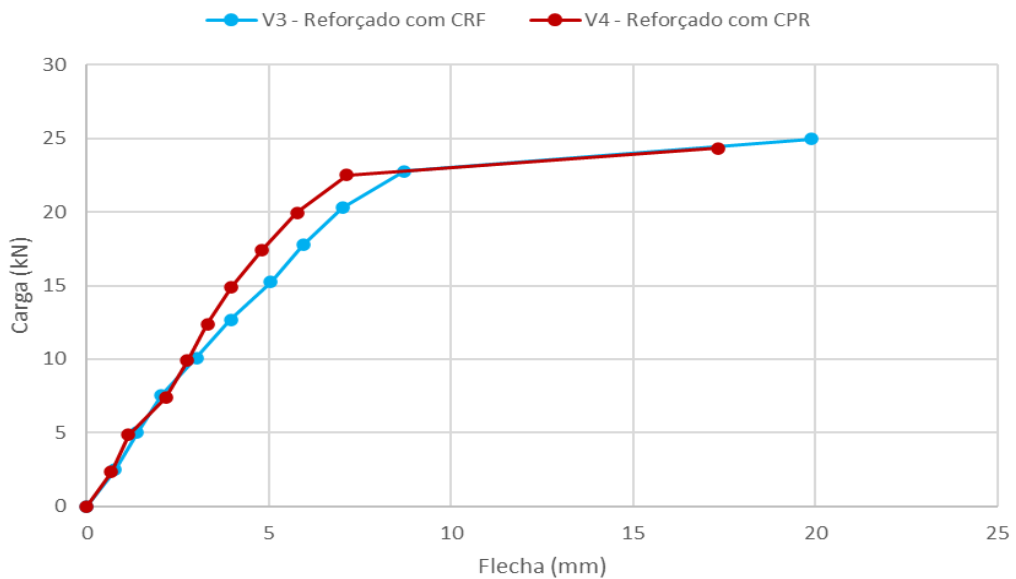


Fonte: O autor

4.3.2.5. Reforço de CPR x Reforço de CRF

São apresentados na Figura 4.47 a seguir os resultados comparativos do ensaio 3 das vigas V3 e V4, reforçadas com CRF e CPR, respectivamente. Percebe-se que há um ganho de rigidez maior na viga V4, principalmente a partir do quinto ciclo. Ao final do procedimento, a flecha obtida da viga reforçada com CPR foi 12,9% menor.

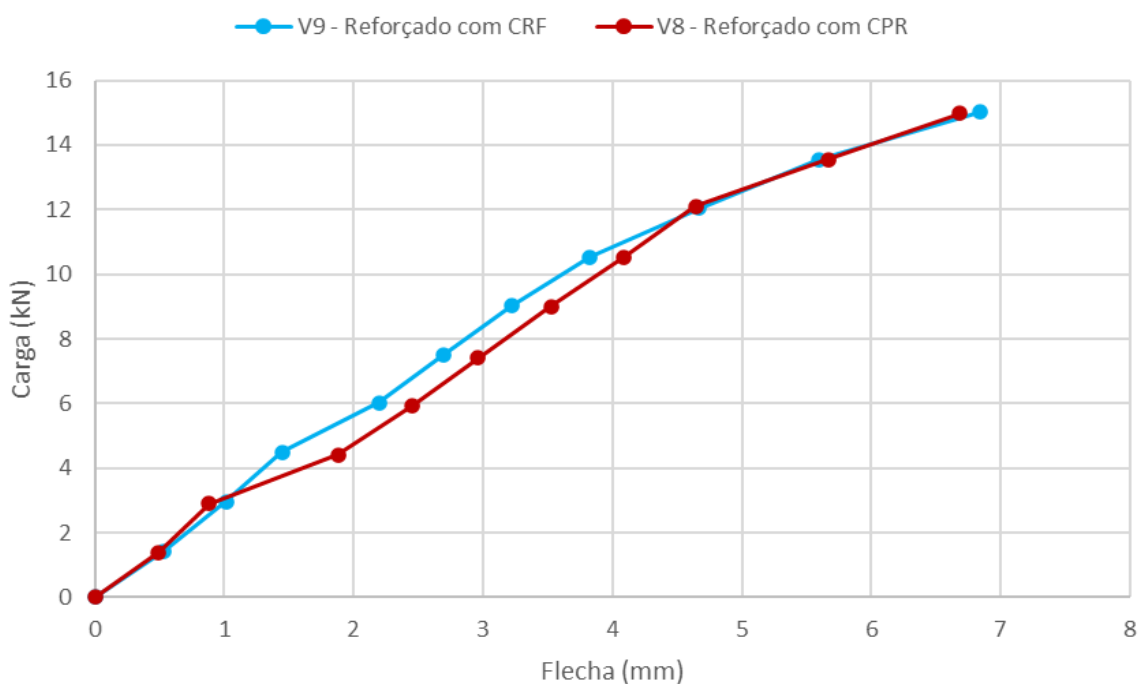
Figura 4.47: Comparativo reforço de CRF x CPR – Ensaio 3 (V3 x V4 - 1º lote de vigas)



Fonte: O autor

Também referente ao ensaio 3, mas do 2º lote de concretagem, os resultados comparativos das vigas V8 e V9, reforçadas com CPR e CRF, respectivamente, são apresentados na Figura 4.48. Nesse caso, a viga reforçada com CPR atingiu uma melhor semelhante à rigidez da viga reforçada com CRF apenas nos dois primeiros e dois últimos ciclos, apresentando uma queda na rigidez no meio do ensaio, como pode ser observado no gráfico da Figura 4.48. Ao final do procedimento, a viga V8 obteve uma flecha 2,3% menor que a viga V9.

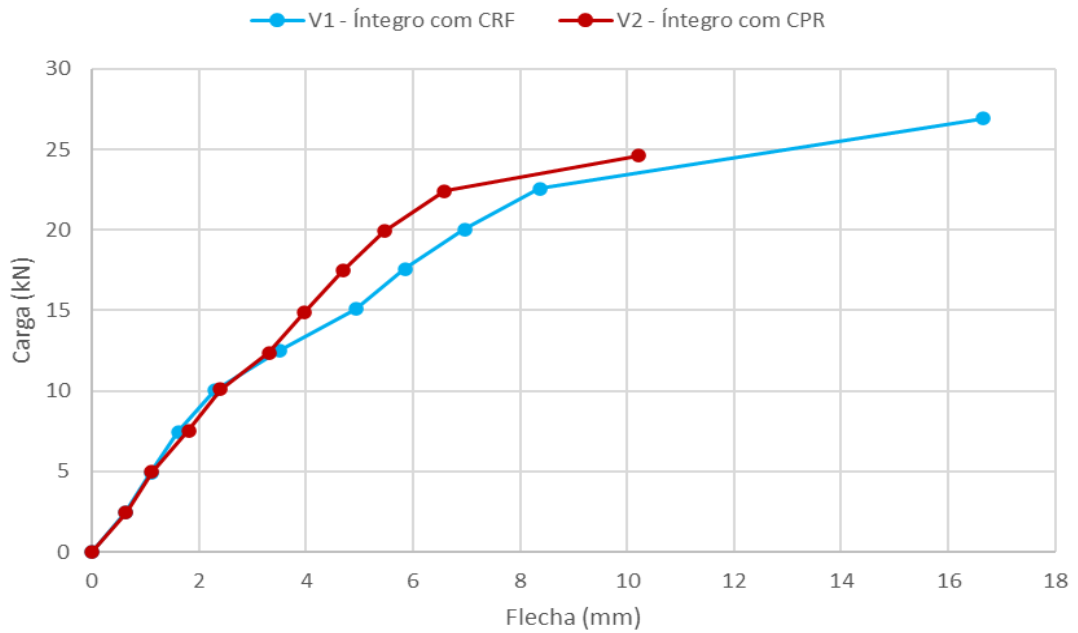
Figura 4.48: Comparativo reforço de CRF x CPR – Ensaio 3 (V9 x V8 – 2º lote de vigas)



Fonte: O autor

Na Figura 4.49 são evidenciados os gráficos comparativos entre os reforços aplicados nas vigas íntegras, referentes ao ensaio 4, sendo a viga V1 com CRF e V2 com CPR. Percebe-se que, nesse caso, houve um ganho de rigidez na viga V2 a partir do sexto ciclo, finalizando o ensaio com uma flecha 38,7% menor em relação a V1.

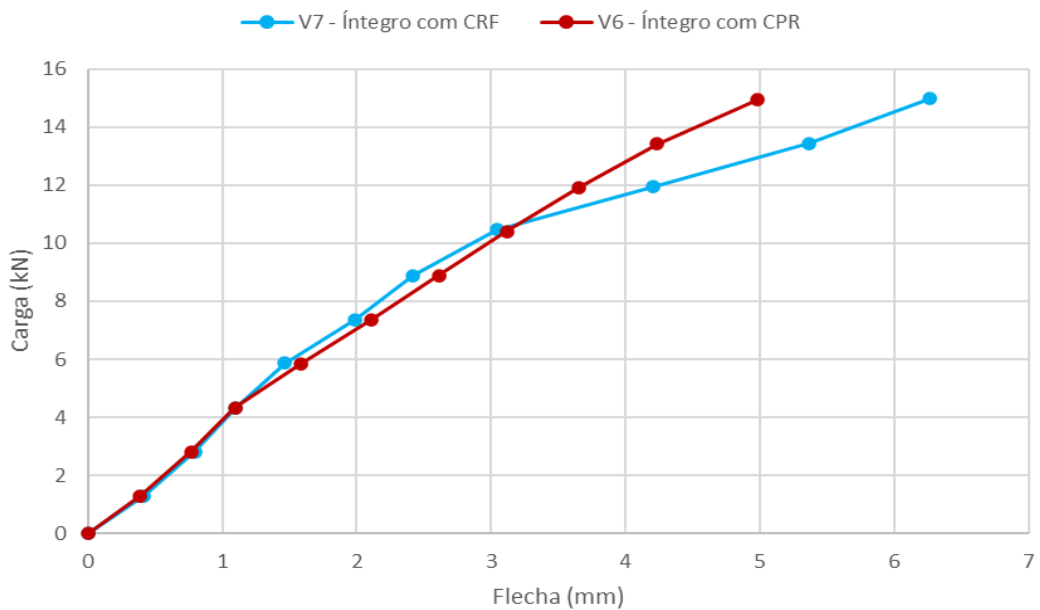
Figura 4.49: Comparativo reforço de CRF x CPR – Ensaio 4 (V1 x V2 - 1º lote de vigas)



Fonte: O autor

Os resultados do ensaio 4 das vigas V6 e V7, reforçadas respectivamente com CPR e CRF, são exibidos na Figura 4.50. Nota-se pelos gráficos que os modelos apresentaram um valor próximo de rigidez até o sétimo ciclo, quando houve uma queda da rigidez da viga V7. Após o final do procedimento, a viga reforçada com CPR apresentou uma flecha 20,4% menor.

Figura 4.50: Comparativo reforço de CRF x CPR – Ensaio 4 (V7 x V6 - 2º lote de vigas)



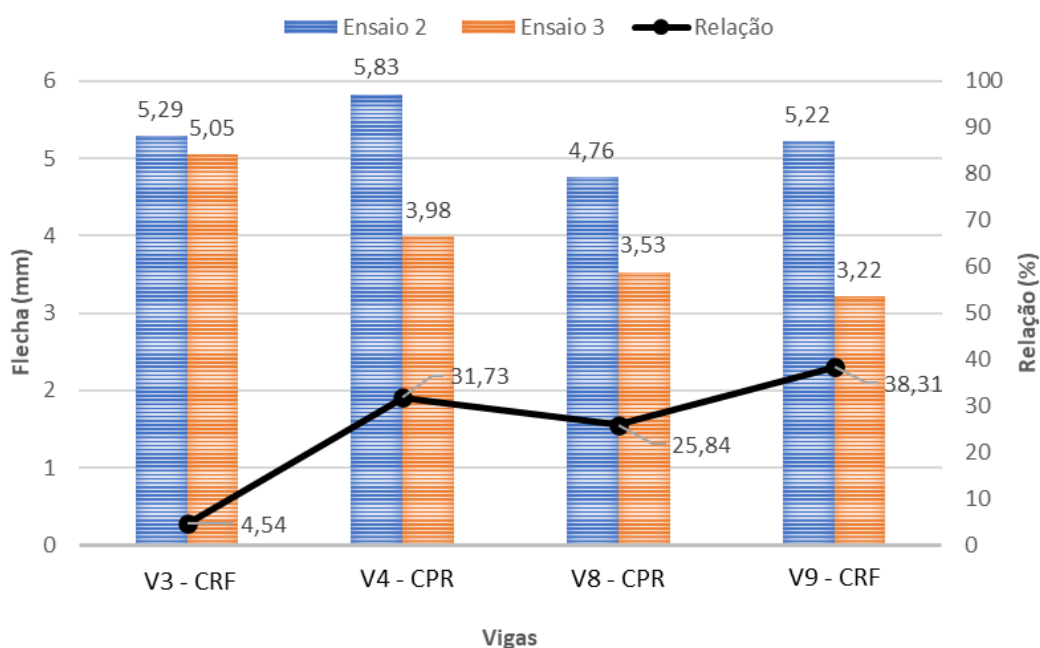
Fonte: O autor

4.3.3. Discussão dos resultados

Com base nos resultados apresentados pelos diagramas carga-flecha no item 4.3.2., ficou evidenciado uma melhora de rigidez nos elementos reforçados, em comparação com os ensaios até o ELS (Figura 4.39, Figura 4.41, Figura 4.43 e Figura 4.45). Nos casos das vigas reforçadas com CPR (Figura 4.41 e Figura 4.43), observou-se um ganho de rigidez em certo ponto do carregamento, enquanto que nas vigas reforçadas com CRF, percebeu-se que houve uma constância maior durante o procedimento (Figura 4.39 e Figura 4.45). Notou-se uma queda na rigidez durante o ensaio 3 apenas após o oitavo ciclo, com uma acentuação no último ciclo para as vigas do primeiro lote (Figura 4.39 e Figura 4.41).

Ao final do procedimento, todas as vigas reforçadas sofreram uma redução na flecha no meio do vão, conforme indicado no gráfico de barras da Figura 4.51 e detalhado no item 4.3.2. O eixo vertical esquerdo se refere às flechas obtidas nos ensaios 2 e 3, representadas pelas barras. O eixo direito, expresso pelas linhas, diz respeito a relação de redução entre as flechas.

Figura 4.51: Relação das flechas entre os ensaios 2 e 3



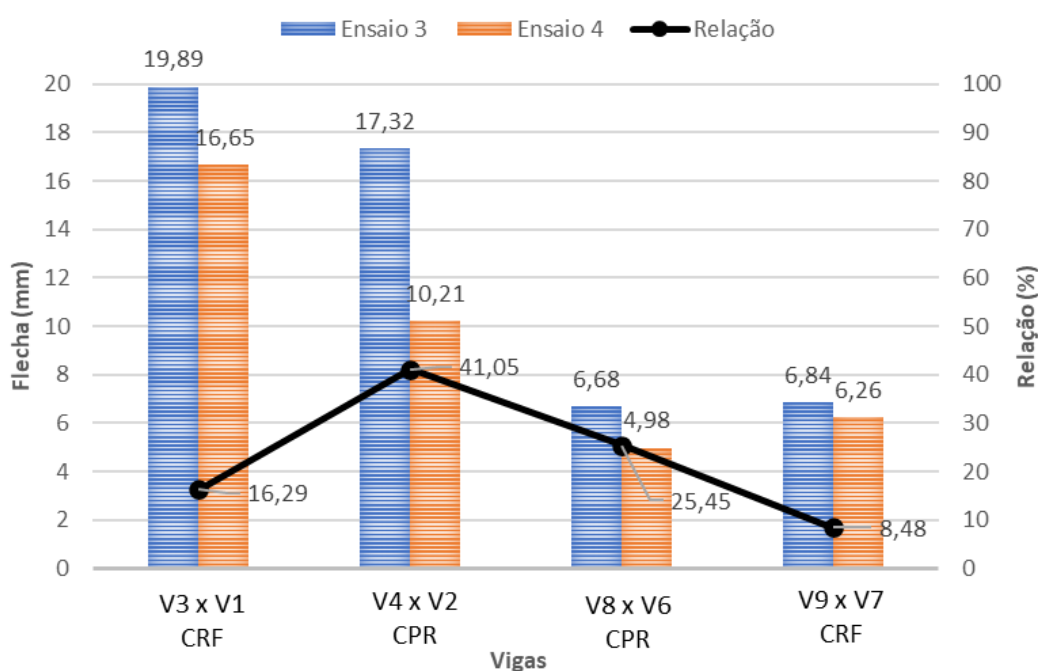
Fonte: O autor

Em relação à comparação entre os elementos reforçados de forma íntegra e após a solicitação ao ELS (Figura 4.40, Figura 4.42, Figura 4.44 e Figura 4.46), houveram algumas particularidades de acordo com o lote de concretagem da viga. As vigas íntegras do primeiro lote apresentaram uma rigidez maior apenas no início e no final do carregamento do ensaio 4

(Figura 4.40 e Figura 4.42), enquanto que para as vigas do segundo lote (Figura 4.44 e Figura 4.46), isso foi evidente durante todo o carregamento, especialmente para o reforço de CPR. Porém, de maneira geral, todos exibiram resultados similares, com a viga íntegra obtendo maior rigidez, conforme esperado.

Na Figura 4.52 são demonstradas as relações entre as flechas dos ensaios 3 e 4 por meio de gráficos de barras (eixo esquerdo) e de linhas (eixo direito). Em todos os casos a flecha no meio do vão foi menor para a viga íntegra reforçada (ensaio 4).

Figura 4.52: Relação das flechas entre os ensaios 3 e 4



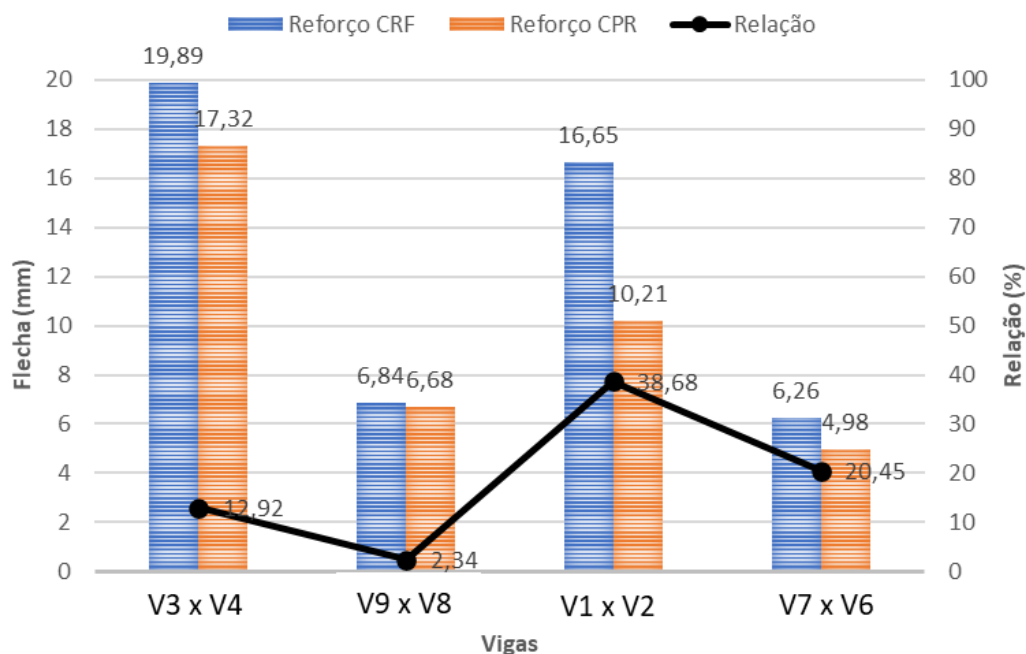
Fonte: O autor

Comparando-se os resultados gerais entre o reforço de CPR e o reforço de CRF (Figura 4.47, Figura 4.48, Figura 4.49 e Figura 4.50), pode-se notar que os elementos reforçados com CPR apresentaram maior rigidez em cargas mais elevadas. No início do carregamento, os dois tipos de reforço apresentaram valores de rigidez similares. Houve uma diferença no comportamento para o comparativo do ensaio 3 do segundo lote (Figura 4.48), onde o reforço de CPR demonstrou uma queda na rigidez durante o terceiro ciclo, recuperando após o oitavo e se equiparando novamente à rigidez do reforço de CRF.

Os paralelos entre as flechas dos reforços, de acordo com o ensaio e com o lote de concretagem, estão evidenciados no gráfico de barras (eixo esquerdo) e de linhas (eixo direito) da Figura 4.53.

Em todos os casos, as vigas reforçadas com CPR apresentaram uma flecha menor no meio do vão. A tabela com os dados comparativos das flechas dos ensaios está apresentada no Apêndice A.

Figura 4.53: Relação de flechas reforço de CRF x CPR



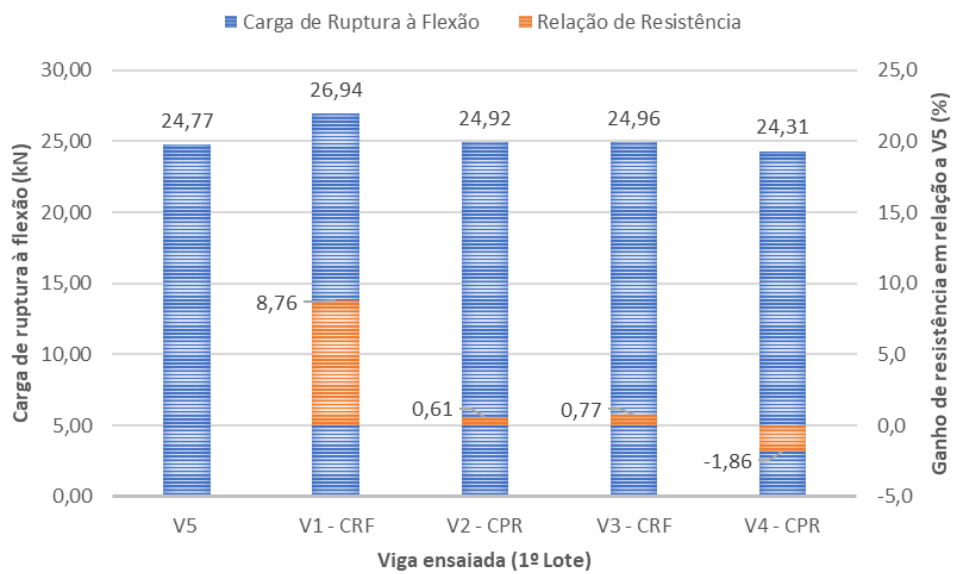
Fonte: O autor

No tocante ao ganho de resistência das vigas reforçadas, observou-se comportamentos distintos em relação ao lote de concretagem. Para o primeiro lote, que obteve uma viga sem reforço mais resistente para o ensaio 1, as vigas reforçadas apenas recuperaram a resistência original do elemento, com um ganho de resistência de 0,77% para a viga V3 e uma queda da carga última de -1,86% para a viga V4. Até mesmo as vigas íntegras reforçadas, referente ao ensaio 4, apresentaram um pequeno ganho de resistência, de 8,76% para a viga V1 e 0,61% para a viga V2. Para ambos os ensaios 3 e 4, as vigas do primeiro lote reforçadas com CRF alcançaram resistência à flexão maiores que as vigas com CPR. Esses resultados são mostrados no gráfico de barras da Figura 4.54. O eixo vertical esquerdo se refere à carga de ruptura à flexão das vigas, enquanto o eixo vertical esquerdo diz respeito à relação do ganho de resistência da respectiva viga em relação à viga V5 (ensaio 1).

Por outro lado, as vigas referentes ao segundo lote de concretagem apresentaram um bom ganho de resistência, conforme exibido na Figura 4.55. Da mesma maneira, o eixo esquerdo do gráfico é relativo à carga de ruptura e o direito à relação do ganho de resistência com base na viga V10

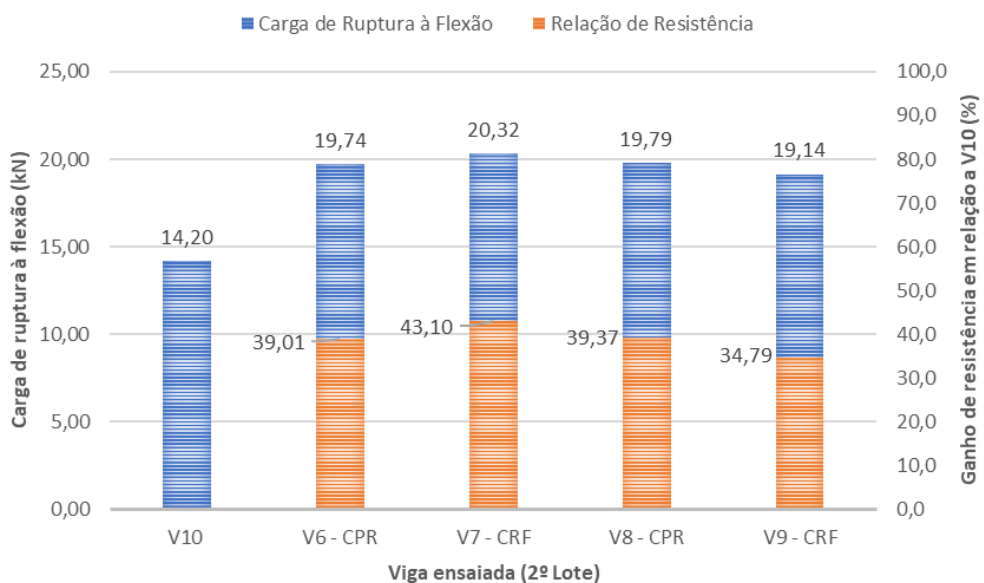
(ensaio 1). Para as vigas do ensaio 3, além de recuperarem a resistência inicial, as vigas V8 e V9 obtiveram um ganho de carga de 39,37% e 34,79%, respectivamente, sendo maior para o reforço de CPR. No caso das vigas do ensaio 4, o desempenho foi inverso, a viga V7, reforçada com CRF, apresentou um ganho de carga de 43,10%, enquanto a viga V6 (reforçada com CPR), um ganho de 39,01%. A tabela com os dados da carga de ruptura das vigas está situada no Apêndice A.

Figura 4.54: Cargas de ruptura e ganhos de resistência vigas reforçadas 1º lote de concretagem



Fonte: O autor

Figura 4.55: Cargas de ruptura e ganhos de resistência vigas reforçadas 2º lote de concretagem



Fonte: O autor

Em outros estudos sobre a utilização do CPR como reforço de elementos estruturais, o mesmo comportamento do gráfico, exibindo um ganho de rigidez acentuado, acompanhado de um aumento da resistência original, foi observado em Al-Osta *et al.* (2017), Karthik e Sundaravadivelu (2017), Deng *et al.* (2018) e Hadi *et al.* (2018). Desses, os três primeiros realizaram ensaios reforçando vigas de concreto armado, enquanto o último estudo utilizou pilares reforçados como modelo experimental.

Diferentes técnicas de reforço e recuperação de elementos estruturais foram analisadas, obtendo resultados satisfatórios para a utilização do CPR para esse propósito. Al-Osta *et al.* (2017) alcançou ganhos de resistência desde 7,1% a 88,6%. Karthik e Sundaravadivelu (2017) obtiveram ganhos de 4,1% a 22,9%, porém, um de seus resultados também não apresentou aumento de desempenho, alcançando uma carga máxima 4,0% menor que a viga controle, como no caso da viga V4 do presente trabalho. No estudo de Deng *et al.* (2018), houve amostras com pequenos ganhos de carga, de 0,97% a 7,2%, outros com ganhos entre 22,9% a 45,0%, e até mesmo modelos com aumento de resistência de 86,2% e 170,8% em relação a amostra controle. Já Hadi *et al.* (2018) obtiveram em seus experimentos a um ganho de resistência na flexão a quatro pontos dos pilares de 89%.

Em vista desses resultados, é válido concluir a efetividade do CPR como material de reparo de vigas, uma vez que os modelos experimentais recuperaram, pelo menos, sua resistência inicial. Além disso, modelos estudados apresentaram ganhos de resistência compatíveis com as pesquisas supracitadas, corroborando a premissa da viabilidade da utilização do CPR como reforço de elementos estruturais.

Outro ponto a se destacar foi a redução das flechas no centro do vão das vigas reforçadas com CPR, também observado por Al-Osta *et al.* (2017), Deng *et al.* (2018) e Hadi *et al.* (2018). Uma vez que se aumente a rigidez do elemento, espera-se que sua flecha máxima diminua. Dessa forma, há uma redução na ductilidade das vigas reforçadas com CPR, contribuindo para uma ruptura frágil do elemento. Dependendo da ocasião, procura-se dimensionar elementos estruturais com modo de ruptura dúctil, com o objetivo de se “alertar” os ocupantes que aquela estrutura está sobrecarregada. Sendo assim, em determinada situação, esse tipo de reforço pode não ser o mais adequado.

No que diz respeito ao comportamento das vigas, descrito no item 4.3.1., os elementos solicitados ao ELU (ensaio 1) apresentaram resistências à flexão e modos de rupturas distintos.

A viga V5, pertencente ao primeiro lote de concretagem, obteve uma resistência maior e ruptura por compressão do concreto (Figura 4.10), característica de uma viga superarmada. Enquanto isso, a viga V10 (segundo lote) alcançou uma resistência menor e exibiu uma ruptura por escoamento da armadura tracionada (Figura 4.12), típico de vigas subarmadas.

As vigas solicitadas ao Estado Limite de Serviço (ensaio 2) manifestaram comportamentos similares durante o procedimento. Dos quatro elementos ensaiados, em três a abertura de fissuras ocorreu ao longo do terceiro ciclo de carregamento, sendo apenas na viga V8 no quarto ciclo. Além disso, em todas elas o surgimento da primeira fissura sucedeu próximo ao ponto de aplicação da carga, se tornando ao final do ensaio a fissura de maior abertura e maior profundidade. O padrão de fissuração das vigas também foi similar, com aberturas aproximadamente simétricas em relação ao centro da viga, dentro da região de flexão pura (Figura 4.14, Figura 4.16 e Figura 4.18), com exceção da viga V9, que apresentou uma fissura fora dessa região (Figura 4.20).

Com relação às vigas reforçadas após a solicitação ao ELS (ensaio 3), os elementos reforçados com CPR exibiram as primeiras fissuras durante o terceiro ciclo, enquanto os reforçados com CRF durante o quarto ciclo. No entanto, o reforço de CPR se manteve íntegro durante todo o procedimento, ao contrário do reforço de CRF, que apresentou fissuras no decorrer do carregamento (Figura 4.22.b). Sobre o modo de ruptura, apenas a viga V9 colapsou por compressão do concreto (Figura 4.29.b), as demais romperam por escoamento da armadura tracionada, na interface do reforço com a viga (Figura 4.22.c, Figura 4.24.b e Figura 4.27.b), próximo ao ponto de aplicação de carga e adjacente ao limite da zona reforçada.

Sobre o ensaio 4, com as vigas íntegras reforçadas, apesar de apresentarem aberturas de fissuras em ciclos distintos, todas colapsaram na mesma região por escoamento da armadura tracionada. Assim como no ensaio 3, o reforço de CPR não sofreu nenhum tipo de dano, na medida que o reforço de CRF fissurou no centro do vão (Figura 4.31.b). As maiores fissuras, seguidas de ruptura, também ocorreram na interface entre o reforço e a viga (Figura 4.33, Figura 4.35 e Figura 4.37).

A região de colapso dos ensaios 3 e 4 era algo esperado, pois a zona de transição entre o reforço e o concreto base é a zona mais vulnerável entre dois concretos incorporados com idades distintas (SOUZA, 1990; LEMES, 2019). Especialmente no caso do presente trabalho, pois não foi realizado nenhum tipo de tratamento da superfície a ser reforçada para aumentar o atrito e a

adesão entre os concretos, justamente para avaliar até que ponto a aderência entre eles resistiria ao carregamento solicitado. Além disso, a região de flexão simples de uma viga fletida à quatro pontos possui força cortante máxima e ainda resiste a um valor de momento fletor, mesmo que decrescente, conforme DEC e DMF indicados na Figura 3.10.

Percebe-se que a maioria dos modelos experimentais apresentaram abertura de fissuras no terceiro ciclo de carregamento, até mesmo as vigas reforçadas com CPR, ou seja, entre 20% e 30% da carga última da viga. Essa faixa de carga coincide com os experimentos de Sarzam e Mohammed (2014), no qual testaram vigas de concreto convencional reforçadas com camadas de CPR, tanto na tração quanto na compressão, variando a altura da camada.

No entanto, de acordo com Al-Osta *et al.* (2017) e Deng *et al.* (2018), o reforço de CPR deveria atrasar o início de fissuração da viga, devido à sua maior resistência à tração que o concreto convencional. De certa forma, isso foi observado nos ensaios, pois o reforço de CPR se manteve íntegro durante todo o carregamento. Portanto, o fato de a viga reforçada, apresentar início de fissuração, em uma faixa de carregamento semelhante ao da viga sem reforço, indica um deslocamento da camada de CPR.

Outra razão que aponta para esse cenário é o fato de as vigas reforçadas terem apresentado ruptura por escoamento da armadura. Segundo Al-Osta *et al.* (2017), esse tipo de reforço na zona tracionada deveria promover características de uma viga superarmada. Em outras palavras, caso a camada de CPR estivesse 100% aderida ao substrato de concreto convencional, o colapso poderia ter ocorrido por esmagamento do concreto na região de compressão. Por esse mesmo motivo, Sarzam e Mohammed (2014) e Deng *et al.* (2018) também indicam a utilização do reforço de CPR na zona comprimida da viga, proporcionando maior ductilidade ao elemento e garantindo uma ruptura por escoamento da armadura.

Ainda assim, apesar da boa aderência entre o CPR e o concreto convencional, o descolamento da camada de CPR é um caso usual de se ocorrer, gerando inclusive falhas no substrato do concreto convencional, conforme observado por Al-Osta *et al.* (2017), Deng *et al.* (2018) e Salim *et al.* (2019). A causa do deslocamento do CPR, principalmente em cargas mais elevadas, se deve ao fato desse material compósito apresentar uma deformação diferente do concreto convencional da viga, conforme constatado por Lemes (2019) e demonstrado na Figura 2.20.

Esse aspecto também pode ser corroborado pelo fato das vigas reforçadas com CRF terem alcançado resistência à flexão semelhante, ou até superior, às vigas reforçadas com CPR. Além disso, estas também foram capazes de atrasar a abertura de fissuras para ciclos de carregamento mais elevados. Isso ocorreu devido à melhor aderência do CRF ao concreto convencional, pelo simples fato dos dois compósitos deformarem de forma similar, pois as misturas de concreto dos dois materiais possuem o mesmo traço, com o CRF apenas incorporando as fibras de aço.

Isto posto, apesar das considerações sobre a perda da aderência do CPR e modos de ruptura no substrato do concreto convencional dos modelos experimentais, conclui-se que o CPR é um bom material para ser utilizado como reforço de elementos estruturais. Entretanto, para ser possível trabalhar com todo seu potencial de resistência, é necessário realizar uma melhor preparação da superfície a que o material será aplicado. Além disso, de acordo com a sua possível utilização, é válido utilizar o CPR na zona comprimida da viga, quando se tiver o objetivo de aumentar o desempenho e a ductilidade simultaneamente.

Outro ponto pertinente a ser ressaltado é o tipo de reforço a ser aplicado. No presente estudo, optou-se por utilizar um encamisamento apenas na região de flexão pura da viga. Contudo, esse não se mostrou ser o método mais adequado, pois o colapso de 87,5% dos modelos experimentais se deu na região adjacente a camada de reforço, zona de cortante máximo somado a um momento fletor, ainda que decrescente. Dessa forma, entende-se que um método mais adequado para melhorar a resistência à flexão seria a utilização de um reforço em toda zona tracionada da viga, incluindo as laterais da viga.

5.1. Considerações finais

No presente trabalho, foi avaliado o desempenho de um reforço de Concreto de Pós Reativos incorporado com fibras de aço de pontas enganchadas, projetado para trabalhar apenas na região onde predominam os esforços de flexão de uma viga. Previamente a esse estudo, foram realizados ensaios de flexão com corpos de prova prismáticos de CPR, alterando-se a dosagem de fibras em 0-6-10-14% sobre a massa de cimento. Com os resultados obtidos, foi possível inferir as seguintes conclusões:

- ✓ O aumento da dosagem das fibras de aço estudadas (pontas enganchadas e comprimento de 30 mm) não influenciou na resistência à flexão do CPR ao nível de significância de 5%;
- ✓ A incorporação das fibras de aço no CPR contribuiu para o aumento da ductilidade do compósito, isto é, evitou a ruptura brusca do material. Esse comportamento foi observado, principalmente, no período pós-pico do carregamento, em que após alcançar sua resistência máxima, o elemento permaneceu íntegro, prolongando sua deformação e suportando solicitações menores de carga. O CPR sem a adição de fibras apresentou uma ruptura frágil e explosiva;
- ✓ A aplicação do reforço de CPR na viga previamente solicitada ao ELS aumentou a rigidez dos elementos estudados, evidenciado pela inclinação da reta no diagrama carga x flecha, principalmente entre 30% e 80% da carga última esperada;
- ✓ Para carregamentos muito elevados, acima de 80% da carga última, houve um deslocamento do reforço de CPR, indicado pela mudança na rigidez do elemento, pelo padrão de fissuração e pela ruptura por escoamento da armadura tracionada. Isso

ocorreu pelo fato de o CPR e o Concreto Convencional apresentarem deformações diferentes, principalmente em solicitações de carga mais altas;

- ✓ A utilização do reforço de CPR reduziu a ductilidade do elemento reforçado, uma vez que diminuiu a flecha no centro do vão durante o carregamento. Esse comportamento contribui para uma ruptura brusca da viga;
- ✓ O uso do CPR como material de reparo e reforço de vigas de concreto armado convencional danificadas foi considerado eficaz. No caso das vigas de classe C30, o material foi capaz de, no mínimo, recuperar a resistência inicial do elemento, atuando, então, como um reparo da estrutura. Já para as vigas de classe C20, foi observado um ganho de resistência à flexão de 39,4%, trabalhando, assim, como reforço;
- ✓ Apesar da boa aderência entre o CPR e o CC, para casos em que seja necessário um ganho de resistência muito alto para o elemento a ser reforçado, é preciso uma preparação mais elaborada da superfície a ser reforçada;

Diante disso, considera-se que os objetivos do trabalho foram alcançados, visto que foi possível inferir conclusões satisfatórias a respeito do desempenho do Concreto de Pós Reativos como reforço de vigas, conceituando sua eficácia e identificando sua vulnerabilidade.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Durante o desenvolvimento deste trabalho, algumas questões foram ponderadas e discutidas. Nesse contexto, existem temas que merecem ser abordados em trabalhos futuros, tais como:

- alterar o modelo de encamisamento de CPR para toda a região tracionada da viga, realizando uma preparação mais elaborada da superfície a ser reforçada, com o objetivo de se evitar o deslocamento da camada de reforço;
- preparar modelos experimentais variando a espessura da camada de reforço de CPR, seja o reforço na zona de tração ou na zona de compressão;
- desenvolver um modelo numérico de elementos finitos que seja capaz de representar o comportamento de vigas reforçadas com CPR e comparar os resultados deste e de outros trabalhos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBAS, Safeer; SOLIMAN, Ahmed M.; NEHDI, Moncef L. Exploring mechanical and durability properties of ultra-high-performance concrete incorporating various steel fiber lengths and dosages. **Construction and Building Materials**, v. 75, p. 429-441, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

_____. **NBR 7215** – Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

_____. **NBR 7515** – Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

_____. **NBR 8522** – Concreto – Determinação do módulo de deformação estática e diagrama tensão-deformação. Rio de Janeiro, ABNT, 2008.

_____. **NBR 11579** – Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

_____. **NBR 11582** – Cimento Portland – Determinação da expansibilidade de Le Chatelier. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

_____. **NBR 15530** – Fibras de aço para concreto – Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

_____. **NBR 16605** – Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

_____. **NBR 16372** – Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

_____. **NBR ISO 6892-1** – Materiais metálicos – Ensaio de tração. Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

_____. **NBR NM 23** – Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

_____. **NBR NM 30** – Agregado miúdo – Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

_____. **NBR NM 43** – Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

_____. **NBR NM 45** – Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

_____. **NBR NM 46** – Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

_____. **NBR NM 52** – Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **NBR NM 65** – Cimento Portland – Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

_____. **NBR NM 248** – Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

ALMEIDA, S. F.. **Análise dinâmica experimental da rigidez de elementos de concreto submetidos à danificação progressiva**. 2005. 193 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

AL-OSTA, M. A. et al. Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with ultra-high performance fiber reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 134, p. 279-296, 2017.

AL-TIKRITE, Ahmed; HADI, Muhammad NS. Mechanical properties of reactive powder concrete containing industrial and waste steel fibres at different ratios under compression. **Construction and Building Materials**, v. 154, p. 1024-1034, 2017.

BETTERMAN, L. R.; OUYANG, C.; SHAH, Surendra P. Fiber-matrix interaction in microfiber-reinforced mortar. **Advanced Cement Based Materials**, v. 2, n. 2, p. 53-61, 1995.

BIZ, C. E. **Concreto de Pós Reativos**. 2001, 101 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

BONNEAU, O. POULIN, C. DUGAT, J. RICHARD, P. AITCIN, P. C. **Reactive powder concretes: from theory to practice**. Concrete International. v. 18, n. 4, p. 47- 49, Apr, 1996.

BONNEAU, O.; VERNET, C.; MORANVILLE, M.; AITCIN, P. C. Characterization of the granular packing and percolation threshold of reactive powder concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 12, p. 1861-1867, 2000.

BRANDT, Andrzej M. **Cement-based composites: materials, mechanical properties and performance**. CRC Press, 2005.

BRANDT, Andrzej M. Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering. **Composite structures**, v. 86, n. 1-3, p. 3-9, 2008.

CHAN, Y. W.; CHU, S. H. Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 7, p. 1167-1172, 2004.

DENG, Mingke et al. Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened by HDC and RPC. **Construction and Building Materials**, v. 188, p. 995-1006, 2018.

DI PRISCO, Marco; PLIZZARI, Giovanni; VANDEWALLE, Lucie. Fibre reinforced concrete: new design perspectives. **Materials and structures**, v. 42, n. 9, p. 1261-1281, 2009.

EMMONS, P. H., VAYSBURD, A. M. **System concept in design and construction of durable concrete repairs**. Construction and Building Materials, V. 10, N° 1, 1996, pp. 69-75.

FORTES, A. S. (2000) **Vigas de concreto armado reforçadas com fibras de carbono**. 246 f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

GUIM, L. F. F.; **Avaliação do comportamento de vigas de concreto armado reforçadas com CFRP, com e sem injeção de fissuras**. 2020. 196 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil – Área de Concentração em Engenharia da Construção – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2020.

GUSMÃO, A. C.; **Utilização do concreto de pós reativos como material de reparo - ênfase na resistência de aderência**. 2017. 167 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2017.

HADI, Muhammad NS et al. Axial and flexural behaviour of circular reinforced concrete columns strengthened with reactive powder concrete jacket and fibre reinforced polymer wrapping. **Construction and Building Materials**, v. 172, p. 717-727, 2018.

HOLSCHEMACHER, K.; MUELLER, T.; RIBAKOV, Y. Effect of steel fibres on mechanical properties of high-strength concrete. **Materials & Design (1980-2015)**, v. 31, n. 5, p. 2604-2615, 2010.

KARTHIK, S.; SUNDARAVADIVELU, Karthik. Retrofitting of reinforced concrete beams using reactive powder concrete (RPC). In: **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. IOP Publishing, 2017. p. 012038.

KATZER, Jacek; DOMSKI, Jacek. Quality and mechanical properties of engineered steel fibres used as reinforcement for concrete. **Construction and Building Materials**, v. 34, p. 243-248, 2012.

LEE, M. G.; WANG, Y. C.; CHIU, C. T. A preliminary study of reactive powder concrete as a new repair material. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 1, p. 182-189, 2007.

LEMES, J. V. B.; **Avaliação da influência da variação do ângulo de inclinação da interface na resistência de aderência do CPR ao substrato de concreto**. 2019. 111 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil – Área de Concentração em Engenharia da Construção – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2019.

LEONHARDT, F.. **Construções de Concreto: Verificação da Capacidade de Utilização**. Rio de Janeiro: Interciência, 1979. V.4, 210p.

LIMA, G. E. S. de; **Avaliação dinâmica do comportamento estrutural de elementos de concreto armado submetidos à degradação da rigidez**. 2017. 169 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil – Área de Concentração em Engenharia da Construção – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2017.

MACHADO, F. G. D.; **Avaliação do concreto de pós reativos utilizando resíduo de granito, dosado pelo método de Andreassen modificado, submetido às curas submersas convencional e térmica.** 2019. 104 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil – Área de Concentração em Engenharia da Construção – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2019.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M.; **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo, Pini. 1994.

NAAMAN, A. E. Strain hardening and deflection hardening fiber reinforced cement composites. In: **Proc. 4th Int. RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites, Ann Arbor, University of Michigan.** 2003. p. 95-113.

OLIVITO, R. S.; ZUCCARELLO, F. A. An experimental study on the tensile strength of steel fiber reinforced concrete. **Composites Part B: Engineering**, v. 41, n. 3, p. 246-255, 2010.

OU, Yu-Chen et al. Compressive behavior of steel-fiber-reinforced concrete with a high reinforcing index. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 24, n. 2, p. 207-215, 2011.

PAES, J. L. R.; **Contribuição ao projeto de elementos pré-fabricados de argamassa armada com ênfase na durabilidade.** 1994. 299 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil - Área de Concentração em Produção Civil, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 1994

PAJAŁ, M.; PONIKIEWSKI, T. Flexural behavior of self-compacting concrete reinforced with different types of steel fibers. **Construction and Building materials**, v. 47, p. 397-408, 2013.

PARK, Taehoon et al. Evaluation of orientation and distribution of steel fibers in high-performance concrete column determined via micro-computed tomography. **Construction and Building Materials**, v. 270, p. 121473, 2021.

PINHEIRO, L. M.. **Fundamentos do concreto e projeto de edifícios.** São Carlos: USP, 2007. 380 p.

RAZA, Syed Safdar et al. Effect of different fibers (steel fibers, glass fibers, and carbon fibers) on mechanical properties of reactive powder concrete. **Structural Concrete**, v. 22, n. 1, p. 334-346, 2021.

RICHARD, P.; CHEYREZY, M. Composition of reactive powder concretes. **Cemente and Concrete Research**, v. 25, n. 7, p. 1501-1511, 1995.

SALIM, Lamyaa Gh; AL-BAGHDADI, Haider M.; MUTEH, Haitham H. Reactive powder concrete with steel, glass and polypropylene fibers as a repair material. **Civ. Eng. J**, v. 5, n. 11, p. 2441-2449, 2019.

SANTANA, L. A. **Estudo da aderência entre concretos de diferentes idades**. 2004, 92 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, 2004.

SARSAM, Kaiss Fouad; MOHAMMED, Mohammed Hashim. Flexural strength of hybrid beams containing reactive powder concrete and conventional concrete. **Journal of Engineering and Sustainable Development**, v. 18, n. 5, p. 61-91, 2014.

SARZALEJO, A. G.; ROSSI, B.; PERRI, G.; WINTERBERG, R.; ARISTEGUIETA, R. E. P. Fibras como elemento estrutural para reforço de concreto. (Manual Técnico). **Maccaferri do Brasil Ltda.**, 2009.

SONG, P. S.; HWANG, S. Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 18, n. 9, p. 669-673, 2004.

SOUZA, R. H. F. **Análise do comportamento de vigas de betão armado reforçadas a flexão e ao esforço transversal**. 1990. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 1990.

SOUZA, V. C.; RIPPER, T. **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto**. 1 ed. São Paulo: Ed. Pini, 1998. 255 p.

TUTIKIAN, B. F. ISAIA, G. C. HELENE, P. R. L. **Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho**. In: ISAIA, G. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. Florianópolis: IBRACON, 2011. Cap. 36. Vol. 2

YAZICI, H.; YARDIMCI, M. Y.; AYDIN, S.; KARABULT, A. Ş. Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 1, p. 1223-1231, 2009.

ZHENG, Wenzhong; LUO, Baifu; WANG, Ying. Compressive and tensile properties of reactive powder concrete with steel fibres at elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 41, p. 844-851, 2013.

APÊNDICE **A**

DADOS COMPLETOS DOS ENSAIOS

Neste Apêndice são apresentadas as tabelas com os dados completos dos ensaios do estudo da dosagem de fibras de aço no CPR, incluindo Análise de Variância. Também são apresentados os dados comparativos dos ensaios de flexão a quatro pontos e os ensaios nos corpos de prova controle do concreto convencional das vigas e dos reforços de CPR e CRF.

A.1. CPR sem adição de fibras de aço (CPR-0F)

Tabela A.5.1: Resultados do ensaio de flexão a 3 pontos do CPR-0F

ENSAIOS TRAÇÃO NA FLEXÃO (CPR-0F)												
ID	T _{Ambiente} (°C)	T _{Água} (°C)	Flowtable (cm)	Cura (Dias)	F (kgf)	$\sigma_{Flexão}$ (MPa)	DP	$\sigma_{Média}$ (MPa)	F (kgf)	$\sigma_{Compressão}$ (MPa)	DP	$\sigma_{Média}$ (MPa)
1	25	9	20,99	1	508	10,4	0,79	10,4	6860	42,9	8,99	55,3
2				1	571	11,9			10095	63,1		
3				1	480	10,6			8745	54,7		
4				1	515	10,2			9675	60,5		
5				3	940	19,7	2,00	15,9	8735	54,6	2,08	53,9
6				3	800	16,5			8815	55,1		
7				3	717	15,1			8835	55,2		
8				3	814	16,1			8135	50,8		
9				7	981	20,2	1,87	20,0	11190	69,9	7,98	67,7
10				7	940	19,8			9215	57,6		
11				7	1204	23,7			12285	76,8		
12				7	995	19,9			10650	66,6		
13				28	1462	27,6	1,46	28,0	8255	51,6	13,10	64,8
14				28	1580	30,8			8975	56,1		
15				28	1441	27,8			11540	72,1		
16				28	1545	28,6			12690	79,3		

Fonte: O autor (2022)

A.2. CPR com 6% de fibras de aço (CPR-6F)

Tabela A.5.2: Resultados do ensaio de flexão a 3 pontos do CPR-6F

ENSAIOS TRAÇÃO NA FLEXÃO (CPR-6F)												
ID	T _{Ambiente} (°C)	T _{Água} (°C)	Flowtable (cm)	Cura (Dias)	F (kgf)	σ _{Flexão} (MPa)	DP	σ _{Média} (MPa)	F (kgf)	σ _{Compressão} (MPa)	DP	σ _{Média} (MPa)
17	24	8	21,59	1	515	11,0	0,84	10,9	7315	45,7	16,36	45,6
18				1	508	10,1			8055	50,3		
19				1	592	12,0			12385	77,4		
20				1	529	10,3			6530	40,8		
21				3	856	17,8	2,31	16,3	6640	41,5	4,83	45,0
22				3	940	18,8			8325	52,0		
23				3	689	13,9			6750	42,2		
24				3	731	14,9			7110	44,4		
25				7	947	18,0	1,59	18,8	12945	80,9	11,47	80,2
26				7	898	19,4			12140	75,9		
27				7	710	15,9			13390	83,7		
28				7	919	19,1			16345	102,2		
29				28	1016	21,8	2,77	21,3	12485	78,0	20,29	88,6
30				28	891	17,8			16085	100,5		
31				28	1037	20,9			19950	124,7		
32				28	1218	24,5			13935	87,1		

Fonte: O autor (2022)

A.3. CPR com 10% de fibras de aço (CPR-10F)

Tabela A.5.3: Resultados do ensaio de flexão a 3 pontos no CPR-10F

ENSAIOS TRAÇÃO NA FLEXÃO (CPR-10F)																		
ID	T _{Ambiente} (°C)	T _{Água} (°C)	Flowtable (cm)	Cura (Dias)	F (kgf)	σ _{Flexão} (MPa)	DP	σ _{Média} (MPa)	F (kgf)	σ _{Compressão} (MPa)	DP	σ _{Média} (MPa)						
33	26	9	22,84	1	773	16,8	3,06	14,0	7310	45,7	7,37	52,6						
34				1	773	16,1			10035	62,7								
35				1	633	13,0			8495	53,1								
36				1	466	10,1			7845	49,0								
37				3	696	15,1	0,80	15,1	14,71	65,7	10840	67,8						
38				3	689	14,8					9125	57,0						
39				3	675	15,3					14750	92,2						
40				3	640	13,6					11550	72,2						
41				7	18,9	0,54	18,5	12,88	71,2	14435	90,2							
42										10740	67,1							
43										9880	61,8							
44										10520	65,8							
45										28	1148	23,4	0,79	22,7	9,36	106,5	17825	111,4
46										28	1100	22,4					16335	102,1
47										28	1037	21,7					16940	105,9
48										28	1134	23,3					14300	89,4

Fonte: O autor (2022)

A.4. CPR com 14% de fibras de aço (CPR-14F)

Tabela A.5.4: Resultados do ensaio de flexão a 3 pontos no CPR-14F

ENSAIOS TRAÇÃO NA FLEXÃO (CPR-14F)												
ID	T _{Ambiente} (°C)	T _{Água} (°C)	Flowtable (cm)	Cura (Dias)	F (kgf)	σ _{Flexão} (MPa)	DP	σ _{Média} (MPa)	F (kgf)	σ _{Compressão} (MPa)	DP	σ _{Média} (MPa)
49	25	11	20,14	1	717	13,8	2,59	13,9	8965	56,0	5,69	61,4
50				1	682	13,2			10485	65,5		
51				1	696	14,6			10730	67,1		
52				1	905	18,9			9125	57,0		
53				3	800	16,6	2,96	16,9	12735	79,6	11,50	75,0
54				3	786	16,4			11325	70,8		
55				3	919	17,8			15500	96,9		
56				3	1128	22,7			11960	74,8		
57				7	947	18,9	0,73	19,2	10205	63,8	19,03	85,4
58				7	898	18,3			14440	90,3		
59				7	995	19,7			12610	78,8		
60				7	960	19,8			17425	108,9		
61				28	1162	23,4	1,07	23,5	15765	98,5	19,84	93,2
62				28	1148	23,9			20910	130,7		
63				28	1225	24,6			15545	97,2		
64				28	1107	22,1			13440	84,0		

Fonte: O autor (2022)

A.5. Resumo dados CPR primeiro estudo e ANOVA

Tabela A.5.5: Resumo dos resultados de flexão a 3 pontos dos CP's de CPR

		Resistência à tração na flexão				Resistência à compressão			
Dias	%Fibras	CPR-0F	CPR-6F	CPR-10F	CPR-14F	CPR-0F	CPR-6F	CPR-10F	CPR-14F
1		10,4	10,9	14,0	13,9	55,3	45,6	52,6	61,4
3		15,9	16,3	15,1	16,9	61,9	53,3	65,7	75,0
7		20,0	18,8	18,5	19,2	67,7	80,2	71,2	85,4
28		28,0	21,3	22,7	23,5	84,8	88,6	106,5	93,2

Fonte: O autor (2022)

Anova: fator
único

Tração

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
0	5	74,2496	14,84992	110,2958
6	5	67,27397	13,45479	71,4414
10	5	70,27227	14,05445	73,26
14	5	73,48108	14,69622	79,78954

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	6,144193	3	2,048064	0,02447	0,994609	3,238872
Dentro dos grupos	1339,147	16	83,69669			
Total	1345,291	19				

Anova: fator
único

Compressão

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
0	5	241,7109	48,34219	765,5027
6	5	259,3724	51,87448	1230,461
10	5	295,9583	59,19167	1491,766
14	5	315,1224	63,02448	1383,439

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	672,8902	3	224,2967	0,184183	0,905588	3,238872
Dentro dos grupos	19484,68	16	1217,792			
Total	20157,57	19				

A.6. Resumo Ensaio Controle vigas e reforços de CPR e CRF

Tabela A.6: Resistência aos 28 dias e Módulo de Elasticidade dos ensaios controle dos reforços de CPR e CRF

Tipo do concreto	Identificação	Resistência aos 28 dias (MPa)		Módulo de Elasticidade (GPa)
Concreto Convencional	1º Lote de vigas (V1 a V5)	Compressão Direta	34,6	32,0
	2º Lote de vigas (V6 a V10)	Compressão Direta	20,6	26,8
Concreto Reforçado com Fibras	V1 - Reforço viga íntegra	Compressão Direta	25,0	30,1
		Compressão Diametral	3,2	
	V3 - Reforço após ELS	Compressão Direta	24,5	31,1
		Compressão Diametral	2,6	
	V7 - Reforço Viga Íntegra	Compressão Direta	22,5	29,4
		Compressão Diametral	2,9	
V9 - Reforço após ELS	Compressão Direta	24,3	30,5	
	Compressão Diametral	2,6		
Concreto de Pós Reativos	V2 - Reforço viga íntegra	Tração na Flexão	23,5	53,2
		Compressão	98,4	
	V4 - Reforço após ELS	Tração na Flexão	25,6	43,6
		Compressão	84,9	
	V6 - Reforço Viga Íntegra	Tração na Flexão	24,4	43,9
		Compressão	88,9	
V8 - Reforço após ELS	Tração na Flexão	20,1	42,8	
	Compressão	104,2		

Fonte: O autor (2022)

A.7. Resumo resultados comparativos

Tabela A.7.1: Comparativo das resistências à flexão a 4 pontos dos modelos experimentais

Lote de concretagem	Identificação das vigas		Carga de Ruptura à flexão 4 pontos (kN)	Ganho de resistência em relação a viga controle
1º Lote de vigas	Viga controle sem reforço (ELU)	V5	24,77	-
	Vigas íntegras reforçadas	V1 - CRF	26,94	8,76%
		V2 - CPR	24,92	0,61%
	Vigas Reforçadas após solicitação ao ELS	V3 - CRF	24,96	0,77%
V4 - CPR		24,31	-1,86%	
2º Lote de vigas	Viga controle sem reforço (ELU)	V10	14,20	-
	Vigas íntegras reforçadas	V6 - CPR	19,74	39,01%
		V7 - CRF	20,32	43,10%
	Vigas Reforçadas após solicitação ao ELS	V8 - CPR	19,79	39,37%
		V9 - CRF	19,14	34,79%

Fonte: O autor (2022)

Tabela A.8.2: Comparativo das flechas dos modelos experimentais

Comparação	Vigas	Referência	Flecha 1 (mm)	Flecha 2 (mm)	Redução da flecha (%)
Ensaio 2 x Ensaio 3	V3	CRF	5,29	5,05	4,5%
	V4	CPR	5,83	3,98	31,7%
	V8	CPR	4,76	3,53	25,8%
	V9	CRF	5,22	3,22	38,3%
Ensaio 3 x Ensaio 4	V3xV1	CRF	19,89	16,65	16,3%
	V4xV2	CPR	17,32	10,21	41,1%
	V8xV6	CPR	6,68	4,98	25,4%
	V9xV7	CRF	6,84	6,26	8,5%
CRF x CPR	V3xV4	Ensaio 3 - Lote 1	19,89	17,32	12,9%
	V9xV8	Ensaio 3 - Lote 2	6,84	6,68	2,3%
	V1xV2	Ensaio 4 - Lote 1	16,65	10,21	38,7%
	V7xV6	Ensaio 4 - Lote 2	6,26	4,98	20,4%

1º) Flecha 1 = Ensaio 2 e Flecha 2 = Ensaio 3 sexto ciclo

OBS Flecha 1 e Flecha 2: 2º) Flecha 1 = Ensaio 3 e Flecha 2 = Ensaio 4

3º) Flecha 1 = CRF e Flecha 2 = CPR

Fonte: O autor (2022)