

**LUÍS FELIPE FERNANDES GUIM**

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO  
REFORÇADAS COM CFRP, COM E SEM INJEÇÃO DE FISSURAS**

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: Gustavo de Souza Veríssimo

Coorientador: José Luiz Rangel Paes

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2020**

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

T

G963a  
2020 Guim, Luis Felipe Fernandes, 1994-  
Avaliação do comportamento de vigas de concreto armado  
reforçadas com CFRP, com e sem injeção de fissuras / Luis Felipe  
Fernandes Guim. - Viçosa, MG, 2020.  
208 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Gustavo de Souza Veríssimo.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.164-168.

1. Análise estrutural (Engenharia). 2. Concreto armado. 3. Resinas  
epoxi. 4. Plásticos reforçados com fibra de carbono. I. Universidade  
Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Civil. Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Civil. II. Título.

CDD 22. ed. 620.118


**LUÍS FELIPE FERNANDES GUIM**

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO  
REFORÇADAS COM CFRP, COM E SEM INJEÇÃO DE FISSURAS**

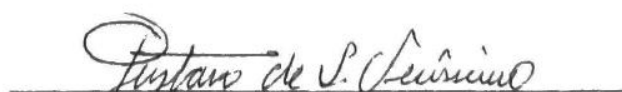
Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 19 de fevereiro de 2020.

Assentimento:



Luís Felipe Fernandes Guim  
Autor



Gustavo de Souza Veríssimo  
Orientador

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pelo dom da vida, família e amigos e pelo discernimento na hora de realizar as melhores escolhas.

Aos meus pais, Maria Aparecida e Valdeci, pelo amor, apoio e confiança incondicionais.

À minha irmã, Liamara, pelo companheirismo, amizade e confiança.

À minha noiva, Mylena, pelo carinho, paciência e apoio durante esta trajetória.

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realizar este trabalho.

Ao professor José Luiz Rangel Paes, pela orientação, confiança e pelo enorme conhecimento transmitido, que foi fundamental para elaboração deste trabalho.

Ao professor Gustavo de Souza Veríssimo, pela orientação, apoio e confiança.

Aos professores Diôgo Silva de Oliveira e Regina Helena Ferreira de Souza, pela prontidão na colaboração com os conteúdos deste trabalho.

Aos técnicos administrativos do Laboratório das Engenharias e do Laboratório de Materiais de Construção, pela colaboração e apoio na execução do programa experimental.

Ao amigo Gustavo Emilio Soares de Lima, pelo apoio e conhecimento transmitido.

Ao amigo Fabio Poltronieri e à Pórtico Engenharia Estrutural pelo suporte e pela doação de grande parte dos materiais utilizados no programa experimental.

Ao amigo Gustavo Maia e à Construtora G-Maia pela confiança e colaboração essencial no processo de injeção realizado no programa experimental.

Aos amigos da Triton Engenharia e da M&P Engenharia pela confiança, apoio e compreensão.

Aos amigos estudantes da Pós-Graduação pelo apoio, amizade e solicitude.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

## RESUMO

GUIM, Luís F. F., M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2020. **Avaliação do comportamento de vigas de concreto armado reforçadas com CFRP, com e sem injeção de fissuras.** Orientador: Gustavo de Souza Veríssimo. Coorientador: José Luiz Rangel Paes.

Os ensaios dinâmicos permitem relacionar a mudança na frequência fundamental de vibração de um elemento com sua rigidez. Isso pode auxiliar na decisão sobre a necessidade de um reforço e/ou reparo estrutural e na avaliação da efetividade do procedimento adotado. O objetivo principal deste trabalho foi avaliar o comportamento de vigas de concreto armado reforçadas com CFRP, com e sem injeção de fissuras. Para isso, foi desenvolvido um programa experimental com nove modelos, já deteriorados, com três taxas de armadura diferentes. Cada um dos três modelos com mesma taxa de armadura passou por um processo de recuperação estrutural diferente. Todos os modelos foram reforçados com uma manta de CFRP na região tracionada. O primeiro modelo não teve fissuras injetadas, enquanto o segundo e o terceiro foram injetados com dois tipos de resina diferentes. Foram realizados ensaios dinâmicos e ensaios de flexão. Para cada estágio de carregamento do ensaio de flexão as flechas das vigas foram calculadas a partir da rigidez estimada por meio dos ensaios dinâmicos e a partir da rigidez proposta pelo modelo analítico de Branson. Observou-se que os valores calculados se aproximaram bastante das flechas medidas experimentalmente. Notou-se um ganho considerável de resistência em relação aos resultados obtidos antes da recuperação. Além disso, foi observado que a injeção contribuiu no aumento da rigidez dos modelos, sem influenciar na resistência final dos mesmos. Notou-se também que os modelos injetados apresentaram uma rigidez intermediária entre o Estádio I e o Estádio II do modelo original antes da carga de fissuração. Já os elementos não injetados apresentaram uma rigidez muito próxima da fase correspondente ao Estádio II do modelo original. Os modos de falha observados em todos os modelos foram similares para cada grupo com mesma taxa de armadura. Com base no trabalho desenvolvido, pode-se afirmar que a estimativa de rigidez por meio de ensaios dinâmicos é uma boa alternativa para avaliação do comportamento de elementos estruturais reforçados, com e sem injeção de fissuras.

Palavras-Chave: Reforço com CFRP. Injeção de fissuras. Ensaio não destrutivo.

## ABSTRACT

GUIM, Luís F. F., M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2020. **Evaluation of the behavior of reinforced concrete beams reinforced with CFRP, with and without crack injection.** Adviser: Gustavo de Souza Veríssimo. Co-adviser: José Luiz Rangel Paes.

Dynamic tests allow relating the change in the fundamental frequency of vibration of an element with its stiffness. This can assist in deciding the need for structural reinforcement and / or repair and in assessing the effectiveness of the procedure adopted. The main objective of this work was to evaluate the behavior of reinforced concrete beams reinforced with CFRP, with and without crack injection. For this, an experimental program was developed with nine models, already deteriorated, with three different reinforcement rates. Each of the three models with the same reinforcement rate has undergone a different structural recovery process. All models were reinforced with a CFRP blanket in the pulled region. The first model had no injected cracks, while the second and third were injected with two different types of resin. Dynamic tests and flexion tests were performed. For each loading stage of the bending test, the displacements of the beams were calculated from the stiffness estimated through dynamic tests and from the stiffness proposed by the analytical model of Branson. It was observed that the calculated values were very close to the displacements measured experimentally. A considerable resistance gain was noticed in relation to the results obtained before the recovery. In addition, it was observed that the injection contributed to increase the rigidity of the models, without influencing their final strength. It was also noted that the injected models showed an intermediate stiffness between the Stage I and Stage II of the original model before the crack load. The non-injected elements, on the other hand, showed a stiffness very close to the phase corresponding to the Stage II of the original model. The failure modes observed in all models were similar for each group with the same reinforcement rate. Based on the work developed, it can be said that the estimate of stiffness by means of dynamic tests is a good alternative for assessing the behavior of reinforced structural elements, with and without crack injection.

Keywords: Reinforcement with CFRP. Crack injection. Non-destructive testing.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Comportamento do concreto na flexão pura. (Estádio I).....	24
Figura 2.2 - Comportamento do concreto na flexão pura (Estádio II). .....	25
Figura 2.3 - Variação das tensões de tração no aço e no concreto no trecho fissurado.....	25
Figura 2.4 - Comportamento do concreto na flexão pura (Estádio II). .....	26
Figura 2.5 - Diagrama de deformação na ruína. ....	27
Figura 2.6 - a) Sistema de 1 GDL - massa-mola, sem amortecimento. b) Sistema de 1 GDL - massa-mola, com amortecimento. ....	29
Figura 2.7 - Quatro modos iniciais de vibração de uma viga biapoiada. ....	31
Figura 2.8 - Ciclo de histerese para materiais elásticos.....	33
Figura 2.9 - Análise Modal Teórica e Análise Modal Experimental.....	35
Figura 2.10 - a) Método da Ressonância Forçada - Vibração Transversal; b) Método da Ressonância de Impacto - Vibração Transversal.....	38
Figura 2.11 - Representação esquemática dos módulos de elasticidade: tangente inicial ( $E_{c,i}$ ) e secante ( $E_{c,s}$ ). ....	39
Figura 2.12 - Comportamento tensão-deformação da pasta de cimento, do agregado e do concreto. ....	40
Figura 2.13 - Seção retangular no Estádio I. ....	42
Figura 2.14 - Seção retangular no Estádio II <sub>0</sub> . ....	43
Figura 2.15 - Esquema de viga submetida à flexão com variação de altura da linha neutra (vermelho). ....	44
Figura 2.16 - Rigidez à flexão ao longo da viga.....	45
Figura 2.17 - Diagrama momento-curvatura.. ....	46
Figura 2.18 - Diagramas Tensão-Deformação. ....	48
Figura 2.19 - Primeiro registro de utilização de CFRP na América Latina – Viaduto de Santa Tereza em Belo Horizonte, MG. ....	50
Figura 2.20 - Reforço de confinamento em pilares. ....	50
Figura 2.21 – Sistema de CFRP pré-fabricado. ....	51
Figura 2.22 - Sistema de CFRP curados “ <i>in situ</i> ”. ....	52
Figura 2.23 - Modos de falha possíveis.....	58
Figura 2.24 - Distribuição interna de esforços e tensões para uma seção retangular de concreto armado abaixo do ELU.....	61
Figura 2.25 - Limpeza da superfície de uma fissura usando uma pequena lixadeira. ....	72

Figura 2.26 - Perfuração da estrutura e colocação dos bicos para injeção da resina. ....	72
Figura 2.27 - Vedação das fissuras. ....	73
Figura 2.28 – Processo de injeção de fissuras com resina epóxi. ....	73
Figura 2.29 - Configuração do ensaio de flexão realizado por Al Nu'man e Al-Sahlani (2006). .....	76
Figura 2.30 - Configuração do ensaio realizado. ....	78
Figura 2.31 - Modelo estrutural do ensaio realizado e história do carregamento cíclico utilizado. .....	79
Figura 3.1 - Modelo ensaiado por Lima (2017). ....	81
Figura 3.2 - Identificação adotada para os modelos de viga de Lima (2017). ....	82
Figura 3.3 - Modelo estrutural do ensaio de flexão realizado. ....	83
Figura 3.4 - a) Modelos danificados; b) Evidência da existência de flecha residual no modelo T60A50-R1; c) Fissuras na face inferior do modelo T60A50-R1; d) Fissuras na face inferior do modelo T60A80-R2; e) Fissura dupla na face inferior no modelo T60A63-R1; f) Extensão de uma fissura no modelo T60A80-R2. ....	84
Figura 3.5 - Detalhamento da manta de CFRP de reforço. ....	86
Figura 3.6 - Modelos reforçados sem ancoragem (a) e com ancoragem (b). ....	86
Figura 3.7 - Limpeza da área fissurada com auxílio de uma estopa com álcool. ....	90
Figura 3.8 - Bicos de adesão posicionados com auxílio de pregos. ....	91
Figura 3.9 - Fixação dos bicos de adesão (a) e selamento das fissuras (b). ....	91
Figura 3.10 – Graxadeiras sendo rosqueadas. ....	92
Figura 3.11 - Fixação do bico da mangueira ao bico de adesão colado sobre uma fissura. ....	93
Figura 3.12 - Momento do vazamento da resina de injeção no final da extensão da fissura. ..	93
Figura 3.13 - a) Retirada dos fragmentos soltos; b) viga com os fragmentos retirados; c) preenchimento com o Viapoxi Adesivo; d) Regularização da superfície. ....	97
Figura 3.14 - Limpeza do elemento após a superfície para a colagem da manta de CFRP ter sido lixada. ....	97
Figura 3.15 - Aplicação do adesivo MC-DUR 1209 TX. ....	98
Figura 3.16 - Fixação da manta de CFRP. ....	99
Figura 3.17 - Impregnação da manta de CFRP com a resina MC-DUR 1209. ....	99
Figura 3.18 - Esquema de montagem do ensaio de flexão. ....	103
Figura 3.19 - Detalhe da fissuração do modelo experimental. ....	104

Figura 3.20 - Posição do acelerômetro e ponto de aplicação do impacto no ensaio para obtenção das características dinâmicas .....	105
Figura 3.21 - a) Afastamento dos transdutores; b) Detalhe do ensaio sendo feito com o atuador suspenso e transdutores afastados. ....	106
Figura 3.22 - Comparação dos gráficos de frequência gerados pelo SensView (a) e pelo Excel (b). ....	107
Figura 4.1 - Rigidez estimada antes e após o processo de injeção de resinas epóxi. ....	110
Figura 4.2 - Rigidez estimada antes e após o processo de colagem de mantas de CFRP. ....	111
Figura 4.3 - Rigidez estimada antes e após a recuperação estrutural. ....	113
Figura 4.4 - Rigidez estimada dos modelos íntegros (Lima, 2017), antes da recuperação estrutural e após a recuperação estrutural. ....	115
Figura 4.5 - Diagrama de degradação da rigidez dos modelos CRA50. ....	118
Figura 4.6 – Diagrama Carga-Flecha do modelo CRA50-NI com resultados experimentais e calculados com base na rigidez estimada por meio do ensaio dinâmico. ....	119
Figura 4.7 - Ciclos de carregamento e descarregamento do modelo CRA50-IC .....	120
Figura 4.8 - Coeficiente de ajuste em função do carregamento aplicado. ....	122
Figura 4.9 - Coeficiente de ajuste em função do carregamento aplicado, desconsiderando valores de Carga/Carga Última inferiores a 0,10. ....	122
Figura 4.10 – Diagrama Carga-Flecha do modelo CRA50-NI com resultados experimentais e calculados com base na rigidez estimada por meio do ensaio dinâmico, corrigida pelo coeficiente de ajuste. ....	123
Figura 4.11 - Diagrama Carga-Flecha do modelo CRA50-NI. ....	127
Figura 4.12 - Diagrama Carga-Flecha do modelo CRA50-IC. ....	127
Figura 4.13 - Diagrama Carga-Flecha do modelo CRA50-IT. ....	128
Figura 4.14 – Diagrama de degradação da rigidez dos modelos CRA63. ....	130
Figura 4.15 - Diagrama Carga-Flecha do modelo CRA63-NI. ....	132
Figura 4.16 - Diagrama Carga-Flecha do modelo CRA63-IC. ....	132
Figura 4.17 - Diagrama Carga-Flecha do modelo CRA63-IT. ....	133
Figura 4.18 - Diagrama de degradação da rigidez dos modelos CRA80. ....	135
Figura 4.19 - Diagrama Carga-Flecha do modelo CRA80-NI. ....	137
Figura 4.20 - Diagrama Carga-Flecha do modelo CRA80-IC. ....	137
Figura 4.21 - Diagrama Carga-Flecha do modelo CRA80-IT. ....	138
Figura 4.22 - Diagrama Carga-Flecha obtido no ensaio de flexão dos modelos CRA50. ....	140

Figura 4.23 - Diagrama Carga-Flecha obtido no ensaio de flexão dos modelos CRA63.....	140
Figura 4.24 - Diagrama Carga-Flecha obtido no ensaio de flexão dos modelos CRA80.....	141
Figura 4.25 - Diagrama Carga-Flecha modelos CRA50 em comparação com Lima (2017).	142
Figura 4.26 - Diagrama Carga-Flecha modelos CRA63 em comparação com Lima (2017).	143
Figura 4.27 - Diagrama Carga-Flecha modelos CRA80 em comparação com Lima (2017).	143
Figura 4.28 - a) Falha do modelo CRA50-NI. b) Detalhe do ponto onde ocorreu a falha do modelo. c) Detalhe do rompimento da manta de CFRP e da armadura positiva.....	145
Figura 4.29 - a) Falha do modelo CRA50-IC. b) Detalhe do descolamento da manta de CFRP. c) Detalhe do rompimento da armadura positiva. ....	146
Figura 4.30 - a) Falha do modelo CRA50-IT. b) Detalhe do ponto onde ocorreu a falha do modelo. c) Detalhe do rompimento da armadura positiva. ....	147
Figura 4.31 - a) Falha do modelo CRA63-NI. b) Detalhe do rompimento e descolamento da manta de CFRP. c) Detalhe do não rompimento da armadura positiva. ....	149
Figura 4.32 - a) Falha do modelo CRA63-IC. b) Detalhe do rompimento e descolamento da manta de CFRP. c) Detalhe do não rompimento da armadura positiva e desprendimento de fragmentos de concreto.....	150
Figura 4.33 - a) Falha do modelo CRA63-IT. b) Detalhe do rompimento e descolamento da manta de CFRP. c) Detalhe do não rompimento da armadura positiva e desprendimento de fragmentos de concreto.....	151
Figura 4.34 - a) Falha do modelo CRA80-NI. b) Detalhe do esmagamento do concreto. c) Detalhe do descolamento da manta de CFRP após o esmagamento do concreto.....	152
Figura 4.35 - a) Falha do modelo CRA80-IC. b) Detalhe do esmagamento do concreto. c) Detalhe da cunha gerada na região do esmagamento. ....	153
Figura 4.36 - a) Falha do modelo CRA80-IT. b) Detalhe do esmagamento do concreto e da ruptura da manta de CFRP. c) Detalhe do esmagamento do concreto. ....	154
Figura 4.37 - Cargas últimas obtidas por Lima (2017), por meio dimensionamento conforme o ACI 440.2R-08 e por meio do ensaio experimental. ....	158
Figura 4.38 - a) Detalhe de nova fissura adjacente à fissura injetada. b) Detalhe de nova fissura se cruzando com fissura injetada. ....	159

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Parâmetro de frequência $\beta$ . .....	32
Tabela 2.2 - Fatores de redução $C_E$ em função das condições ambientais. ....	49
Tabela 2.3 - Propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com fibra de carbono. ....	50
Tabela 2.4 - Resumo dos tipos de ruptura possíveis. ....	57
Tabela 2.5 - Classificação dos materiais utilizados nas injeções de fissuras. ....	70
Tabela 3.1 - Identificação dos modelos utilizados. ....	82
Tabela 3.2 - Características gerais dos modelos danificados. ....	83
Tabela 3.3 - Identificação dos exemplares de acordo com o processo de recuperação estrutural. .....	87
Tabela 3.4 - Materiais e equipamentos injeção das fissuras com as resinas epóxi. ....	88
Tabela 3.5 - Materiais e equipamentos para colagem da manta de CFRP. ....	94
Tabela 3.6- Equipamentos utilizados para realização do ensaio de flexão. ....	100
Tabela 3.7 - Equipamentos utilizados para realização do ensaio para determinação das características dinâmicas. ....	104
Tabela 4.1 - Frequência medida e rigidez estimada antes e após o processo de injeção de resinas epóxi. ....	109
Tabela 4.2 - Frequência medida e rigidez estimada antes e após o processo de colagem de mantas de CFRP. ....	111
Tabela 4.3 - Frequência medida e rigidez estimada antes e após a recuperação estrutural dos modelos. ....	113
Tabela 4.4 - Degradação da rigidez antes da recuperação estrutural. ....	114
Tabela 4.5 - Degradação da rigidez após a recuperação estrutural. ....	114
Tabela 4.6 - Modelo CRA50-NI. ....	117
Tabela 4.7 - Modelo CRA50-IC. ....	117
Tabela 4.8 - Modelo CRA50-IT. ....	117
Tabela 4.9 - Determinação do coeficiente de ajuste. ....	121
Tabela 4.10 – Flecha dos modelos CRA50 calculada com base características dinâmicas. ..	124
Tabela 4.11 - Flecha dos modelos CRA50 calculada com base no modelo analítico de Branson. .....	125
Tabela 4.12 - Flecha dos modelos CRA50 calculada com base no modelo de Branson com estimativa experimental da posição da linha neutra. ....	126
Tabela 4.13 - Modelo CRA63-NI. ....	128

Tabela 4.14 - Modelo CRA63-IC. ....	129
Tabela 4.15 - Modelo CRA63-IT. ....	129
Tabela 4.16 - Flecha dos modelos CRA63 calculada com base características dinâmicas. ...	130
Tabela 4.17 - Flecha dos modelos CRA63 calculada com base no modelo analítico de Branson. .....	131
Tabela 4.18 - Flecha dos modelos CRA63 calculada com base no modelo de Branson com estimativa experimental da posição da linha neutra. ....	131
Tabela 4.19 - Modelo CRA80-NI. ....	133
Tabela 4.20 - Modelo CRA80-IC. ....	134
Tabela 4.21 - Modelo CRA80-IT. ....	134
Tabela 4.22 - Flecha dos modelos CRA80 calculada com base características dinâmicas. ...	135
Tabela 4.23 - Flecha dos modelos CRA80 calculada com base no modelo analítico de Branson. .....	136
Tabela 4.24 - Flecha dos modelos CRA80 calculada com base no modelo de Branson com estimativa experimental da posição da linha neutra. ....	136
Tabela 4.25 - Valores totais de carregamento, flecha e deformação para os modelos CRA50. .....	147
Tabela 4.26 - Valores totais de carregamento, flecha e deformação para os modelos CRA63. .....	151
Tabela 4.27 - Valores máximos de carregamento, flecha e deformação para os modelos CRA80. .....	154
Tabela 4.28 – Situações de falha dos modelos. ....	155
Tabela 4.29 - Cargas últimas para os modelos. ....	158
Tabela B.1 - Características das fissuras dos modelos danificados. ....	207

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

$b$	largura da viga
$c$	coeficiente de amortecimento
$d$	distância entre o centro de gravidade da armadura à fibra mais comprimida
$d_f$	distância entre o centro de gravidade do reforço à fibra mais comprimida
$d_{fv}$	altura efetiva da fibra de reforço ao cisalhamento
$f$	frequência de vibração
$f(t)$	força aplicada em função do tempo $t$
$f_c$	resistência à compressão do concreto
$f_{ct}$	resistência à tração direta do concreto
$f_{ctm}$	resistência à tração média do concreto
$f_{f,e}$	resistência efetiva do reforço de FRP
$f_s$	resistência do aço à tração
$f_y$	tensão de escoamento do aço
$h$	altura da viga
$h(t)$	conjunto de respostas ao longo do tempo na análise modal
$k$	constante elástica da mola ou rigidez
$kx$	força elástica (proporcional ao deslocamento)
$l_{df}$	comprimento de ancoragem do reforço de FRP
$n$	número de camadas de reforço
$t_f$	espessura de cada camada de FRP
$\omega_n$	frequência natural de vibração na análise modal
$x$	deslocamento no tempo $t$
$x'$	derivada de um deslocamento $x$ no tempo $t$
$x''$	derivada segunda de um deslocamento $x$ no tempo $t$
$x_I$	posição da linha neutra no Estádio I
$x_{II}$	posição da linha neutra no Estádio II <sub>0</sub>
$y$	distância da linha neutra até a fibra mais tracionada
$A$	área da seção transversal do elemento
$A_f$	área total do reforço de FRP
$A_{f,anchor}$	área do reforço transversal de ancoragem do reforço FRP

$A_s$	área total de armadura tracionada
$[C]$	matriz de amortecimento
$E$	módulo de elasticidade
$E_{c,i}$	módulo de elasticidade tangente inicial
$E_{c,s}$	módulo de elasticidade secante do concreto
$E_{c,tg}$	módulo de elasticidade tangente do concreto
$E_f$	módulo de elasticidade do FRP
$E_s$	módulo de elasticidade do aço
$EI$	rigidez à flexão
$EI_{eq}$	Rigidez à flexão equivalente
$I_c$	momento de inércia da seção bruta de concreto
$I_I$	momento de inércia no Estádio I
$I_{II}$	momento de inércia no Estádio II <sub>0</sub>
$[K]$	matriz de rigidez
$L$	comprimento do vão
$L_e$	comprimento da ligação ativa da ancoragem do reforço de FRP
$M_P$	momento devido ao carregamento permanente
$M_r$	momento de fissuração do concreto
$[M]$	matriz de massa
$P$	força em um dos dois pontos de aplicação
$\alpha_e$	relação entre $E_s$ e o $E_{c,s}$
$\alpha_E$	parâmetro em função do agregado que influencia o módulo de elasticidade
$\alpha_f$	relação entre $E_f$ e $E_{c,s}$
$\alpha_i$	relação entre $E_{c,s}$ e $E_{c,i}$
$\beta^2$	parâmetro relacionado ao modo de vibração e às condições de contorno
$\delta_{máx}$	flecha no centro do vão
$\varepsilon_{bi}$	deformação provocada antes da aplicação do reforço
$\varepsilon_c$	deformação no concreto
$\varepsilon_{c,u}$	deformação máxima do concreto
$\varepsilon_{c,0}$	deformação calculada com base nas propriedades mecânicas do concreto
$\varepsilon_{f,d}$	deformação máxima de cálculo do FRP
$\varepsilon_{f,e}$	deformação efetiva do FRP

$\varepsilon_{f,u}$	deformação última máxima do FRP
$\varepsilon_s$	deformação no aço
$\Phi_k$	modos de vibração na análise modal
$\rho$	massa específica do material
$\zeta$	fatores de amortecimento na análise modal
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
CFRP	<i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i> (Polímero Reforçado com Fibra de Carbono)
DT	<i>Displacement Transducer</i> (Transdutor de deslocamento)
END	Ensaio Não Destrutivo
FRP	<i>Fiber Reinforced Polymer</i> (Polímero Reforçado com Fibra)
SAD	Sistema de Aquisição de Dados
SG	Strain Gage (Extensômetro)

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	17
1.1. Objetivos .....	19
1.2. Justificativa e relevância do tema .....	20
1.3. Estrutura da dissertação .....	21
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	23
2.1. Aspectos gerais sobre o comportamento e modos de falha de vigas de concreto armado .....	23
2.2. Características dinâmicas das estruturas .....	28
2.2.1. Generalidades .....	28
2.2.2. Frequência Natural e Modos de Vibração .....	30
2.2.3. Amortecimento .....	32
2.2.4. Análise Modal .....	33
2.3. Ensaio Não Destrutivo .....	35
2.3.1. Generalidades .....	35
2.3.2. Ensaio Dinâmico .....	36
2.4. Estimativa da rigidez à flexão de vigas de concreto armado e avaliação do seu grau de deterioração .....	38
2.4.1. Módulo de Elasticidade do concreto .....	38
2.4.2. Momento de Inércia da seção de concreto armado .....	42
2.4.3. Estimativa da rigidez à flexão .....	45
2.5. Reforço estrutural com manta de CFRP .....	47
2.5.1. Reforço com a utilização de polímeros reforçados com fibras (FRP) .....	47
2.5.2. Polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP) .....	49
2.5.3. Comportamento estrutural em vigas reforçadas com CFRP submetidas a esforços de flexão .....	53
2.5.4. Modos de falha característicos .....	54
2.5.5. Dimensionamento do reforço .....	58
2.6. Reparo de concreto fissurado com injeção de resinas .....	68
2.7. Estudos realizados por outros autores .....	74
2.7.1. Lima (2017) .....	74
2.7.2. Al Nu'man e Al-Sahlani (2006) .....	75
2.8.2. Salgado, Ayala e Rangel (2016) .....	77

2.8.4. Karayannis e Sirkelis (2008) .....	78
3. MATERIAIS E MÉTODOS .....	81
3.1. Características dos modelos experimentais danificados .....	81
3.2. Execução da recuperação estrutural nos modelos experimentais .....	85
3.2.1. Considerações preliminares.....	85
3.2.2. Reparo com injeção de fissuras .....	87
3.2.3. Reforço com manta de CFRP.....	94
3.3. Programa experimental .....	100
3.3.1. Ensaio de flexão .....	100
3.3.2. Ensaio para determinação das características dinâmicas .....	104
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	108
4.1. Considerações preliminares .....	108
4.2. Estimativa da rigidez antes e após a recuperação estrutural .....	109
4.2.1. Modelos reparados com injeção de resinas epóxi .....	109
4.2.2. Modelos reforçados com manta de CFRP .....	110
4.2.3. Discussão dos resultados .....	112
4.3. Estimativa de flecha e degradação da rigidez dos modelos recuperados.....	115
4.3.1. Modelos CRA50.....	116
4.3.2. Modelos CRA63.....	128
4.3.3. Modelos CRA80.....	133
4.3.4. Discussão dos resultados .....	138
4.4. Avaliação dos modos de falha dos modelos recuperados .....	144
4.4.1. Modelos CRA50.....	144
4.4.2. Modelos CRA63.....	148
4.4.3. Modelos CRA80.....	151
4.4.4. Discussão dos resultados .....	154
5. CONCLUSÕES .....	160
5.1. Considerações finais .....	160
5.2. Sugestões para trabalhos futuros.....	163
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	164
APÊNDICE A. DIMENSIONAMENTO DO REFORÇO DE CFRP.....	169
APÊNDICE B. CARACTERÍSTICAS DAS FISSURAS DOS MODELOS DANIFICADOS .....	206

# 1

---

## INTRODUÇÃO

Atualmente as questões referentes à vida útil e durabilidade de uma estrutura são temas cada vez mais recorrentes no âmbito da engenharia civil. Para a ABNT NBR 15575:2013 o conceito de vida útil pode ser descrito como o período de tempo em que um edifício e seus sistemas se prestam às atividades para as quais foram projetados e construídos. Já a durabilidade é, segundo a mesma norma, a capacidade da edificação ou de seus sistemas desempenharem suas funções sob as condições de uso e manutenção especificadas. Esses dois conceitos estão diretamente ligados à *deterioração estrutural*, um processo complexo no qual uma estrutura apresenta degeneração em suas características mecânicas. Esse processo pode apresentar diversas causas e consequências, e deve, portanto, ser compreendido a fim de se garantir a qualidade de uma edificação em serviço.

As causas da deterioração são variadas, podendo acontecer naturalmente com o envelhecimento da estrutura, ou de maneira imprevisível e repentina, ocasionando, por vezes, grandes acidentes. Para Souza e Ripper (1998), o crescimento acelerado da construção civil trouxe em si a aceitação implícita de maiores riscos, ainda que dentro de certos limites regulamentados das mais diversas formas. Também nesse sentido, o aumento do conhecimento sobre estruturas e materiais, que transmite a ideia de maior domínio e controle sobre o comportamento estrutural, pode, de maneira controversa, ser um fator que contribua para um desempenho insatisfatório dos elementos projetados. Isso pode ocorrer tanto devido a falhas involuntárias quanto à imperícia, reflexos da menor margem de segurança adotada ou da falta de aprofundamento nas soluções existentes. Para os autores, esse conjunto complexo de fatores gera a deterioração estrutural.

No caso de estruturas de concreto armado, o processo de deterioração provoca diferentes graus de degradação da rigidez de seus elementos componentes, independentemente da causa. A quantificação da rigidez de elementos deteriorados é um aspecto de grande importância para

avaliação estrutural e consequente decisão sobre a necessidade de se realizar procedimentos de reparo e/ou reforço.

Nesse contexto, os Ensaio Não Destrutivos (END) se apresentam como uma solução de grande relevância para avaliação estrutural. Os Ensaio Dinâmicos, um subgrupo dos END, permitem relacionar a mudança na frequência natural de vibração de um elemento com sua rigidez, o que possibilita determinar as condições reais de deterioração que se encontra uma estrutura. Para Souza e Ripper (1998), o conhecimento acerca das características residuais do elemento em questão faz com que a decisão sobre o processo de reparo e reforço estrutural ocorra da maneira mais adequada e racional possível, permitindo a redução da magnitude do reforço e influenciando diretamente na viabilidade econômica da execução dos trabalhos de recuperação.

De maneira geral, os processos de reforço e reparo estrutural visam adequar uma estrutura de modo que ela possua, respectivamente, a resistência e as condições em serviço necessárias para atender às atividades para as quais foi projetada e construída. Portanto, quando os serviços a serem executados implicam em introdução de novos materiais com finalidade de aumentar ou reconstituir a capacidade portante da estrutura, tem-se um procedimento de reforço estrutural. Por outro lado, caso os serviços sejam executados no intuito de atender às condições de serviço e de durabilidade do elemento estrutural, sem a adição de materiais para aumento ou restituição de sua capacidade portante, tem-se um processo de reparo estrutural (SOUZA E RIPPER, 1998).

Para a realização do reforço estrutural, Souza e Appleton (2003) comentam que a utilização de materiais compósitos tem recebido considerável atenção nos últimos anos, havendo muitos estudos desenvolvidos em diferentes instituições de pesquisa. Os autores afirmam que este tipo de reforço oferece uma alternativa interessante principalmente devido à sua leveza, o que facilita as operações de manuseio e instalação. Além disso, esses materiais, dos quais se destacam os polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP – *Carbon Fiber Reinforced Polymer*), possuem alta resistência, são inertes ao processo de corrosão eletroquímica ou corrosão por outros agentes agressivos e possuem grande versatilidade de aplicação, o que gera seu vasto campo de aplicação na engenharia.

Os reparos estruturais podem variar muito a depender do tipo e profundidade dos danos presentes na estrutura. Em termos da rigidez de um elemento, a principal manifestação patológica a ser recuperada é a fissuração excessiva. Segundo De Paula *et al.* (2015), nesses

casos, ou quando uma peça de concreto possui fissuras que possam permitir a entrada de água ou outros contaminantes no interior da estrutura, é aconselhada a utilização de injeções. Essas injeções são feitas com materiais com características mecânicas parecidas com as do concreto e buscam o reestabelecimento do monolitismo da peça. Com isso, é possível se obter um aumento na rigidez do elemento, melhorando assim seu comportamento em serviço.

Tendo realizado os procedimentos de reforço e reparo estrutural, a avaliação do comportamento dos elementos tem função primordial na determinação da efetividade dos serviços executadas. Como essas atividades introduzem uma heterogeneidade ainda maior à estrutura de concreto armado, faz-se necessário utilizar mecanismos de monitoramento e avaliação capazes de gerar uma resposta mais ampla sobre o comportamento dos elementos em análise. Nesse aspecto, Nóbrega (2004) cita que os ensaios dinâmicos são uma ótima solução, já que permitem uma avaliação do estado de integridade estrutural dos elementos, mobilizando integralmente sua massa, sua rigidez e seu amortecimento.

Neste trabalho avaliou-se, por meio da realização de ensaios dinâmicos, a condição estrutural de modelos reduzidos de vigas de concreto armado que foram previamente danificadas no estudo desenvolvido por Lima (2017). Essas vigas foram levadas à ruptura através de ensaios que buscavam relacionar as frequências naturais de vibração medidas com a evolução do estado de degradação da peça. Foi feito um reforço estrutural com utilização de (CFRP) para que as vigas retomassem sua capacidade resistente. Além disso, foram feitas injeções de fissuras com resinas epóxi para recuperação da rigidez dos elementos. Após o processo, essas vigas foram novamente ensaiadas para avaliação da eficiência da metodologia aplicada, medindo-se e correlacionando-se as frequências naturais com o estado de deterioração dos elementos, atentando-se também para as flechas apresentadas no decorrer dos ensaios. Pretende-se, com este trabalho, contribuir para a compreensão dos procedimentos de reparo e reforço estrutural utilizados em vigas de concreto armado, tendo em vista o comportamento dos elementos após a execução dessas atividades.

## **1.1. Objetivos**

O objetivo principal deste trabalho é avaliar o comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com CFRP, com e sem injeção de fissuras.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- ✓ obter modelos experimentais de viga de concreto armado, previamente danificados, com e sem injeção de fissuras e reforçados com CFRP;
- ✓ obter a rigidez dos modelos de viga antes e após a recuperação estrutural, por meio de ensaios dinâmicos;
- ✓ obter flechas, deformações e frequências naturais dos modelos de viga ao longo da aplicação do carregamento em ensaios de flexão;
- ✓ calcular as flechas dos modelos de viga a partir da rigidez à flexão, estimada por meio dos ensaios dinâmicos, e compará-las com resultados experimentais e analíticos;
- ✓ avaliar os modos de falha dos modelos de viga recuperados.

## **1.2. Justificativa e relevância do tema**

As manifestações patológicas em estruturas de concreto armado podem gerar grandes impactos, seja em aspectos financeiros ou de utilização do empreendimento. Por incoerências de projeto e execução ou uso inadequado de uma edificação, as estruturas têm apresentado muitos problemas, o que torna cada vez mais necessárias intervenções de reparo e reforço estrutural. Nesse viés, definir meios de avaliação qualitativa e quantitativa da condição estrutural dos elementos é indispensável e o uso de ensaios dinâmicos para realizar essa avaliação se mostra como uma alternativa muito interessante.

Além da avaliação das condições estruturais de peças com algum estado de deterioração que apresente risco ou desconforto ao usuário, a prática de determinação das características de um elemento já em serviço, por meio de ensaios não destrutivos, se mostra como um procedimento bastante promissor. Isso se deve à necessidade da realização de estudos e ponderações sobre estruturas que não possuem registro de projeto ou execução, mas que podem satisfazer às necessidades de uma determinada demanda. Nesse quadro, encontram-se, por exemplo, pontes rodoviárias e ferroviárias brasileiras, das quais, mesmo estando em operação, não se tem garantias sobre a real capacidade portante. Esse contexto se apresenta muito favorável ao desenvolvimento de pesquisas com a temática a ser desenvolvida neste trabalho.

Por meio dessas avaliações é possível verificar a necessidade de executar o reparo e/ou o reforço para determinada estrutura. Nesse contexto, se torna inevitável conhecer melhor as técnicas capazes de promover, de maneira efetiva, a reabilitação de elementos estruturais

comprometidos. Nessa linha, *Salgado et al.* (2016) indicam que a utilização dos polímeros tem sido uma importante metodologia no reforço de estruturas degradadas. Além disso, por mais que o trabalho desses autores seja feito por meio de uma avaliação dinâmica, em suas considerações acerca de estudos anteriores, é possível notar que a avaliação do comportamento de estruturas reabilitadas tem sido feita, basicamente, por meio de parâmetros estáticos. Isso aponta para a necessidade de melhorar as análises sobre comportamento estrutural de elementos reforçados baseando-se em características dinâmicas. Desse modo, a realização do presente trabalho é bastante pertinente, já que a metodologia de ensaios dinâmicos não destrutivos e as correlações destes com as características do modelo ensaiado possibilitam uma melhor compreensão da eficiência do reparo e do reforço em relação ao comportamento da estrutura e em termos de sua perda de rigidez.

A abordagem do trabalho sobre o comportamento de modelos estruturais que passaram por um procedimento de reparo e um procedimento de reforço é menos comum nas pesquisas sobre o tema. A intenção é avaliar as melhorias nas capacidades últimas e no comportamento estrutural em situações de serviço. Karayannis e Sirkelis (2008) apresentam um trabalho nesse viés, avaliando o comportamento combinado do reforço com CFRP e do reparo com injeção de resinas em ligações viga/pilar, principalmente quando submetidos a carregamentos cíclicos que buscam reproduzir solicitações em casos de terremotos.

De maneira geral, o presente trabalho contribui com a Linha de Pesquisa relacionada à avaliação das características dinâmicas de estruturas e também com a Linha de Pesquisa voltada à utilização de reforços estruturais em peças danificadas no âmbito da Área de Concentração em Engenharia da Construção do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa (UFV).

### **1.3. Estrutura da dissertação**

Este trabalho foi estruturado em cinco capítulos, nos quais se descrevem as etapas do estudo realizado.

No Capítulo 1 apresenta-se uma introdução ao tema abordado, ressaltando aspectos relacionados à avaliação da integridade estrutural e aos processos de recuperação de estruturas. Na sequência, apresentam-se o objetivo principal do trabalho e os objetivos específicos. Apresenta-se a justificativa e relevância do tema no contexto atual e sob o ponto de vista da

linha de pesquisa que vem sendo desenvolvida no âmbito da Área de Concentração em Engenharia da Construção do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa (UFV). Ao final é apresentada a estrutura da dissertação.

No Capítulo 2 é apresentada uma fundamentação teórica sobre temas essenciais à elaboração do trabalho proposto. Apresenta-se também uma breve elucidação sobre estudos semelhantes já realizados que buscaram avaliar o comportamento de elementos de concreto armado reforçados com manta de CFRP ou reparados com injeção de fissuras.

No Capítulo 3 apresentam-se as características dos modelos experimentais utilizados no trabalho, as propriedades dos materiais empregados na recuperação estrutural, a descrição da instrumentação e dos equipamentos utilizados nos ensaios de flexão e de determinação das características dinâmicas e a sequência de atividades realizadas.

No Capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados da recuperação estrutural. Em seguida, são apresentados e discutidos os resultados do ensaio de flexão e do ensaio para determinação das características dinâmicas. Por fim, são abordados os modos de falha apresentados pelos modelos recuperados.

No Capítulo 5 apresentam-se as conclusões gerais do presente trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

No Apêndice A apresenta-se a sequência de cálculos utilizada para o dimensionamento do reforço com CFRP, conforme o estabelecido pelo ACI 440.2R-08.

# 2

---

## FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste Capítulo é apresentada uma fundamentação teórica sobre temas essenciais à elaboração do trabalho proposto. Assim, no intuito de avaliar o comportamento de elementos de concreto armado reforçados com manta de CFRP, com e sem reparo por injeção de fissuras, são apresentados alguns conceitos básicos sobre os materiais e procedimentos utilizados, características do comportamento de elementos de concreto armado e estudos semelhantes já realizados por outros autores.

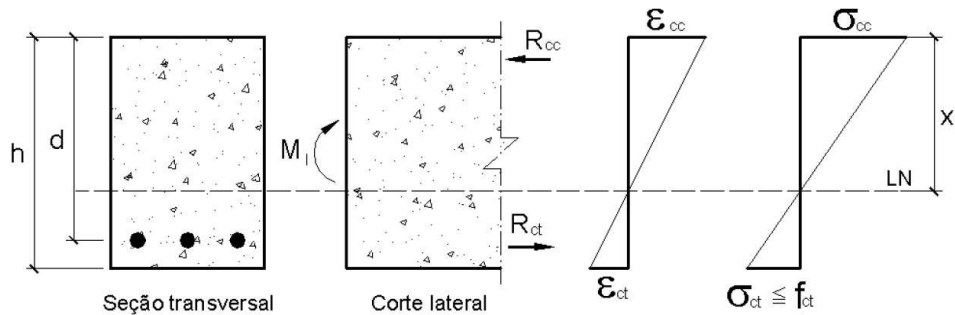
### **2.1. Aspectos gerais sobre o comportamento e modos de falha de vigas de concreto armado**

O dimensionamento de uma viga de concreto armado visa garantir que o aço e o concreto possam desempenhar adequadamente a função de resistir aos esforços solicitantes. Tendo em vista o comportamento de uma viga submetida à flexão simples, caso no qual parte da seção crítica está comprimida e parte está tracionada, objetiva-se que o concreto seja capaz de resistir à compressão e o aço, por sua vez, capaz de resistir à tração gerada. Porém, para que a armadura seja solicitada é preciso que o concreto tracionado tenha sua resistência à tração superada pelo esforço. Essa situação configura-se pela abertura das primeiras fissuras e consequente variação da rigidez da peça, o que faz com que o elemento não apresente um comportamento linear durante toda sua vida útil. Tendo em vista essa complexidade de comportamento, uma maneira comum de se analisar a resposta do elemento de concreto armado aos diferentes níveis de carregamento é através da caracterização dos estádios.

Os *estádios*, como são chamadas as fases pelas quais passa uma seção de concreto ao longo de um carregamento, distinguem-se basicamente em três situações: estágio I, estágio II e estágio III. O procedimento para se caracterizar o desempenho de uma seção de concreto consiste em aplicar um carregamento, que se inicia do zero e vai até a ruptura, passando então por essas três fases (PINHEIRO, 2007).

O *estádio I* ocorre quando as ações possuem pequena magnitude, de modo que a tensão devido à flexão permaneça inferior à capacidade resistente de tração do concreto. Assim, a peça continua íntegra, possuindo um diagrama linear de tensões ao longo de sua seção transversal e tendo seu comportamento representado pela lei de Hooke (Figura 2.1). Pinheiro (2007) cita ainda que é também nesse estágio que ocorre o cálculo do momento de fissuração, sendo esse, o valor de momento que separa o estágio I do estágio II. Dessa maneira, a armadura mínima de uma seção é calculada de modo que seja capaz de absorver, com adequada segurança, as tensões causadas pelo momento de fissuração. Portanto, o estágio I encerra-se com a formação da primeira fissura.

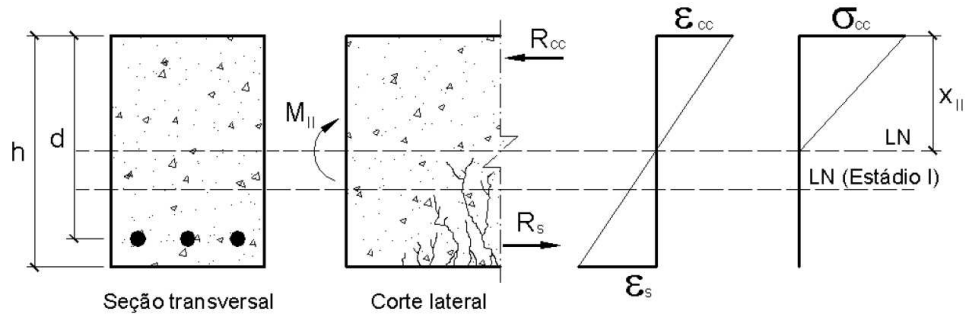
Figura 2.1 - Comportamento do concreto na flexão pura. (Estádio I).



Fonte: Pinheiro (2007).

No *estádio II<sub>0</sub>*, ou estágio II puro, o aço é o único responsável por resistir aos esforços de tração, desprezando-se, portanto, a resistência do concreto tracionado. A parte comprimida, por sua vez, continua trabalhando em regime elástico e ocorre, durante esse estágio, o aumento gradativo da tensão nas armaduras, que podem escoar caso o dimensionamento não tenha sido adequado (Figura 2.2). Acontece ainda o aumento das fissuras no sentido da borda tracionada para a linha neutra, a qual se eleva em relação à posição inicial. Além disso, como os esforços variam no decorrer do eixo longitudinal da peça, parte dela pode se encontrar no estágio II e outras partes ainda no estágio I. No caso de uma viga biapoiada, por exemplo, as seções próximas aos apoios apresentam-se isentas de fissuras até a ocorrência de ruptura (LEONHARDT & MÖNNING, 1977). A passagem do estágio II para o estágio III acontece quando se inicia a plastificação do concreto comprimido.

Figura 2.2 - Comportamento do concreto na flexão pura (Estádio II).

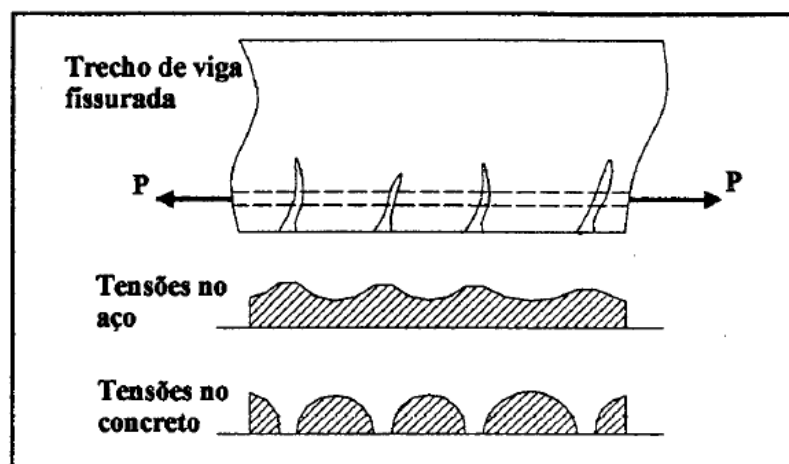


Fonte: Pinheiro (2007).

No âmbito do dimensionamento de estruturas, a conceituação de estágio  $II_0$  é utilizada como sinônimo de estágio II, ou seja, considera-se que no estágio II não exista contribuição do concreto na resistência das solicitações de tração. Todavia, a distinção entre esses dois estágios se faz necessária num estudo mais aprofundado do comportamento da peça, entendendo-se, portanto, que o *estádio II* ocorre quando, na existência de fissuração, o concreto contido entre duas fissuras adjacentes tem parte de sua resistência à tração conservada. Esse fenômeno é conhecido como *Tension Stiffening*.

Em termos gerais, Fortes (2000) explica que, nas regiões da borda tracionada, a restrição de deformação do aço, imposta pelo concreto por meio da tensão de aderência entre os dois materiais, faz com que parte da tração seja absorvida pelo concreto. Ocorre então o enrijecimento dessas regiões, provocando tensões máximas nas barras de aço, adjacentes às faces das fissuras, e mínimas na distância média entre elas, ocorrendo o oposto no concreto da mesma região (Figura 2.3).

Figura 2.3 - Variação das tensões de tração no aço e no concreto no trecho fissurado.

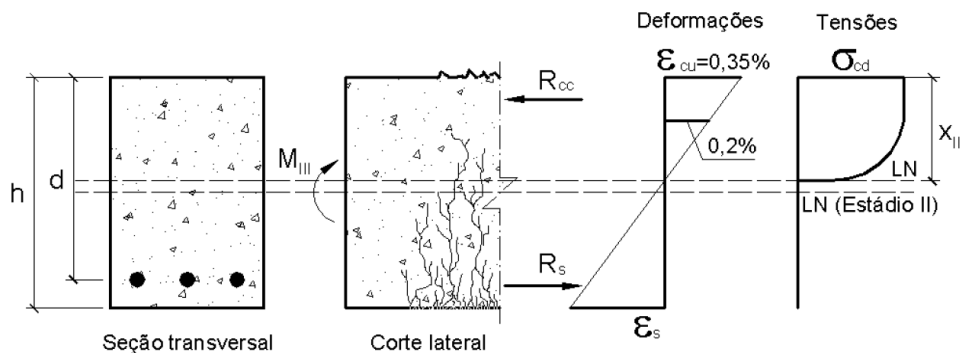


Fonte: Fortes (2000).

Alguns autores buscaram representar esse comportamento de maneira mais detalhada a fim de obter resultados analíticos e numéricos mais próximos dos empíricos. Allam *et al.* (2013) avalia o *Tension Stiffening* por meio de uma simulação numérica, que considera o comportamento não-linear do concreto, e de uma equação analítica mais simples, que considera apenas a contribuição do concreto tracionado entre a linha neutra e a fissura. Os autores comparam os valores obtidos oriundos dessas duas metodologias com aqueles estabelecidos pelos mais diversos códigos, concluindo que todos esses se encontram entre a resposta analítica e a resposta dada pelo modelo numérico. Observaram ainda que o enrijecimento proporcionado pelo concreto tracionado diminui com o aumento da razão entre a área de aço e área de concreto. Os autores concluíram também que essa redução pode se dar devido ao efeito da fluência e de ciclos de carregamento, fenômenos esses responsáveis por induzir um deslizamento adicional entre a interface de concreto e aço.

O *estádio III*, como mencionado anteriormente, tem seu início quando o concreto comprimido começa a plastificar. Nesse estágio, o concreto apresenta um alto grau de fissuração em sua região tracionada, o diagrama de tensão-deformação apresenta um formato parabólico-retangular na região comprimida e ocorrem deformações plásticas na peça (Figura 2.4). É ainda nesse estágio que ocorre na grande maioria das vezes, o colapso do elemento estrutural.

Figura 2.4 - Comportamento do concreto na flexão pura (Estádio II).



Fonte: Pinheiro (2007).

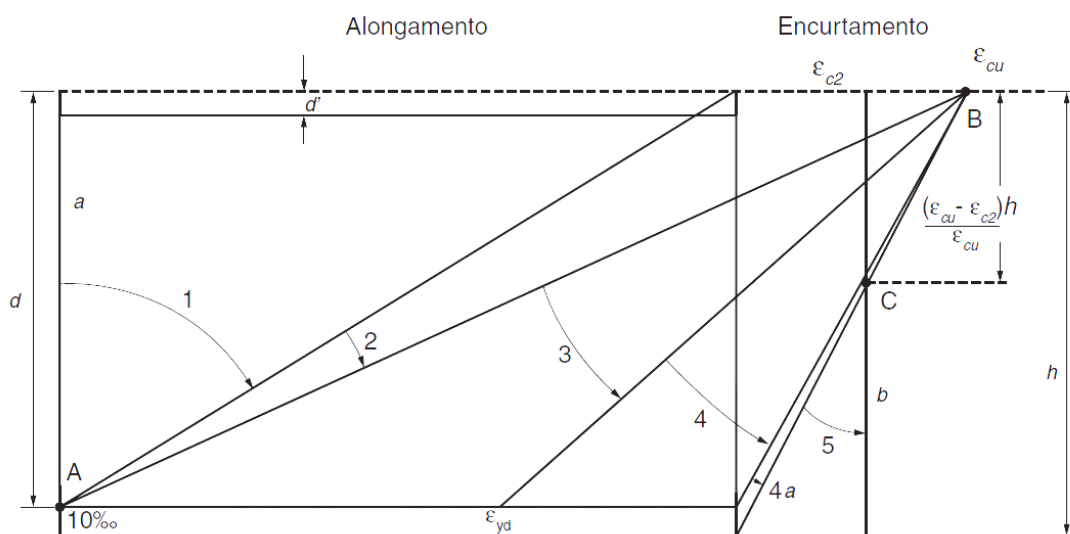
A ruptura de um elemento de concreto armado devido aos esforços de flexão pode ocorrer tanto pelo encurtamento último do concreto quanto pelo alongamento último do aço, sendo a taxa de armadura a característica que determina a ocorrência de um ou outro fenômeno no colapso.

Para os níveis usuais de armadura, a deformação limite do aço é alcançada antes do esgotamento da capacidade da zona de compressão. Isto é, ocorre a ruptura por tração na flexão, com o

rompimento do aço, a qual é anunciada através da formação de fissuras e grande deformação. No caso de estruturas superarmadas, a falha no concreto comprimido ocorre antes da deformação última da armadura, ocasionando uma ruptura por compressão na flexão. Essa, por sua vez, pode ocorrer de forma brusca e sem qualquer aviso prévio, principalmente em concretos com boa resistência. Outra configuração de ruptura, menos comum, mas igualmente temerária, ocorre quando a resistência à tração do concreto é superior à da armadura longitudinal. Nesses casos, o elemento pode romper de forma brusca com o surgimento da primeira fissura. A prevenção a esse tipo de colapso é realizada através de prescrição de uma armadura mínima, presente nas normas de dimensionamento de estruturas de concreto armado (LEONHARDT & MÖNNING, 1977). Como os esforços cortantes podem também ser representados como componentes de tração e compressão, formando assim o modelo biela-tirante, as considerações dos tipos de ruptura se fazem da mesma maneira. Pode ocorrer, portanto, falha da biela comprimida ou alongamento excessivo do tirante tracionado, composto pela armadura transversal, nesse caso.

Para compreensão ideal dos mecanismos de ruptura de elementos estruturais submetidos a esforços de flexão, alguns autores, e a própria ABNT NBR 6118:2014, utilizam o diagrama único de domínios de deformação na ruína (Figura 2.5). Sua construção é baseada nas hipóteses de que as seções transversais se mantêm planas após a deformação, de que o concreto e as armaduras possuem aderência perfeita entre si, e também de que as análises da flexão simples ou composta podem ser realizadas utilizando-se o diagrama.

Figura 2.5 - Diagrama de deformação na ruína.



Fonte: ABNT NBR 6118:2014.

Pode-se observar pelo diagrama da Figura 2.5 que a *reta a* e os domínios *1* e *2* representam o colapso da peça por deformação plástica da armadura, graficamente representada por uma rotação em torno do ponto *A*, o qual apresenta um alongamento  $\varepsilon_y$  de 10‰. Já os domínios *3*, *4* e *4a* correspondem a uma rotação em torno do ponto *B*, e dizem respeito, portanto, à ruptura do concreto comprimido, o qual apresenta um encurtamento  $\varepsilon_{cu}$  igual a 3,5‰, para concretos até C50. O domínio *5* e *reta b* ocorrem de uma rotação em torno do ponto *C* correspondente a uma deformação  $\varepsilon_{c2}$  igual a 2,0‰, também para a concretos da classe C50. Os valores de  $\varepsilon_{cu}$  e  $\varepsilon_{c2}$  são determinados conforme item 8.2.10.1 da ABNT NBR 6118:2014, tendo equações específicas para concretos mais resistentes. Em suma, na flexão, a seção fica totalmente tracionada no domínio *1*, possui esforços de tração e flexão nos domínios *2*, *3* e *4*, e se encontra completamente comprimida nos domínios *4a* e *5*.

## **2.2. Características dinâmicas das estruturas**

### **2.2.1. Generalidades**

A dinâmica das estruturas tem como objetivo principal estabelecer deslocamentos, velocidades e acelerações dos elementos constituintes de uma estrutura submetida a cargas dinâmicas, isto é, carregamentos com variação no tempo seja em magnitude, direção ou posição. Ressalta-se que, por mais que a grande maioria dos carregamentos considerados nas estruturas civis possa ter natureza dinâmica, sua baixa variação no tempo permite que esses sejam levados em conta com caráter estático (LIMA & SANTOS, 2008).

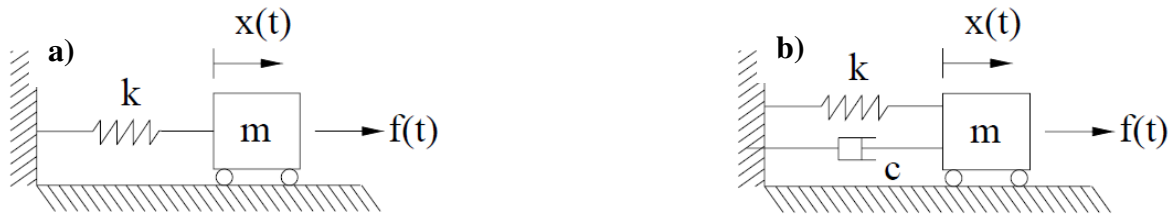
Quando os carregamentos são aplicados com velocidade de variação não desprezível, gerando esforços internos maiores que os previstos, assume-se que a estrutura está submetida a um carregamento dinâmico, podendo, através dele, chegar a um estágio de desconforto do usuário e afetar o funcionamento de equipamentos instalados devido à vibração gerada na edificação. Nesse sentido, a vibração da estrutura pode ser entendida como sendo um movimento oscilatório da estrutura em relação à sua posição de equilíbrio. Assim, pode-se dizer que todo elemento estrutural está sujeito a movimentos vibratórios, por menores e menos danosos que estes se apresentem.

Como discutido por Almeida (2005), o fenômeno de vibração pode ser mais facilmente entendido com a analogia do sistema massa-mola, no qual a inércia do elemento (massa) armazena energia cinética enquanto a mola elástica armazena energia potencial. Ocorre, pois,

um equilíbrio entre a energia potencial do movimento vibratório, ao qual a estrutura está submetida, com aquela gerada pelas forças de inércia relacionadas à massa da estrutura em movimento. Nas relações de equilíbrio de estruturas reais, soma-se a essa energia cinética a dissipação de energia que acontece devido ao atrito interno e à interação entre o sistema e o ambiente. Essa dissipação caracteriza o processo de amortecimento.

O movimento de um sistema pode ser descrito de acordo com equações diferenciais que envolvem parâmetros variáveis no tempo e baseiam-se nas *Leis de Newton*. Para retratar de maneira coerente o movimento de um determinado sistema, é necessário estabelecer o número de graus de liberdade (GDL) desse movimento, ou seja, determinar seu número de coordenadas independentes. Na Figura 2.6 são apresentados sistemas massa-mola, com e sem amortecimento, possuindo 1 GDL e movimentos descritos através das Expressões 2.1 e 2.2.

Figura 2.6 - a) Sistema de 1 GDL - massa-mola, sem amortecimento. b) Sistema de 1 GDL - massa-mola, com amortecimento.



Fonte: Almeida (2005).

$$mx''(t) + kx(t) = f(t) \quad (2.1)$$

$$mx''(t) + cx' + kx(t) = f(t) \quad (2.2)$$

em que:

$x$  é o deslocamento no tempo  $t$ ;

$x'$  é a derivada de um deslocamento  $x$  no tempo  $t$  (velocidade);

$x''$  é a derivada segunda de um deslocamento  $x$  no tempo  $t$  (aceleração);

$k$  é a constante elástica da mola ou rigidez;

$kx$  é a força elástica (proporcional ao deslocamento);

$c$  é o coeficiente de amortecimento (proporcional à velocidade).

$f(t)$  é a força aplicada em função do tempo  $t$ ;

O modelo apresentado refere-se a um movimento de vibração forçada, no qual existe a aplicação de uma força externa que participa do equilíbrio entre as energias. Nos casos de vibrações convencionalmente medidas nas estruturas, os parâmetros observados são decorrentes de vibrações livres, que tem sua energia de excitação proveniente de um deslocamento inicial ( $x_0$ ) ou velocidade inicial ( $v_0$ ) provocados por um impulso inicial. Isto é, emprega-se um esforço estimulante inicial que não é mantido durante a movimentação. Em termos da equação, o parâmetro  $f(t)$  é zerado, tendo-se assim o equilíbrio entre energia cinética, potencial e amortecimento.

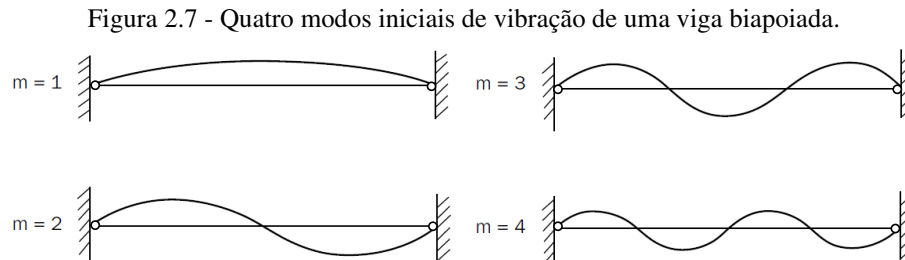
Através do desenvolvimento das equações de movimento e determinação das condições de contorno, é possível deduzir expressões que determinem parâmetros como a frequência natural de vibração e o valor do amortecimento. No caso de sistemas com múltiplos graus de liberdade (MGDL), as premissas continuam as mesmas, tendo, porém, métodos de solução mais complexos. Da mesma forma, sistemas contínuos são na maioria das vezes discretizados para que sua resolução aconteça por meio de conjuntos de equações diferenciais ordinárias. Faz-se necessária, então, a resolução de sistemas matriciais com obtenção de autovetores (modos de vibração) e autovalores (frequências naturais) na caracterização e análise do movimento.

Dentro desse contexto complexo, Nóbrega (2004) aponta os testes dinâmicos como uma ótima alternativa de determinação das características de um elemento estrutural, haja vista seu caráter não destrutivo, que permite a obtenção de informações que relacionam a massa, a rigidez e o amortecimento apresentado. Assim, o autor, ainda configura essa metodologia como sendo muito conveniente na averiguação da existência de danos, possibilitando a avaliação da integridade das estruturas, já que suas características dinâmicas estão intimamente ligadas ao estado de degradação.

### **2.2.2. Frequência Natural e Modos de Vibração**

Os *modos de vibração* (Figura 2.7) de um elemento estrutural estão relacionados com a deformação apresentada quando esse elemento vibra, a depender do mecanismo de aplicação do carregamento externo e de sua velocidade inicial imprimida. Cada modo de vibração é associado a uma *frequência de vibração natural*, que tem sua variabilidade relacionada à

quantidade de energia do sistema. Nesse sentido, o primeiro modo de vibração é aquele de menor energia sendo sua frequência natural de vibração denominada *frequência fundamental*. Essa, por sua vez, como apresenta menor valor dentre todas as outras, normalmente é a que pode acarretar problema para estruturas civis.



Fonte: Adaptado de Leissa e Qatu (2011).

A frequência natural de vibração é uma das características dinâmicas mais importantes para a análise estrutural baseada em vibrações. Isso se deve ao fato de essa grandeza depender exclusivamente da massa e da rigidez do sistema, de modo que qualquer modificação nessas propriedades altera seu valor. Sendo assim, a presença de fissuras em um elemento estrutural influencia de maneira significativa sua frequência de vibração, principalmente se a fissuração se concentra nas regiões de maior amplitude do modo de vibração correspondente (ALMEIDA, 2005). Essa característica comprova a aplicabilidade da análise de frequências de vibração de uma estrutura quando se deseja avaliar seu grau de degradação ou recuperação.

Conforme citado anteriormente, através da resolução dos sistemas de equações diferenciais oriundos das expressões que descrevem o movimento e também da determinação das condições de contorno do sistema, é possível definir sua frequência natural. Leissa e Qatu (2011), assim como outros autores, apresentam o desenvolvimento detalhado dessas equações, chegando à determinação da frequência natural transversal  $f$  de um elemento linear, dada pela Expressão 2.3. Observando essa expressão, fica evidente que ao conhecer-se o valor da frequência de vibração apresentada por um elemento estrutural é possível inferir sua rigidez:

$$f = \beta^2 \frac{1}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (2.3)$$

em que:

$EI$  é a rigidez do elemento linear;

$\rho$  é a massa específica do elemento;

$A$  é a área da seção transversal do elemento;

$L$  é o comprimento do vão;

$\beta^2$  é um parâmetro de frequência que depende do modo de vibração e das condições de contorno da peça, e pode ser considerado conforme apresentado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Parâmetro de frequência  $\beta^2$ .

Modo	A-A	E-E	E-A	E-L
1	9,869	22,373	15,418	3,516
2	39,478	61,673	49,965	22,034
3	88,826	120,903	104,248	61,697
4	157,914	199,859	178,270	120,902
5	246,740	298,559	272,031	199,860

**Condições de Contorno:** A-A: Apoiado-Apoiado; E-E: Engastado-Engastado; E-A: Engastado-Apoiado; E-L: Engastado-Livre.

Fonte: Adaptado de Leissa e Qatu (2011).

### 2.2.3. Amortecimento

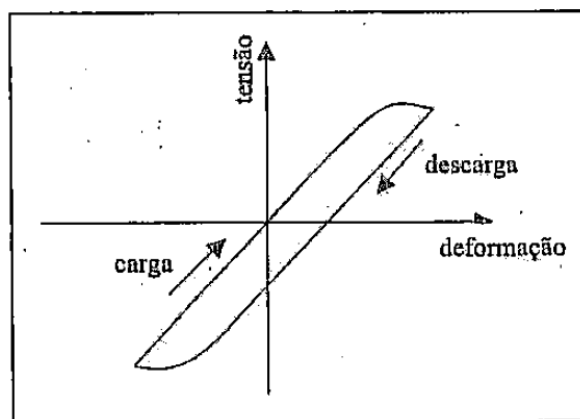
Como apresentado anteriormente, a dissipação de energia mecânica de um sistema em um movimento oscilatório de vibração, que ocorre devido ao atrito interno e à interação entre o sistema e o ambiente, é conhecida como *Amortecimento*. Esse fenômeno influencia na amplitude da vibração e no tempo de duração do movimento após o término da excitação correspondente.

Diferentemente das características de massa e rigidez de uma estrutura, o amortecimento não pode ser relacionado com um fenômeno físico único, já que pode ocorrer devido a diversas causas independentes. Dentre os principais mecanismos de amortecimento, pode-se citar o amortecimento interfacial, o amortecimento do material e o amortecimento devido ao meio fluido. (CARVALHO, 2002).

Na busca pela representação do fenômeno de amortecimento, são levantadas hipóteses que relacionam as diferentes situações que acarretam perdas de energia. Tem-se na engenharia civil, portanto, a utilização de diversos modelos mecânicos que visam retratar os mecanismos de dissipação energética em sistemas vibratórios. Com base nos principais mecanismos

mencionados anteriormente, utilizam-se os modelos do *Amortecimento de Coulomb*, do *Amortecimento de Histerese* e do *Amortecimento Viscoso*. O primeiro tipo decorre da consideração do deslizamento superficial e é proporcional à força normal atuante na superfície deslizante, ou seja, relaciona-se diretamente com o atrito interno da estrutura e desta com suas juntas e conexões. O segundo tipo de amortecimento pode também ser chamado de *Amortecimento de Material* ou *Estrutural* e considera a dissipação de energia, em forma de calor, a qual pode ser vislumbrada levando em conta a diferença na relação tensão-deformação no carregamento e descarregamento que ocorre em estruturas com a atuação de cargas cíclicas. Neste caso, a parcela central do diagrama apresentado na Figura 2.8 configura a perda de energia. O terceiro modelo de consideração do amortecimento é o mais utilizado na prática, pelo fato de levar à formulação de uma equação do movimento linear e ter também um tratamento matemático mais simples quando considerado. Ele é relacionado a questões de viscosidade do fluido no qual o sistema está imerso durante uma oscilação, sendo também função da velocidade de movimentação (LIMA & SANTOS, 2008).

Figura 2.8 - Ciclo de histerese para materiais elásticos.



Fonte: Lima e Santos (2008).

Ressalta-se que mesmo quando os sistemas oscilatórios reais apresentam um tipo de amortecimento mais complexo que amortecimento viscoso, é possível recair na maior simplicidade de seu modelo matemático. Para isso são realizadas conversões que permitem estabelecer um *amortecimento viscoso equivalente* (CARVALHO, 2002).

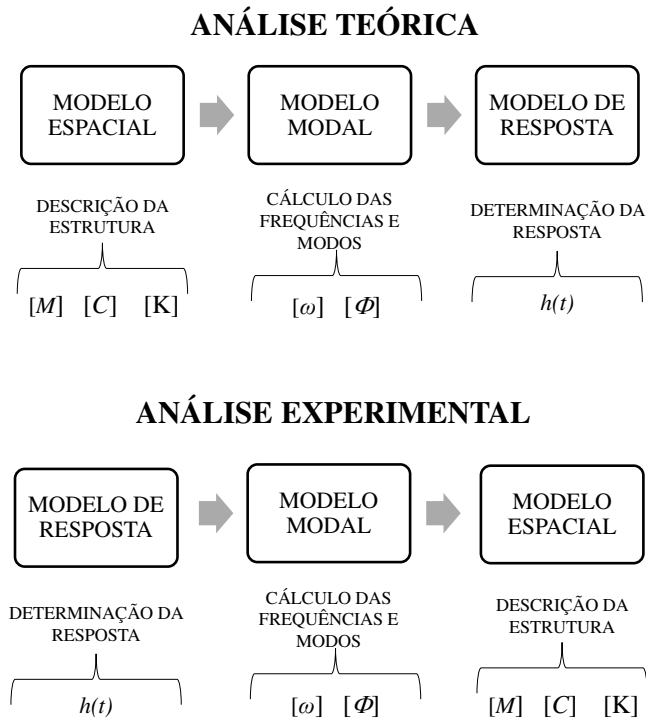
#### **2.2.4. Análise Modal**

A análise modal é um processo de avaliação estrutural que visa determinar os parâmetros modais (frequências naturais, modos de vibração e fatores de amortecimento modal). Esse processo é constituído de técnicas teóricas e experimentais que possibilitam a construção de um

modelo matemático representativo do comportamento dinâmico do sistema em estudo. Nesse sentido, em alguns casos os parâmetros modais são obtidos por meio de modelos numéricos, com utilização do Método dos Elementos Finitos, por exemplo. Em outras situações, porém, nem sequer existe o modelo ou, se existe, ainda carece de uma calibração para possuir representatividade, fazendo-se necessária uma determinação experimental dos parâmetros modais (NÓBREGA, 2004).

De maneira geral, pode-se, portanto, realizar uma *Análise Modal Teórica* ou uma *Análise Modal Experimental*. Considerando um sistema com vários GDL, tem-se inicialmente, na análise modal teórica, a definição do *Modelo Espacial* com a determinação das propriedades físicas e geométricas do sistema estrutural (matrizes de: massa  $[M]$ , amortecimento  $[C]$  e rigidez  $[K]$ ). Estabelece-se então o *Modelo Modal* composto pelas frequências naturais ( $\omega_n$ ), modos de vibração correspondentes ( $\Phi_k$ ) e fatores de amortecimento modal ( $\zeta$ ). Por meio da obtenção desses parâmetros é possível chegar ao *Modelo de Resposta*, que contém o conjunto de soluções relacionadas a excitações aplicadas em determinados pontos da estrutura para todas as frequências de uma faixa específica de interesse. Portanto, esse modelo consiste num conjunto de respostas ao longo do tempo ( $h(t)$ ) e de Funções de Resposta em Frequência (FRFs) ou de Funções de Resposta ao Impulso (FRIs). Já na análise modal experimental é feito o processo inverso. As respostas do sistema são medidas experimentalmente (FRFs, FRIs), aplicam-se métodos para a obtenção dos parâmetros modais ( $\omega_n$ ,  $\Phi_k$  e  $\zeta$ ) sendo possível assim obter as propriedades da estrutura ( $[M]$ ,  $[C]$  e  $[K]$ ) por meio de procedimentos mecanicamente adequados (Figura 2.9).

Figura 2.9 - Análise Modal Teórica e Análise Modal Experimental.



Fonte: Adaptado de Nóbrega (2004).

Uma das aplicações da análise modal é a avaliação da integridade estrutural, já que, além de os parâmetros modais terem relação direta com as características mecânicas dos elementos, dentro do espaço modal é possível desacoplar as diversas equações de movimento do sistema, resultando em vários modelos com 1 GDL.

Essa aplicabilidade se torna executável na prática devido a técnicas capazes de transformar um sinal no domínio do tempo para o domínio da frequência e assim auxiliar na obtenção dos parâmetros modais. Esse processo é o princípio básico das *Transformadas de Fourier*, que fundamentalmente transformam uma equação contínua em um somatório de termos em seno e cosseno com amplitudes, fases e períodos específicos. Nesse sentido, a FFT (“*Fast Fourier Transform*”) destaca-se, já que é geralmente a mais utilizada dentro dos softwares de aquisição de dados, e fundamental na análise estrutural dinâmica (CUNHA & CAETANO, 2006).

## 2.3. Ensaio Não Destrutivos

### 2.3.1. Generalidades

Os *Ensaio Não Destrutivos* (END) podem ser definidos como ensaios que permitem avaliar características dos materiais sem gerar nenhum dano ao elemento em análise. Essa característica

principal garante que esses ensaios possuam alta reprodutibilidade sem gerar entulhos ou resíduos nos locais de aplicação. Nesse sentido, Helal *et al.* (2015) definem que na engenharia de estruturas, o objetivo da realização de ensaios não destrutivos é determinar a qualidade e integridade de um elemento ou sistema estrutural, sem afetar sua capacidade de executar as ações pretendidas.

Almeida (2005) afirma que a realização de ensaios não destrutivos é o que viabiliza o monitoramento de estruturas em condições de serviço, que se torna necessário para avaliar a qualidade, a estabilidade, a integridade, a durabilidade e a segurança de estruturas existentes, sejam elas submetidas a ações dinâmicas ou estáticas. Soma-se a isso a possibilidade de um END gerar resultados durante toda história de carregamento, utilizando mais de um indicador (como as frequências naturais longitudinais, transversais ou torcionais, por exemplo) na obtenção de um mesmo parâmetro. Isso vai ao encontro da crescente utilização dessa metodologia na engenharia civil, havendo, portanto, uma vasta gama de procedimentos que buscam obter diversos parâmetros de avaliação estrutural.

Além dos inúmeros tipos de ensaios não destrutivos, existe também um avanço tecnológico relativo aos equipamentos para realização desse tipo de procedimento e um aumento considerável no número de trabalhos sobre o tema. Desse ponto de vista, Helal *et al.* (2005) alertam para o fato de que a falta de conhecimento sobre o tipo de material e sobre os ensaios em si são as principais causas de interpretações equivocadas dos parâmetros obtidos.

Atentando a esses problemas, Shull (2002) define alguns passos para escolha coerente de um END, sendo, portanto, necessário levar em consideração as propriedades dos materiais envolvidos, possíveis discontinuidades, os processos físicos que governam os métodos de ensaio, o potencial e limitações tecnológicos disponíveis, além de fatores econômicos, ambientais e normativos.

### **2.3.2. Ensaio Dinâmico**

Um subgrupo dos END são os *ensaios dinâmicos*, os quais têm por característica gerar informações acerca da frequência natural, amortecimento e modos de vibração de um elemento estrutural. Sendo esses parâmetros diretamente ligados às propriedades físicas da estrutura, como sua rigidez, por exemplo, a mudança nas propriedades do sistema avaliado provoca alterações nos resultados gerados pelos ensaios dinâmicos, permitindo assim correlacionar

esses fatores a fim de se realizar ponderações sobre a condição estrutural do sistema ou elemento.

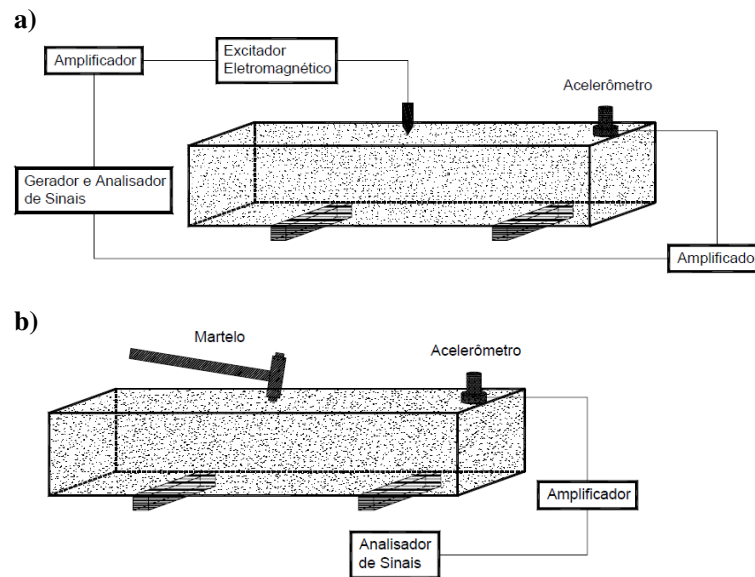
Segundo Nóbrega (2004), o emprego de ensaios estáticos é, em alguns casos, insuficiente para avaliação da segurança da estrutura, principalmente quando esta se encontra sujeita à influência de fontes de vibração. Além disso, mesmo em casos que essa situação não se configura, a utilização de ensaios dinâmicos permite uma boa avaliação do estado de integridade estrutural dos elementos, por mobilizar integralmente sua massa, sua rigidez e seu amortecimento.

Na prática, tem se mostrado efetiva a realização de ensaios dinâmicos que utilizam a mudança na frequência natural de vibração como parâmetro para detecção e localização de danos estruturais e para estimativa do módulo de elasticidade dinâmico. Salawu (1997) afirma que as frequências naturais são indicadores bastante sensíveis às alterações das propriedades do sistema estrutural e explica ainda que quando ocorre uma fissura na seção de uma viga, existe uma redução no momento de inércia, que é proporcional às dimensões dessa fissura, isso gera uma conseqüente redução da rigidez à flexão local. Ocorre, portanto, uma diminuição dos valores de frequência natural na flexão, que dependem, além do momento de inércia, do tipo de estrutura que está sendo ensaiada, das condições de contorno e da rigidez dos apoios.

Dentre os ensaios dinâmicos usuais diferem-se dois métodos: o de velocidade de propagação de pulso e o *método da frequência de ressonância*. Esse último permite definir a frequência fundamental de ressonância por meio de vibrações longitudinais, transversais ou torcionais e se mostra como um dos mais promissores na engenharia para determinar as propriedades dos materiais (ALMEIDA, 2005). Essa metodologia pode ser utilizada para se obter o módulo de elasticidade dinâmico, o módulo de elasticidade transversal dinâmico e o coeficiente de Poisson, possibilitando também uma verificação da condição estrutural do elemento em análise.

No método da frequência ressonante, um elemento de dimensões conhecidas é apoiado e tem sua frequência fundamental excitada, seja por um excitador eletromagnético (ressonância forçada) ou por meio do impacto de um martelo. Feito isso, os sinais de resposta são captados por um transdutor que converte as vibrações em voltagem de mesma frequência. Os sinais são então amplificados e enviados a um sistema de aquisição de dados (SAD) para aferição das medições (Figura 2.10). O SAD, que se comunica com software específico, transmite a leitura de aceleração, a partir da qual se obtém a frequência de vibração do elemento em análise por meio das transformadas de Fourier, citadas em 2.2.4.

Figura 2.10 - a) Método da Ressonância Forçada - Vibração Transversal; b) Método da Ressonância de Impacto - Vibração Transversal.



Fonte: Almeida (2005).

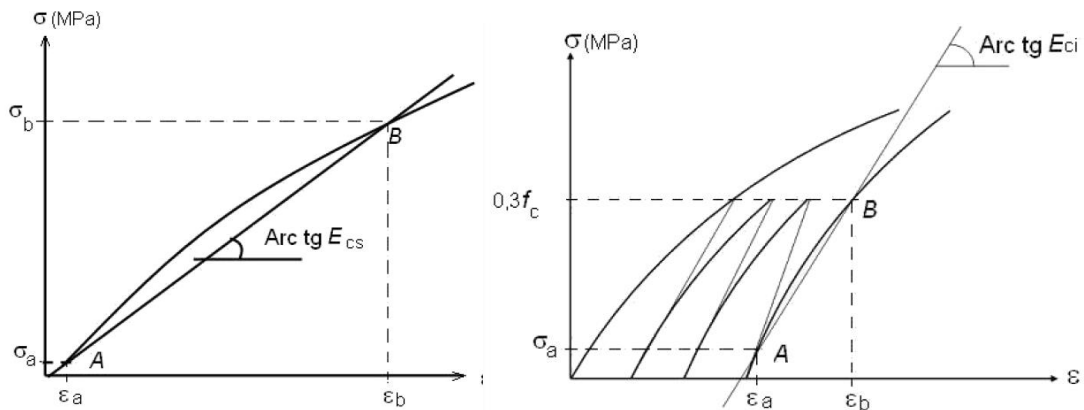
## 2.4. Estimativa da rigidez à flexão de vigas de concreto armado e avaliação do seu grau de deterioração

### 2.4.1. Módulo de Elasticidade do concreto

O *Módulo de Elasticidade do Concreto* (termo utilizado neste trabalho) ou *Módulo de Deformação do Concreto* (nome utilizado pela ABNT NBR 8522:2008, e por alguns autores que entendem o termo como mais adequado devido à variação em seu valor no decorrer de um carregamento) expressa a relação entre tensão e deformação instantânea do material. Este é um dos mais importantes parâmetros de caracterização do concreto, já que indica a deformação máxima permitida antes do material adquirir deformação permanente. Isso possibilita a identificação do grau de restrição desse material em relação aos fenômenos de alongamento e encurtamento que ocorrem devido à aplicação de um carregamento. Além disso, o módulo de elasticidade é ainda empregado nos cálculos da retração e da fluência, sendo também primordial para compreensão, estimativa e controle da formação de fissuras nos elementos estruturais. Desse modo, Leonhardt e Mönning (1977) afirmam que a correta determinação do valor do módulo de elasticidade é de suma importância para uma análise, dimensionamento e avaliação estrutural adequada.

A determinação do módulo de elasticidade pode ser realizada de diversas formas e, a depender da metodologia utilizada, encontra-se um *Módulo de Elasticidade Estático* ou um *Módulo de Elasticidade Dinâmico*. O módulo de elasticidade estático ( $E_c$ ) é a declividade apresentada pela curva tensão-deformação quando ocorre a aplicação de um carregamento uniaxial com velocidade controlada. Ele pode ser classificado como *Módulo de Elasticidade Secante* ( $E_{c,s}$ ) ou *Módulo de Elasticidade Tangente* ( $E_{c,tg}$ ). Segundo a ABNT NBR 8522:2008, o primeiro termo refere-se à inclinação da reta secante ao diagrama, definida de um valor mínimo ao ponto que equivale à tensão considerada. Com relação ao segundo termo a norma o define como sendo referente à inclinação da reta tangente ao diagrama em um ponto qualquer. A utilização do módulo tangente é mais comum para pequenas deformações, no qual existe uma equivalência entre ele e o módulo secante, fala-se em um *Módulo de Elasticidade Tangente Inicial* ( $E_{ci}$ ), sendo esse dado pela inclinação da reta tangente ao diagrama na origem (Figura 2.11).

Figura 2.11 - Representação esquemática dos módulos de elasticidade: tangente inicial ( $E_{ci}$ ) e secante ( $E_{c,s}$ ).



Fonte: ABNT NBR 8522:2008.

A determinação dos módulos de elasticidade pode ser realizada por meio da metodologia apresentada pela ABNT NBR 8522:2008 ou, alternativamente, conforme o estabelecido pela ABNT NBR 6118:2014. Essa última indica expressões (2.4, 2.5 e 2.6) para a definição dos módulos de elasticidade tangente inicial (obtido aos 28 dias) e secante, quando não forem realizados ensaios.

$$E_{ci} = \alpha_E 5600 \sqrt{f_{ck}}, \text{ para } f_{ck} \text{ de } 20 \text{ MPa a } 50 \text{ MPa} \quad (2.4)$$

$$E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \alpha_E \left( \frac{f_{ck}}{10} + 1,25 \right)^{1/3}, \text{ para } f_{ck} \text{ de } 55 \text{ MPa a } 90 \text{ MPa} \quad (2.5)$$

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

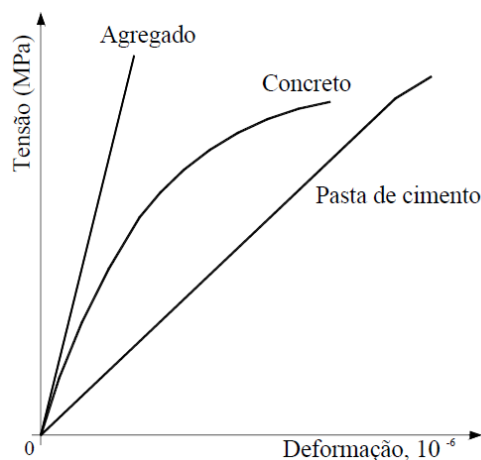
em que:  $E_{ci}$  e  $f_{ck}$  são dados em megapascal (MPa)

$$E_{cs} = \alpha_i E_{ci} \quad (2.6)$$

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

Como dito anteriormente, o módulo de elasticidade do concreto não se mantém constante durante todos os estágios de carregamento. Sendo o concreto um material heterogêneo, as mudanças em sua microestrutura exercem grande influência em suas propriedades mecânicas, principalmente na resistência e deformabilidade. Dessa forma, o módulo de elasticidade varia com o aumento do volume de vazios ou com a quantidade de microfissuras na zona de transição, a qual é caracterizada como sendo a região de ligação entre a matriz de argamassa e o agregado graúdo. Esse comportamento, dependente das características de heterogeneidade do concreto, fica evidente ao comparar-se o diagrama tensão-deformação do concreto, do agregado graúdo e da pasta de cimento (Figura 2.12), no qual se pode explicar a não linearidade do concreto com base na existência da zona de transição e de suas microfissuras, que surgem mesmo em situações de serviço, e levam à perda progressiva de rigidez (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Figura 2.12 - Comportamento tensão-deformação da pasta de cimento, do agregado e do concreto.



Fonte: Mehta e Monteiro (1994).

Dentro da perspectiva apresentada, pode-se entender o concreto como um material pseudoplástico. Isso porque a deformação não possui proporcionalidade constante com a tensão

durante todo o carregamento do material e também pelo fato de parte dessa deformação não ser recuperada depois de retirada a carga. Além disso, pode-se dizer que o progresso da microfissuração na zona de transição e na matriz faz com que a resistência do concreto a carregamentos cíclicos seja menor que a carregamento monotônicos, ocorrendo, também, a diminuição do módulo de elasticidade.

A variabilidade e complexidade do comportamento na zona de transição são fatores que tornam a determinação do módulo de elasticidade algo bastante difícil, principalmente para um tratamento analítico. Segundo Garaygordobil (2003), o comportamento não-linear do diagrama tensão-deformação inviabiliza o estabelecimento de um único valor para o módulo de elasticidade. Desse modo, o uso de ensaios dinâmicos não destrutivos é uma ótima alternativa para a determinação desse valor, pois conduz a um módulo de elasticidade do material bastante representativo, fornecendo uma ideia global da estrutura.

Mesmo sendo uma boa alternativa para avaliação de elementos de concreto, ainda não existem normas brasileiras para determinação do módulo de elasticidade dinâmico, sendo, portanto, utilizados métodos propostos por normas internacionais, como o ASTM C215-14 e ASTM C597-16. De acordo com a primeira, conhecendo-se a frequência natural de vibração de um elemento estrutural, pode-se determinar o módulo de elasticidade dinâmico e o módulo de elasticidade transversal dinâmico de seu material constituinte nas condições em que se encontra no momento do ensaio.

O módulo de elasticidade dinâmico não possui valor igual ao módulo de elasticidade estático, na maioria dos casos. Leonhardt e Mönning (1977) afirmam que para variações muito rápidas de tensão, ou seja, para elevadas frequências de oscilação, podem não se desenvolver tensões em todo o elemento analisado, de modo que este apresente menores deformações e, conseqüentemente, indique um módulo de elasticidade aparentemente maior ( $E_{c,d} > E_c$ ). Desse modo, os autores admitem que o módulo de elasticidade dinâmico não pode ser adotado para o cálculo de deformações.

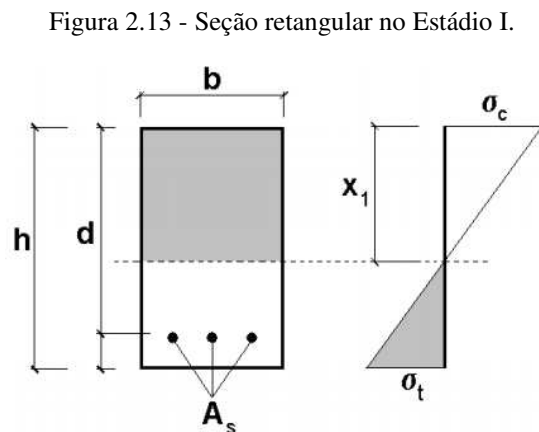
Em vista disso, vários autores buscaram relacionar o módulo de elasticidade dinâmico ao modo de elasticidade estático. Garaygordobil (2003) apresenta algumas proposições acerca da relação de proporcionalidade entre esses dois parâmetros. O autor faz uma revisão das metodologias adotadas e apresenta resultados de como a relação entre módulos de elasticidade dinâmico e

estático pode também variar de acordo com a resistência característica do concreto e com seu tempo de cura.

#### 2.4.2. Momento de Inércia da seção de concreto armado

Fisicamente, o momento de inércia de uma seção está ligado à relação entre tensões e deformações que surgem num elemento submetido a esforços de flexão. Quando maior o momento de inércia de uma seção, maior será sua resistência às deformações impostas por um carregamento que a flexiona. Esse parâmetro depende basicamente das dimensões apresentadas por uma seção transversal, sendo determinado segundo um eixo definido arbitrariamente. No caso do concreto armado, como existem dois materiais distintos, com propriedades diferentes, a determinação do momento de inércia é feita, analiticamente, por meio da homogeneização da seção.

Para uma seção retangular, isenta de fissuração (Estádio I) e com armadura simples (Figura 2.13), o momento de inércia da seção transversal homogeneizada ( $I_I$ ) é dado segundo a Expressão 2.7.



Fonte: Pinheiro (2007).

$$I_I = \frac{bh^3}{12} + bh\left(x_1 - \frac{h}{2}\right)^2 + (\alpha_e - 1)A_s(d - x_1)^2 \quad (2.7)$$

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 Expressão 2.8;

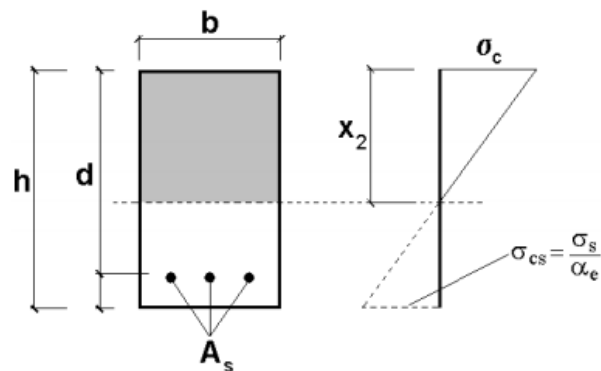
$$x_I = \frac{\frac{bh^2}{2} + (\alpha_e - 1)A_s d}{bh + (\alpha_e - 1)A_s} \quad (2.8)$$

$\alpha_e$  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 II<sub>0</sub>) e com armadura simples (Figura 2.14), o momento de inércia da seção transversal homogeneizada ( $I_{II}$ ) é dado segundo a Expressão 2.9.

Figura 2.14 - Seção retangular no Estádio II<sub>0</sub>.



Fonte: Pinheiro (2007).

$$I_{II} = \frac{bx_{II}^3}{3} + (\alpha_e - 1)A_s(d - x_{II})^2 \quad (2.9)$$

em que:

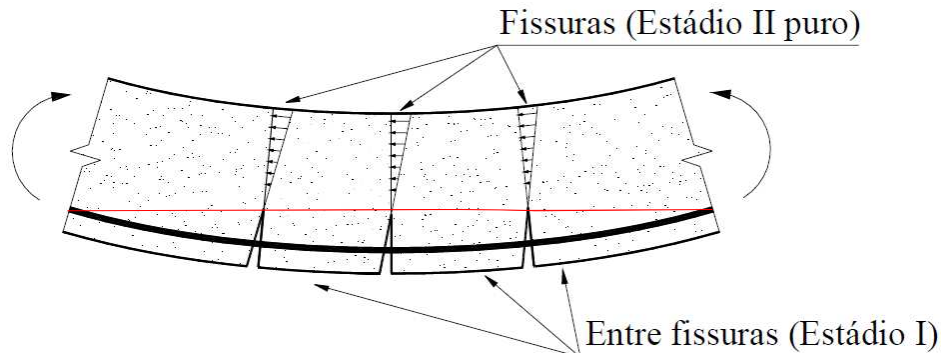
$I_{II}$  é o momento de inércia no Estádio II<sub>0</sub>;

$x_{II}$  é a posição da linha neutra no Estádio II<sub>0</sub>, dada pela solução da Expressão 2.10(2.10).

$$\frac{bx_{II}^2}{2} - \alpha_e A_s(d - x_{II}) = 0 \quad (2.10)$$

Um aspecto importante sobre o comportamento de vigas submetidas à flexão é que geralmente ocorre variação do valor do momento fletor entre as seções adjacentes ao longo do vão. Isso gera uma variação também na posição da linha neutra e, conseqüentemente, na profundidade das fissuras (Figura 2.15).

Figura 2.15 - Esquema de viga submetida à flexão com variação de altura da linha neutra (vermelho).



Fonte: Adaptado de Almeida (2005).

Antes da publicação da ABNT NBR 6118:2003, era usual a utilização do momento de inércia do estágio  $II_0$  na verificação dos ELS. Essa consideração não leva em conta a variação do momento fletor, baseando-se, portanto, no cálculo da seção mais crítica e desprezando as seções com menor solicitação. Além disso, existe uma parcela resistente não considerada no estágio  $II_0$  que é a presença de concreto íntegro entre as fissuras, o que também contribui para uma minoração do momento de inércia em relação ao que realmente ocorre. Assim sendo, a partir da publicação da ABNT NBR 6118:2003, passou-se a utilizar o conceito de inércia equivalente ( $I_{eq}$ ), dado segundo a equação de Branson (Expressão 2.11(2.11)). Esse modelo visa incluir as parcelas desprezadas na consideração do estágio  $II_0$ , aproximando o valor do momento de inércia daquilo que ocorre na realidade.

$$I_{eq} = \left( \frac{M_r}{M_a} \right)^3 I_c + \left[ 1 - \left( \frac{M_r}{M_a} \right)^3 \right] I_{II} \quad (2.11)$$

em que:

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

$I_{II}$  é o momento de inércia no Estádio  $II_0$ ;

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

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

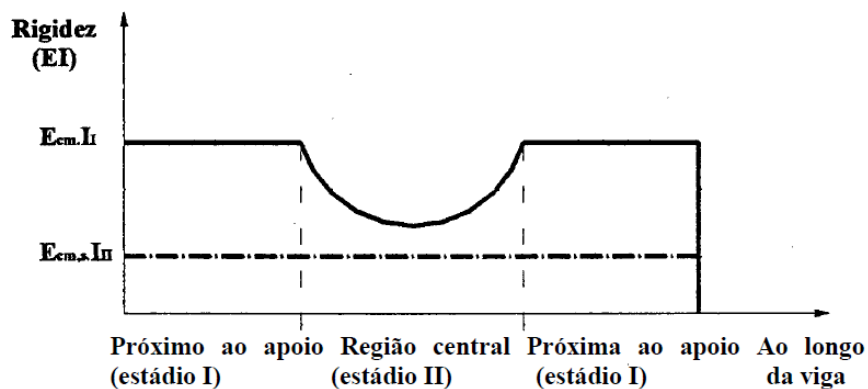
$M_a$  é o momento fletor na seção crítica, para combinação quase permanente.

### 2.4.3. Estimativa da rigidez à flexão

A rigidez à flexão ( $EI$ ) de um elemento representa sua resistência à deformação quando este está submetido à flexão, ou seja, esse parâmetro pode ser entendido como a relação entre o momento fletor e a curvatura do elemento flexionado. No caso de elementos de concreto armado, a rigidez à flexão não se mantém constante durante todas as etapas de carregamento. Isso ocorre tanto devido à deterioração do material, responsável por diminuir seu módulo de elasticidade, quando devido à perda de inércia do elemento como um todo, que ocorre devido ao processo de fissuração.

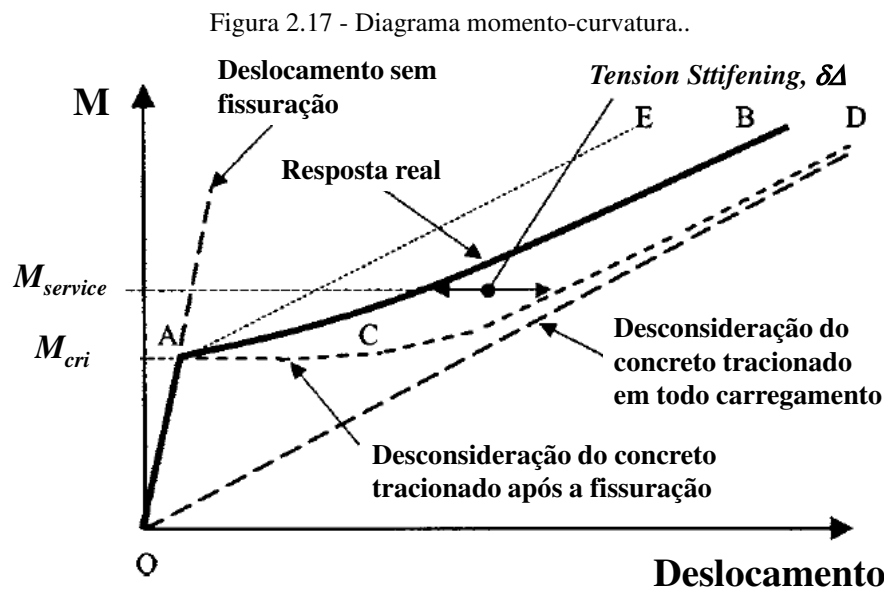
Além da variação durante os estádios de carregamento, conforme já elucidado, a rigidez do elemento flexionado possui diferenças ao longo de seu eixo axial. No início do carregamento de uma viga, por exemplo, a fissuração ocorre apenas na região central (estádio II), sendo que as regiões próximas aos apoios se encontram integras (estádio I). O aumento do carregamento faz com que a região de comportamento equivalente ao estágio II seja progressivamente aumentada e, conseqüentemente, as regiões em estágio I sejam diminuídas, até restar apenas seções muito próximas aos apoios, na iminência da ruína (FORTES, 2000). Esse comportamento pode ser representado esquematicamente por meio da Figura 2.16.

Figura 2.16 - Rigidez à flexão ao longo da viga.



Fonte: Fortes (2000).

O fenômeno de *Tension Stiffening* é também um aspecto de grande importância na estimativa de rigidez de um elemento. Por mais que não influencie na capacidade última da peça, o *Tension Stiffening* tem um papel primordial em seu comportamento em serviço, já que afeta diretamente a rigidez do elemento e, conseqüentemente, em sua deformação. Isso fica evidente quando se analisa o diagrama de momento-curvatura de uma viga de concreto armado, a qual, submetida à flexão, passa a possuir uma rigidez variável ao desenvolver fissuras (Figura 2.17). Portanto, ao se assumir que a armadura atua sozinha na resistência dos esforços de tração no estágio  $\text{II}_0$ , deixa-se de considerar um enrijecimento promovido pelo concreto presente entre as fissuras, subestimando assim a rigidez real da peça.



Fonte: Adaptado de Gilbert (2007).

Diante da complexidade na estimativa da rigidez de elementos de concreto armado em serviço, a ABNT NBR 6118:2014 sugere a utilização do modelo analítico definido por Branson (Expressão 2.11(2.11)), empregando conjuntamente o valor secante do módulo de elasticidade do concreto ( $E_{c,s}$ ). Desse modo, a norma busca realizar uma ponderação entre os estádios I e  $\text{II}_0$ , chegando a um valor mais representativo, sendo esse tratado como uma rigidez equivalente do elemento ( $(EI)_{eq}$ ) dada conforme a Expressão 2.12.

$$(EI)_{eq} = E_{c,s} I_{eq} \quad (2.12)$$

Outra maneira de estimar a rigidez de um elemento, que foi utilizada neste trabalho, é a inversão da Expressão 2.3. Isolando-se o termo  $EI$  é possível determinar a rigidez de uma peça à flexão, conhecendo-se sua frequência natural, seu modo de vibração e suas condições de contorno.

## **2.5. Reforço estrutural com manta de CFRP**

### **2.5.1. Reforço com a utilização de polímeros reforçados com fibras (FRP)**

A utilização do material polímero reforçado com fibras, já empregado com sucesso nas indústrias aeronáutica, aeroespacial, automobilística, naval e bélica, é um passo importante da evolução tecnológica da engenharia civil, o que representa um avanço na busca por materiais mais leves e com melhores propriedades mecânicas (FORTES, 2010). Conforme Souza e Ripper (1998), os polímeros reforçados com fibras (PRF) são utilizados na engenharia, quase exclusivamente, para resolver o problema de estruturas que necessitam de reforço. Entretanto, certas condições de projeto podem requerer a utilização desses materiais em substituição da armadura do concreto, sendo eles também empregados na realização de confinamento de pilares, principalmente naqueles que sustentam viadutos e pontes.

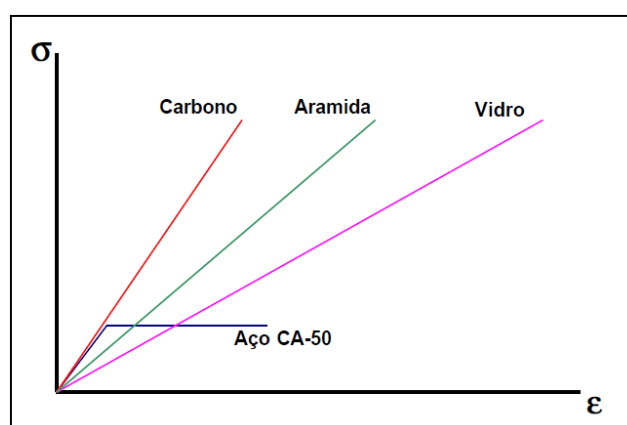
Os polímeros reforçados com fibra, ou *Fiber Reinforced Polymers* (FRP), apresentam-se como uma ótima solução para reforço estrutural, haja vista que desempenham, basicamente, a mesma função de chapas metálicas coladas, sem ser, todavia, afetados pela corrosão eletroquímica ou pela corrosão devido à presença de ácidos, álcalis, sais e outros agentes agressivos. Outra vantagem no emprego desses materiais na reabilitação estrutural é que eles se adaptam aos mais diversos formatos, aumentando ainda mais seu campo de aplicação na engenharia (BEBER, 2003). À luz desses benefícios, o ACI 440.2R-08 cita que apesar de sistemas com a utilização de polímeros reforçados com fibras serem relativamente mais caros que os convencionais, o custo final que leva em conta custo com equipamentos e instalação se apresenta por vezes menor.

Segundo Beber, Campos Filho e Campagnolo (2000), um material compósito pode ser definido, de maneira geral, como sendo uma combinação macroscópica entre dois ou mais materiais distintos que possuem uma interface distinta entre si. Nesse caso um dos materiais é o reforço enquanto o outro é uma matriz de resina polimérica. O comportamento desses materiais pode variar, a depender da natureza dos mesmos, de seu arranjo estrutural ou da interação entre seus componentes. É essa variabilidade que proporciona a grande versatilidade desses materiais,

destacando-se no caso do reforço de estruturas, os compósitos constituídos por fibras de vidro, carbono, boro e aramida.

Dentre os compósitos fibrosos, os autores colocam os Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono (PRFC), ou *Carbon Fiber Reinforced Polymers* (CFRP), como sendo os mais apropriados para reforços de vigas de concreto armado, já que as fibras de carbono apresentam um excelente desempenho mecânico, permitindo, assim, uma redução significativa nas dimensões do elemento (Figura 2.18). Além disso, a utilização de CFRP tem importância prática significativa quando as condições operacionais são desfavoráveis. Isso decorre do fácil manuseio e do baixo peso específico do material, que permite que as placas possam ser coladas sem a necessidade de escoramento. A caracterização detalhada dos CFRP será realizada no item 2.5.2 deste trabalho.

Figura 2.18 - Diagramas Tensão-Deformação.



Fonte: Beber, Campos Filho e Campagnolo (2000).

Segundo Juvandes e Figueiras (2000), as fibras tem um comportamento linear elástico, possuem ruptura frágil, com tensões últimas na ordem de 3500 MPa, módulo de elasticidade variando de 150 a 600 GPa e alongamento na ordem de 1,5%.

Os autores ressaltam que os valores característicos fornecidos pelos fabricantes devem ser considerados apenas como referência, já que esses não contabilizam a exposição ambiental a longo prazo. Em termos de dimensionamento, os valores últimos das propriedades de tração podem ser obtidos com a utilização de fatores de redução, conforme as expressões 2.13 e 2.14. Esses coeficientes, apresentados na Tabela 2.2, são aplicados apenas à tensão e deformação última e não ao módulo de elasticidade.

$$f_{f,u} = C_E f_{f,k} \quad (2.13)$$

$$\varepsilon_{f,u} = C_E \varepsilon_{f,k} \quad (2.14)$$

Tabela 2.2 - Fatores de redução  $C_E$  em função das condições ambientais.

Condições de exposição	Tipos de Sistema FRP	Valores de $C_E$
<b>Interior</b>	Carbono	0,95
	Vidro-E	0,75
	Aramida	0,85
<b>Exterior (pontes, parques de estacionamento, etc)</b>	Carbono	0,85
	Vidro-E	0,65
	Aramida	0,75
<b>Ambientes agressivos (zonas químicas, tratamento de águas, etc)</b>	Carbono	0,85
	Vidro-E	0,50
	Aramida	0,70

Fonte: Juvandes e Figueiras (2000).

Segundo Reis (2001), apesar de se apresentarem como opções para reabilitação onde é inviável a aplicação de materiais convencionais, as fibras não podem ser usadas para reparar todos os tipos de deficiência das estruturas, sendo passíveis de degradação quando submetidas a ambientes agressivos e a altas temperaturas. Além disso, Beber (2003) afirma que a intolerância a possíveis irregularidades onde o reforço é colado é um limitante considerável da metodologia. O autor ainda chama a atenção para a necessidade de se avançar no sentido de uma melhor compreensão de aspectos de projeto e detalhamento, buscando também a garantia da integridade da ligação concreto/reforço.

### **2.5.2. Polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP)**

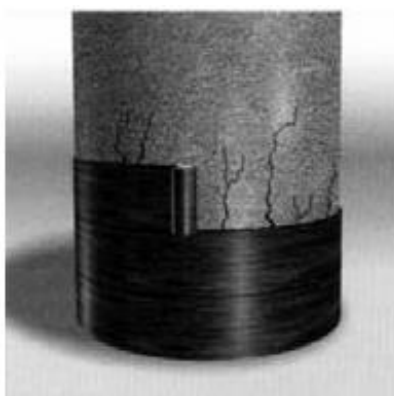
O conhecimento acerca do reforço estrutural com CRFP é bastante amplo, mesmo ainda possuindo certas limitações. O que fica evidente é que, hoje existem várias empresas que realizam a execução desse tipo de procedimento e outras tantas que fornecem os materiais necessários para tal. Várias estruturas encontram-se reforçadas com o emprego fibras de carbono, seja para melhorar a capacidade do elemento à flexão, esforço cortante ou mesmo esforço normal, no caso do confinamento de pilares (figuras 19 e 20).

Figura 2.19 - Primeiro registro de utilização de CFRP na América Latina – Viaduto de Santa Tereza em Belo Horizonte, MG.



Fonte: Arquez (2010).

Figura 2.20 - Reforço de confinamento em pilares.



Fonte: Machado (2010).

As propriedades mecânicas são os principais fatores responsáveis pelo sucesso da utilização do CFRP. Nesse aspecto, existe uma determinada distinção entre diversos tipos de materiais, pautada numa faixa de valores característicos do módulo de elasticidade, resistência máxima à tração e deformação de ruptura, conforme mostrado na Tabela 2.3, que é baseada em recomendações do ACI.

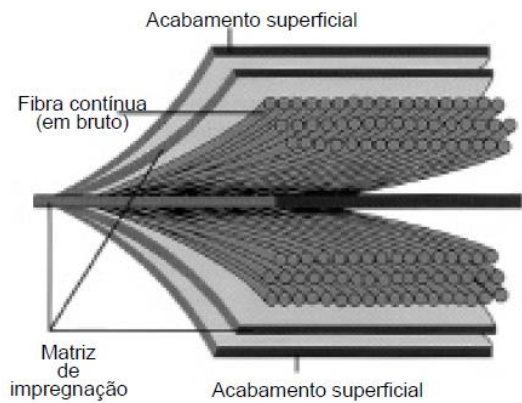
Tabela 2.3 - Propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com fibra de carbono.

<b>Tipo de Fibra de Carbono</b>	<b>Módulo de Elasticidade (GPa)</b>	<b>Resistência Máxima de Tração (MPa)</b>	<b>Deformação de Ruptura (%)</b>
De uso geral	220 – 235	<3790	>1,2
Alta resistência	220 – 235	3790 – 4825	>1,4
Ultra alta resistência	220 – 235	4825 – 6200	>1,5
Alto módulo	345 – 515	>3100	>0,5
Ultra alto módulo	515 – 690	>2410	>0,2

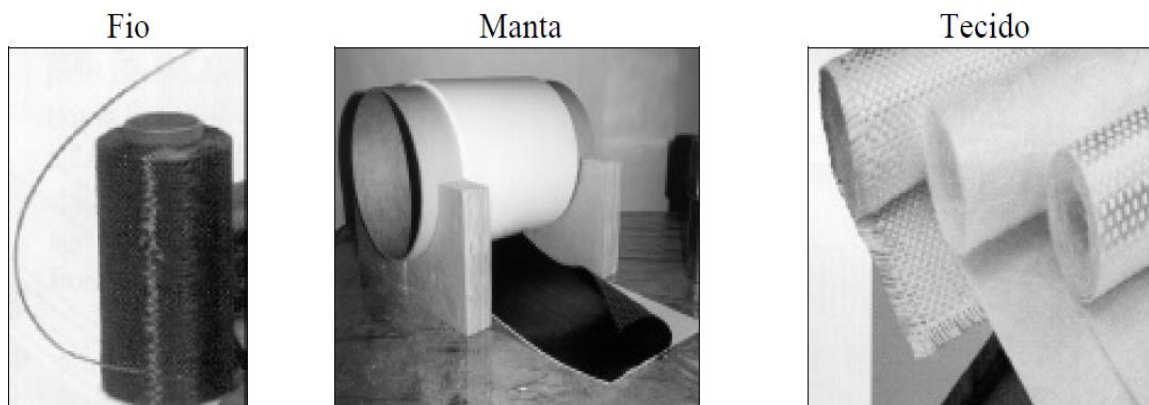
Fonte: Machado (2010).

A depender do tipo de cura do material de reforço os sistemas de reforço com CFRP podem ser classificados em *pré-fabricados* ou curados “*in situ*”. Os sistemas pré-fabricados (lâminas) se apresentam na forma de compósitos totalmente curados, com forma, tamanho e rigidez definida, estando, portanto, prontos para serem colados no elemento a ser reforçado. Tipicamente, possuem um teor de fibras em torno de 70% e espessura entre 1,0 e 1,5 mm (Figura 2.21). Por outro lado, a aplicação de feixes de fibras contínuas na forma de fios, em estado seco ou pré-impregnado, sobre um adesivo epóxico previamente espalhado na superfície a ser reforçada constitui os chamados sistemas curados “*in situ*” (Figura 2.22). Nesse sistema o adesivo tem como função, além de desenvolver propriedades de aderência do CFRP ao substrato, impregnar o grupo de fibras e proporcionar a polimerização do conjunto num compósito. Em relação aos sistemas curados “*in situ*”, os sistemas pré-fabricados têm a vantagem do maior controle de qualidade, uma vez que só as propriedades do adesivo são afetadas pela execução, apresentando como desvantagem uma menor flexibilidade (ARAÚJO, 2002).

Figura 2.21 – Sistema de CFRP pré-fabricado.



Fonte: Juvandes e Figueiras (2000).

Figura 2.22 - Sistema de CFRP curados “*in situ*”.

Fonte: Juvandes e Figueiras (2000).

Independente do sistema adotado, o emprego dos compósitos de carbono gera boas vantagens em sua aplicação. Beber (2003) apresenta alguns benefícios da aplicação de CFRP no reforço de estruturas de concreto. Segundo ele, a fibra polimérica apresenta como vantagens uma boa relação entre resistência e seu peso próprio, mantendo ainda um alto desempenho em temperaturas elevadas. O autor também destaca a questão de que em temperatura ambiente o CFRP não é afetado pela umidade e ação de vários solventes, ácidos e bases. Soma-se a isso uma vasta diversidade de características físicas, gerando grande versatilidade de aplicação e contando com um processo produtivo bem desenvolvido, o que ocasiona uma boa relação custo benefício.

Do ponto de vista de comportamento, Juvandes (1999) cita que a colagem de uma lâmina de CFRP conduz a uma maior distribuição do padrão de fissuração e a um menor valor da largura total de abertura de fissuras, em relação ao modelo de referência de concreto armado e para o mesmo nível de carga. Segundo o autor, no estágio III, após a plastificação da armadura, o desenvolvimento das fissuras passa a ser controlado pelo comportamento elástico do CFRP até à ruína. Além disso, é ressaltado o maior cuidado com as fissuras desenvolvidas devido ao esforço cortante, já que essas podem descolar prematuramente o reforço previsto.

Sob o ponto de vista executivo, Fortes (2000) apresenta uma sequência básica de atividades para realização do reforço de estruturas com o uso de CFRP. Essa sequência é dividida em duas grandes etapas, a preparação da superfície e a aplicação do sistema de reforço. De maneira geral, as atividades a serem realizadas são:

- Retirada da camada superficial do elemento, pouco resistente e impregnada de sujeira com o uso de esmeril ou, cuidadosamente, com golpes de talhadeira e marreta;

- Limpeza cuidadosa da superfície, visando à retirada de quaisquer partículas soltas, evitando ainda a presença de poeira;
- Aplicação de um *primer* para melhoria das características da camada superficial de concreto e a fixação do adesivo epóxi;
- Limpeza do reforço com *primer*;
- Mistura do adesivo epóxi;
- Aplicação de uma camada com cerca de 1 mm de adesivo epóxi sobre as superfícies da peça e do reforço, ao menos uma hora após a aplicação do *primer*;
- Colagem do reforço no elemento estrutural;
- Remoção do excesso de adesivo;
- Inspeção da qualidade do reforço aplicado;
- Proteção do reforço, com argamassa ou pintura, caso haja necessidade.

Além das precauções citadas, Araújo (2002) chama a atenção para o processo de fixação do material de reforço. O adesivo é responsável pela colagem do material compósito à superfície do concreto e pela transferência de tensões que é feita no plano da interface concreto-adesivo-compósito. Nessa área ocorrem, predominante, tensões de cisalhamento, embora possam também existir tensões normais. Portanto, a escolha do tipo de adesivo depende do desempenho desejado, do substrato, das condições do ambiente e do tipo de aplicação na execução.

### ***2.5.3. Comportamento estrutural em vigas reforçadas com CFRP submetidas a esforços de flexão***

De maneira geral, o comportamento de elementos de concreto armado reforçados com CFRP submetidos à flexão é semelhante ao de elementos que não possuem o reforço. Alguns autores entendem que as camadas de CFRP fixadas no banzo tracionado das peças comportam-se da mesma forma que a armadura no interior dessas. Dessa forma, podem-se levar em conta todas as considerações feitas no item 2.1, acerca do comportamento de elementos de concreto armado fletidos, excetuando os limites característicos nos estádios e domínios de deformação, que, evidentemente, são divergentes nos casos da estrutura simplesmente armada e da estrutura reforçada.

Juvandes e Figueiras (2000) afirmam que, assim como em estruturas convencionais, no projeto de reforços admitem-se os seguintes princípios básicos: é válido o princípio da perfeita compatibilidade de deformações entre os materiais; é atendido o princípio de *Navier-Bernoulli*;

e é satisfeito o princípio de que existe equilíbrio entre forças na seção em qualquer instante. Fortes (2000) ainda ressalta outras duas hipóteses básicas sobre o comportamento da estrutura relacionadas exclusivamente ao reforço, sendo elas: 1- Perfeita aderência entre o reforço e o substrato até o ELU, ou seja, as deformações no reforço são iguais às do concreto a ele adjacente; 2- Valores de assimetria devido a falhas na execução do reforço devem ser irrelevantes. Portanto, admitindo essas hipóteses básicas e conhecendo-se as leis constitutivas dos materiais é possível prever o comportamento de uma estrutura reforçada.

Em seu trabalho, Juvandes (1999) cita alguns autores que foram responsáveis pelas pesquisas iniciais relacionadas ao reforço com CFRP. Dentro desse contexto, o autor conclui que a melhor eficiência da aplicação dos compósitos no reforço de estruturas de concreto armado está diretamente ligada à compreensão dos mecanismos de ligação e aderência. Ainda assim, não existe um consenso geral sobre esse comportamento.

Bank (2006) também ressalta que apesar do problema de descolamento ser um dos principais causadores de falha do reforço utilizando FRP, a análise e o projeto dos sistemas de reforço à flexão FRP de acordo com o guia ACI 440.2R-02 é baseada nos pressupostos tradicionais do projeto de concreto armado. A implicação disso sob o ponto de vista do comportamento é a consideração de que não há deslocamento axial relativo (ou deslizamento) entre o sistema FRP e o concreto (isto é, compatibilidade de deformação axial existe na interface) e que a camada adesiva não deforma em cisalhamento quando transfere as forças do concreto para o sistema de fortalecimento de FRP. Supõe-se que essas premissas se mantêm mesmo após o aço interno ter cedido e a camada de cobertura de concreto entre o aço de tração e o sistema FRP estar significativamente fissurada.

#### **2.5.4. Modos de falha característicos**

Segundo Beber (2003), o incremento na resistência de elementos à flexão pode ser bastante significativo com o emprego dos compósitos de fibra de carbono. Todavia existem diversos modos de falha que, quando não entendidos e prevenidos adequadamente, podem limitar bastante esses incrementos. Segundo o autor, esses modos de falha podem acontecer com carregamentos significativamente menores que aqueles previstos pelos modelos teóricos tradicionais. Soma-se a isso, o fato de ocorrerem frequentemente de forma frágil, podendo envolver o destacamento do reforço, o arrancamento da camada longitudinal de concreto e o colapso da viga por cisalhamento.

A identificação e avaliação dos modos de falha são aspectos fundamentais para a compreensão global do comportamento dos elementos estruturais reforçados, sendo, portanto, primordiais no desenvolvimento de critérios de dimensionamento e segurança em sua análise estrutural. Desse modo, geralmente entendem-se os modos de falha de duas formas. Uma referente ao comportamento em curto prazo, que é citada por vários autores e contemplada de maneira mais direta nos manuais de dimensionamento, e outra referente ao comportamento dinâmico em longo prazo, tema que ainda conta com um número reduzido de trabalhos e é, por vezes, contemplado por simples coeficientes de segurança nos manuais de dimensionamento usuais (JUVANDES, 1999).

Num contexto geral, a literatura técnica se refere aos modos de falha de elementos reforçados com CFRP como sendo a soma dos mecanismos apresentados por peças convencionais de concreto armado com os mecanismos característicos da adição do reforço. Para elementos reforçados com CFRP submetidos à flexão, Beber (20003), Fortes (2000) e Juvandes (1999) apresentam os seguintes mecanismos de ruína principais:

- **Plastificação longitudinal da armadura:** O processo de ruína inicia-se após a armadura longitudinal ultrapassar seu limite de escoamento. Esse processo é normalmente pronunciado devido ao aumento gradativo das flechas e das aberturas de fissuras. Além disso, ele pode ser acompanhado ou não do esmagamento do concreto, já que a posição da linha neutra tende a subir, diminuindo o banzo comprimido. É um processo característico de elementos subarmados.
- **Esmagamento do concreto no banzo comprimido:** A resistência à compressão do concreto é alcançada antes que a armadura atinja seu limite de escoamento e isso gera uma ruptura sem aviso prévio, já que o elemento apresenta pouca deformação. Esse caso é característico de elementos superarmados.
- **Falha por esforços de cisalhamento:** De acordo com Leonhardt e Mönning (1977), nos elementos submetidos a esforços de cisalhamento surgem tensões principais inclinadas que determinam um comportamento que apresenta bielas comprimidas e tirantes tracionados. Caso o concreto não resista aos esforços de compressão ou a armadura transversal não resista aos esforços de tração, o elemento pode atingir seu colapso. Além disso, a fissuração decorrente da característica tração inclinada pode comprometer a integridade do elemento próximo às zonas de cortante máximo (onde existe uma

tendência do esforço em dividir seções adjacentes do elemento) ou mesmo em zonas com um momento fletor considerável (nas quais a fissuração reduz a resistência do concreto no banzo comprimido).

- Ruptura do polímero reforçado com fibras de carbono (CFRP): Esse tipo de falha ocorre quando o esforço normal de tração ultrapassa a resistência à tração do reforço de CFRP, podendo, nesse caso, ocorrer uma ruptura frágil do elemento.
- Falha devido ao destacamento do reforço: Esse tipo de falha pode ocorrer devido a irregularidades localizadas, devido a problemas na preparação do substrato, ou quando existem falhas de concretagem na peça. Além disso, pode haver o destacamento do reforço devido ao cisalhamento. Os grandes deslocamentos relativos entre faces adjacentes de fissuras geram esforços de tração praticamente perpendiculares ao reforço. Isso provoca uma fissura paralela à fita e, conseqüentemente, o seu descolamento (*sudden peel off*). Em outros casos as próprias fissuras da flexão são suficientes para destacamento do reforço, isso porque podem apresentar dimensões suficientemente grandes para ocasionar a perda de aderência na interface reforço/adetivo/substrato (*continuous peel off*). A fita de PRFC pode descolar com pequenos fragmentos de concreto ou com pedaços de concreto da região entre a armadura e reforço aderido.
- Ruptura nas regiões interlaminares da ligação: Esse tipo de ruptura ocorre quando a tensão cisalhante é maior que a aderência das interfaces concreto/adetivo ou adesivo/compósito. Além disso, esse mecanismo pode ser pronunciado devido à perda de aderência nessas interfaces, ocasionada por problemas nas características do adesivo, seja na especificação e dosagem, seja no processo de execução do reforço.

Em análise às considerações de diversos autores, Beber (2003) apresenta um resumo dos tipos de ruptura característicos (Tabela 2.4), evidenciando a posição onde ocorrem em um elemento horizontal fletido (

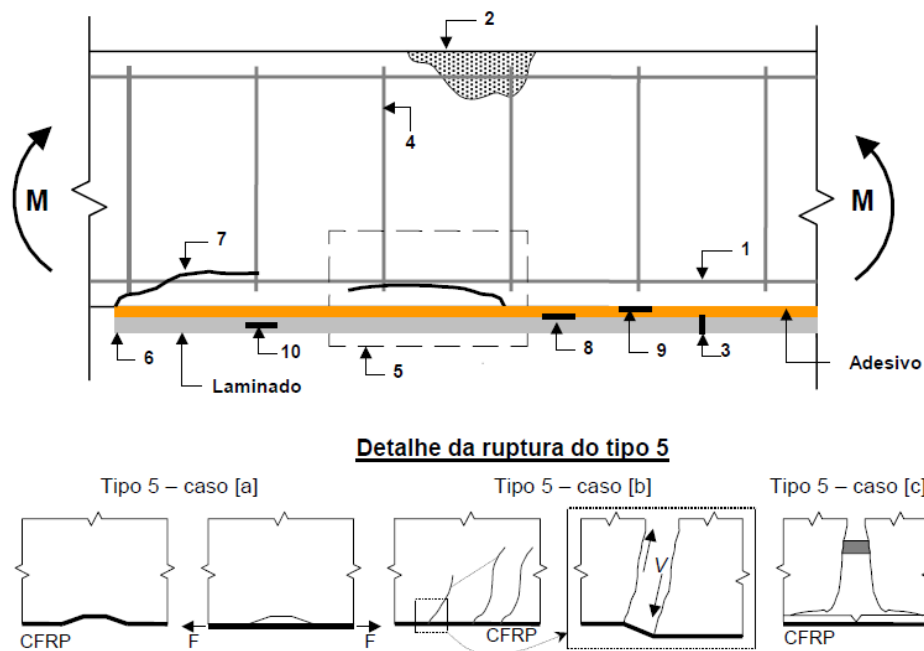
Figura 2.23).

Tabela 2.4 - Resumo dos tipos de ruptura possíveis.

<b>Ruptura clássica de estruturas de concreto armado submetida à flexão</b>	[1] Deformação plástica excessiva da armadura longitudinal;
	[2] Esmagamento do concreto
	[3] Ruptura do reforço à tração
	[4] Colapso da viga por cisalhamento
<b>Destacamento do reforço</b>	[5a] Devido à irregularidade da superfície
	[5b] Devido a fissuras de cisalhamento ( <i>sudden peel off</i> )
	[5c] Devido a fissuras de flexão ( <i>continuous peel off</i> )
Tabela 2.4 - Continuação.	
<b>Efeitos de extremidade</b>	[6] <i>peel off</i>
	[7] Arrancamento da camada de concreto junto à armadura longitudinal
<b>Ruptura nas regiões interlaminares da ligação</b>	[8] Ruptura do adesivo na interface adesivo/compósito
	[9] Ruptura do adesivo na interface adesivo/concreto
	[10] Cisalhamento interlaminar do compósito

Fonte: Adaptado de Beber (2003).

Figura 2.23 - Modos de falha possíveis.



Fonte: Beber (2003).

### 2.5.5. Dimensionamento do reforço

Em uma análise preliminar geral, Juvandes e Figueiras (2000) apresentam quatro critérios especiais de verificação da segurança associados diretamente e exclusivamente ao reforço de estruturas por colagem de elementos externos. São eles:

- condição de reforço máximo: exige-se que a estrutura possa suportar uma combinação de ações estabelecida, caso haja a ruína do reforço. Portanto, recomenda-se que o reforço não exceda mais de 50% na capacidade da estrutura;
- condição imposta pela capacidade global da estrutura: visa-se garantir que a estrutura, em seu comportamento global, possa resistir ao acréscimo de ações contemplado no projeto do reforço;
- tolerância a fogo: deve-se garantir que a estrutura reforçada mantenha sua capacidade por um tempo determinado, da mesma maneira e para as mesmas condições estabelecidas para uma estrutura semelhante sem utilização de reforço;

- restrições para reforços ao sismo: deve-se garantir o atendimento de normatizações específicas para situações de sismos, restringindo o uso e consideração do reforço quando for o caso;

De fato, assim como a maioria dos critérios de dimensionamento estrutural, a metodologia para o dimensionamento e verificação do comportamento de elementos de concreto armado reforçados submetidos a esforços de flexão baseia-se nos princípios das hipóteses do estado limite último. Este processo requer, portanto, a investigação dos diversos modos de ruptura possíveis e suas implicações sobre o comportamento dos elementos reforçados (BEBER, 2003).

Da mesma forma, segundo Juvandes e Figueiras (2000), o dimensionamento de elementos estruturais reforçados com sistemas de CFRP por colagem externa deve ser baseado na filosofia dos estados limites, conforme a maioria das normatizações para dimensionamento estrutural. Com essa metodologia, entende-se que a segurança é estabelecida em um nível aceitável em relação à ocorrência, seja em situações de serviço (ELS), seja em situação de colapso (ELU).

No Brasil não há uma normatização específica para o reforço de estruturas utilizando CFRP, porém existem várias recomendações internacionais que buscam representar analiticamente o comportamento estrutural das estruturas reforçadas. Azevedo (2008) cita como exemplo a recomendação canadense, um manual de dimensionamento criado no âmbito do programa “*Networks of Centers of Excellence*” (NCE) intitulado de “*Strengthening Reinforced Concrete Structures with Externally-Bonded Fibre Reinforced Polymers*” e um documento japonês que traz recomendações e considerações acerca do tema, chamado “*Seismic Retrofitting Design and Construction Guidelines for Existing Reinforced Concrete (RC) Buildings with FRP Materials*”. Nesse mesmo trabalho, o autor avalia e discute as metodologias sugeridas por outros dois documentos que dão diretrizes para realização do dimensionamento de estruturas reforçadas com FRP. São feitas, então, análises com base nas recomendações de dimensionamento e de verificações de segurança estabelecidas pelo *American Concrete Institute (ACI)* “*Committee 440*” e pela *Fédération Internationale du béton (FIB)* “*Task Group 9.3 (Bulletin 14)*”. O desenvolvimento dessa análise se dá por meio de comparações entre os resultados obtidos experimentalmente e àqueles previstos pelos referidos manuais.

Ao final de seu trabalho, Azevedo (2008) conclui que, em termos gerais, para análise de verificação de segurança realizada, os critérios sugeridos pelo ACI e pela FIB preveem com segurança o valor do momento último, próximo da falha dos modelos. Ele salienta, ainda, que,

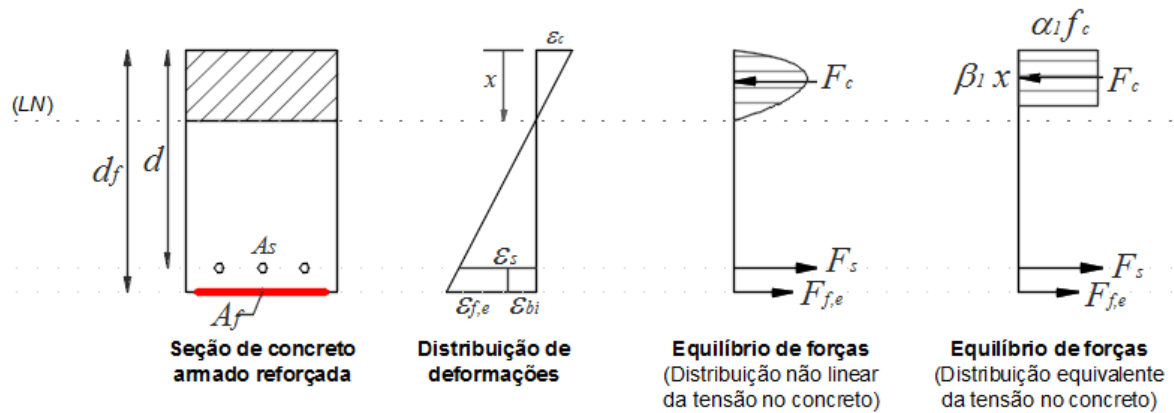
mesmo o critério do ACI sendo mais conservador que o da FIB, ambos parecem traduzir melhor o comportamento de lajes que de vigas, sobretudo se estas são reforçadas com o sistema laminado em detrimento da utilização de mantas. Além disso, segundo o autor, a aplicação do fator de redução sugerido pelo ACI para a contribuição do reforço na resistência à flexão torna os resultados um pouco conservadores, principalmente quando esse reforço é realizado com laminados, em detrimento do emprego de mantas.

Nesse sentido, Juvandes e Figueiras (2000) explicam que várias recomendações internacionais sugerem a aplicação de fatores adicionais de redução na contribuição de um reforço com sistemas FRP. Isso decorre do fato de ainda não se conhecer bem o comportamento de estruturas reforçadas, a longo prazo. Além disso, como na maioria das vezes a execução de reforço envolve estruturas existentes, com certa incerteza no nível de deterioração dos materiais, são recomendados, também para esses, fatores de redução mais conservadores do que os utilizados para estruturas novas.

Mesmo com pequenas limitações, o ACI 440.2R-08 é o manual mais seguido nos trabalhos de reforço e recuperação estrutural com CFRP realizados no Brasil, e será tomado como base para realização desta pesquisa. Ele é um documento que estabelece parâmetros para seleção, dimensionamento e instalação de sistemas de polímeros reforçados com fibras. São indicadas ainda propriedades dos materiais, modelos de dimensionamento, exemplos de instalação e aspectos sobre o controle de qualidade e manutenção dos sistemas que utilizam esses compósitos.

A verificação de um elemento estrutural reforçado com FRP externo submetido à flexão é realizada a partir das equações de equilíbrio entre as forças atuantes na seção transversal, na qual a posição da linha neutra é também uma incógnita do sistema de equações (Figura 2.24).

Figura 2.24 - Distribuição interna de esforços e tensões para uma seção retangular de concreto armado abaixo do ELU.



Fonte: Adaptado de ACI 440.2R (2008).

Com o estabelecimento do equilíbrio e a partir de informações preliminares acerca das dimensões do elemento, das características mecânicas e geométricas dos materiais que o compõe e das ações às quais a estrutura está submetida é possível seguir uma sequência de cálculo para verificar a capacidade da peça em análise.

Nesse aspecto o ACI 440.2R-08 estabelece a seguinte sequência:

- (i) Determinação da resistência e da deformação última do sistema de FRP, com a aplicação do coeficiente de minoração  $C_E$ , conforme estabelecido Expressão 2.13 e Tabela 2.2.
- (ii) Determinação do estado de tensão existente devido ao carregamento permanente. O ACI 440.2R-08 sugere que seja assumido que o elemento já esteja fissurado no momento da aplicação do reforço, utilizando-se, portanto, uma rigidez equivalente do elemento considerando uma relação  $k=0,334$  entre a possível posição da linha neutra e a posição da armadura positiva (em relação à fibra mais comprimida do elemento).

$$\varepsilon_{bi} = \frac{M_p(d_f - kd)}{(EI)_{eq}} \quad (2.15)$$

em que:

$M_P$  é o momento devido ao carregamento permanente;

$d_f$  é a distância entre a interface concreto/reforço à fibra mais comprimida;

$d$  é a distância entre o centro de gravidade da armadura positiva à fibra mais comprimida;

$(EI)_{eq}$  é a rigidez equivalente, dada conforme a Expressão 2.12, considerando o valor de  $k$  na determinação da posição da linha neutra;

- (iii) Determinação da deformação de cálculo do reforço. Bank (2006) cita que o modo de falha mais desejável é a falha de compressão de concreto após o aço interno ter escoado com o sistema de reforço de FRP ainda conectado. Porém, segundo o autor, em alguns casos essa situação não ocorre, havendo, portanto, a falha do sistema devido ao descolamento de FRP. Pode haver o descolamento do substrato de concreto, devido à falha no concreto, na camada adesiva ou no próprio laminado de FRP, tanto nas extremidades (devido às altas tensões de cisalhamento e descascamento) quanto no centro do elemento (devido à flexão e surgimento de fissuras em grandes deflexões). Métodos analíticos para prever os vários modos de falha de descolamento ainda não estão totalmente desenvolvidos e mesmo o ACI não fornece um procedimento explícito para determinar se uma falha de descolamento ocorrerá ou não. Em vez disso, o ACI limita o nível de deformação permitida no sistema de reforço de FRP para garantir que esses modos de falha não ocorram. Desse modo, a deformação de tração efetiva máxima no sistema de reforço de FRP é obtida conforme a Expressão 2.16.

$$\varepsilon_{f,d} = 0,41 \sqrt{\frac{f_c}{nE_f t_f}} \leq 0,9\varepsilon_{f,u} \quad (2.16)$$

em que:

$\varepsilon_{f,d}$  é a deformação máxima de cálculo do FRP;

$\varepsilon_{f,u}$  é a deformação última máxima do FRP;

$f_c$  é a resistência à compressão do concreto;

$n$  é o número de camadas de reforço;

$E_f$  é o módulo de elasticidade do FRP;

$t_f$  é a espessura de cada camada de FRP.

Ressalta-se que caso o valor de ruptura calculado seja maior que o limite estabelecido ( $0,9\varepsilon_{f,u}$ ), o descolamento da fibra é quem governa o dimensionamento do sistema de reforço.

- (iv) Estimativa da linha neutra. Nesse ponto, o ACI 440.2R-08 sugere que a posição linha neutra seja estimada em 20% da altura efetiva da seção, valor que é corrigido ao longo de um processo iterativo de dimensionamento.

$$x = 0,20d \quad (2.17)$$

- (v) Determinação do nível efetivo de tensão no reforço de FRP.

$$\varepsilon_{f,e} = \varepsilon_{c,u} \left( \frac{d_f - x}{x} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{f,d} \quad (2.18)$$

em que:

$x$  é a posição da linha neutra em relação à fibra mais comprimida;

$\varepsilon_{bi}$  é a deformação provocada pelo carregamento permanente antes da aplicação do reforço;

$\varepsilon_{c,u}$  é a deformação máxima do concreto;

- (vi) Determinação da deformação no concreto.

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{f,e} + \varepsilon_{bi}) \left( \frac{x}{d_f - x} \right) \quad (2.19)$$

- (vii) Determinação da deformação no aço da armadura positiva.

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{f,e} + \varepsilon_{bi}) \left( \frac{d - x}{d_f - x} \right) \quad (2.20)$$

(viii) Cálculo do nível de tensão no aço e no reforço de FRP

$$f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y \quad (2.21)$$

em que:

$E_s$  é o módulo de elasticidade do aço;

$\varepsilon_s$  é a deformação no aço;

$f_y$  é a tensão de escoamento do aço.

$$f_{f,e} = E_f \varepsilon_{f,e} \quad (2.22)$$

em que:

$\varepsilon_{f,e}$  é a deformação efetiva do FRP.

(ix) Cálculo das resultantes internas. O ACI 440.2R-08 sugere que sejam seguidas as recomendações do ACI 318-05 para verificação do equilíbrio da seção de concreto. Para tal, faz-se a conversão da distribuição parabólica de compressão do concreto para uma distribuição linear, estimando-se um valor médio de carregamento, por meio dos parâmetros  $\beta_1$  e  $\alpha_1$ , respectivamente.

$$\beta_1 = \frac{4\varepsilon_{c,0} - \varepsilon_c}{6\varepsilon_{c,0} - 2\varepsilon_c} \quad (2.23)$$

$$\alpha_1 = \frac{3\varepsilon_{c,0}\varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3\beta_1\varepsilon_{c,0}^2} \quad (2.24)$$

em que:

$\varepsilon_c$  é a deformação no concreto;

$\varepsilon_{c,0}$  é uma deformação calculada com base nas propriedades mecânicas do concreto, dada por:

$$\varepsilon_{c,0} = \frac{1,7f_c}{E_{c,s}} \quad (2.25)$$

$f_c$  é a resistência à compressão do concreto;

- (x) Verificação do equilíbrio por conferência da posição da linha neutra.

$$x = \frac{A_s f_s + A_f f_{f,e}}{\alpha_1 f_c \beta_1 b} \quad (2.26)$$

em que:

$A_s$  é a área total de aço da armadura tracionada;

$f_s$  é a resistência do aço à tração;

$A_f$  é a área total do reforço de FRP;

$f_{f,e}$  é a resistência efetiva do reforço de FRP;

Caso o valor não seja suficientemente próximo ao estimado no passo (iv) deve-se repetir todo o procedimento com a estimativa inicial de outro valor, até que o módulo da diferença entre os dois valores, estimado e calculado, não supere 1 mm – critério de convergência utilizado por Beber (2003).

- (xi) Determinação da resistência à flexão do aço e do reforço de FRP.

$$M_{R,s} = A_s f_s \left( d - \frac{\beta_1 x}{2} \right) \quad (2.27)$$

$$M_{R,f} = A_f f_{f,e} \left( d_f - \frac{\beta_1 x}{2} \right) \quad (2.28)$$

- (xii) Verificação da capacidade total da seção à flexão. O ACI 440.2R-08 estabelece o momento o que solicita a seção deve ser menor que a capacidade de resistência da mesma minorada por um fator  $\phi$ .

$$M_S \leq \phi M_R, \quad (2.29)$$

em que  $\phi$  é dado por:

$$\phi \begin{cases} 0,90 \Rightarrow \varepsilon_s \geq 0,005 \\ 0,65 + \frac{0,25(\varepsilon_s - \varepsilon_{s,y})}{0,005 - \varepsilon_{s,y}} \Rightarrow \varepsilon_{s,y} \leq \varepsilon_s \leq 0,005 \\ 0,65 \Rightarrow \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s,y} \end{cases} \quad (2.30)$$

em que:

$\varepsilon_{s,y}$  é a deformação de escoamento do aço.

Visto isso, a Expressão 2.29 pode ser reescrita como sendo:

$$M_S \leq \phi [M_{R,s} + \psi_f M_{R,f}] \quad (2.31)$$

Em que é atribuído uma minoração  $\psi_f$  à contribuição de resistência do reforço, conforme já elucidado anteriormente. O ACI 440.2R-08 sugere que esse valor seja tomado igual a 0,85 para reforços à flexão.

- (xiii) Verificação do nível de tensão no aço com a estrutura em serviço. Essa verificação deve ser realizada considerando o momento de serviço atuante ( $M_{S,s}$ ), o qual é dado, segundo o manual, pela simples soma do momento devido ao carregamento permanente com o momento devido à sobrecarga.

$$f_{s,s} = \frac{[M_{S,s} + \varepsilon_{bi} A_f E_f (d_f - kd/3)](d - kd) E_s}{A_s E_s (d - kd/3)(d - kd) + A_f E_f (d_f - kd/3)(d_f - kd)} \quad (2.32)$$

$$f_{s,s} \leq 0,80 f_y \quad (2.33)$$

- (xiv) Verificação do limite de ruptura do FRP em serviço

$$f_{f,s} = f_{s,s} \left( \frac{E_f}{E_s} \right) \left( \frac{d_f - kd}{d - kd} \right) - \varepsilon_{bi} E_f \quad (2.34)$$

Para a fibra de carbono o manual sugere a seguinte relação:

$$f_{f,s} \leq 0,55 f_{f,u} \quad (2.35)$$

Além dos aspectos relacionados à resistência dos materiais que compõe o elemento estrutural, é notável na literatura a presença constante de recomendações acerca da ligação entre o reforço e a peça reforçada. Araújo (2002), por exemplo, cita que o dimensionamento do reforço e a resistência da ligação concreto-adesivo-compósito são definidores do comportamento estrutural do elemento. Desse modo, a compatibilidade de deformações entre os materiais, admitida no cálculo do reforço, é imprescindível para assegurar a aderência e promover o ganho de resistência, rigidez ou ductilidade pretendida. O autor ainda afirma que, nos casos mais comuns, a superfície do concreto é quem limita o desempenho da ligação, de maneira que a tensão cisalhante máxima resistida está, então, diretamente ligada às condições iniciais da estrutura. Interferem, portanto, a classe e o estado de deterioração do concreto, o padrão de fissuração da camada mais externa e o tipo de preparação do substrato.

A fim de se evitar um descolamento na extremidade do reforço e garantir a transmissão dos esforços entre o reforço e a superfície de concreto, o ACI 440.2R-08 sugere critérios para a verificação da ancoragem e para dimensionamento de reforço transversal de ancoragem, quando preciso.

O manual apresenta diretrizes simples para definição da localização do corte para o laminado de FRP. Para vigas simplesmente suportadas, um laminado FRP de camada única deve ser terminado pelo menos a uma distância igual a  $l_{df}$  além do ponto ao longo do vão correspondente ao momento de fissuração  $M_{cr}$ . Para laminados de camadas múltiplas, os pontos de terminação das camadas devem ser afilados. A camada mais externa deve ser terminada não menos que  $l_{df}$  além do ponto ao longo do vão correspondente ao momento de fissuração. Cada camada sucessiva deve ser terminada em não menos que 6'' adicionais (150 mm) além da camada anterior. O valor de  $l_{df}$  é dado conforme a Expressão 2.36.

$$l_{df} = \sqrt{\frac{nE_f t_f}{\sqrt{f_c}}} \quad (2.36)$$

Caso o valor de  $l_{df}$  seja superior ao disponível no elemento em questão ou ainda a força de cisalhamento no ponto de terminação seja maior que 2/3 da resistência ao cisalhamento do

concreto (calculada conforme a Eq. 11-3 do ACI 318-05), deve-se realizar a ancoragem por reforço transversal. A área desse reforço é dada conforme a Expressão 2.37.

$$A_{fanchor} = \frac{(A_f f_{fu})_{longitud}}{(E_f \kappa_v \varepsilon_{fu})_{anchor}} \quad (2.37)$$

Em que os sufixos indicam as propriedades do reforço longitudinal e de ancoragem e que:

$k_v$  é uma constante dada por:

$$\kappa_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11900 \varepsilon_{fu}} \leq 0,75 \quad (2.38)$$

Em que  $k_1$  e  $k_2$  são dados por:

$$k_1 = \left( \frac{f_c}{27} \right)^{2/3} \quad (2.39)$$

$$k_2 = \left( \frac{d_{fv} - L_e}{d_{fv}} \right) \quad (2.40)$$

em que:

$d_{fv}$  é a altura efetiva da fibra de reforço ao cisalhamento

$L_e$  é o comprimento da ligação ativa, dado por:

$$L_e = \left( \frac{23300}{(n_f t_f E_f)^{0,58}} \right) \quad (2.41)$$

## 2.6. Reparo de concreto fissurado com injeção de resinas

Por mais que a fissuração em elementos de concreto armado seja inevitável, as fissuras, sobretudo aquelas que superam os limites estabelecidos por norma, alteram as propriedades da peça, principalmente em relação à sua rigidez. Nesse contexto, surgem métodos de recuperação baseados na injeção de resinas poliméricas nas fissuras de elementos de concreto armado. Tecnicamente, a utilização de injeções é aconselhada quando uma peça de concreto possui

fissuras que possam comprometer seu funcionamento e/ou permitir a entrada de água ou outros contaminantes no interior da estrutura (DE PAULA *et al.*, 2015).

Fay (2015) também indica que a injeção de resinas é uma metodologia empregada no intuito reparar peças de concreto fissuradas ou que sofreram delaminação, bem como para selar fissuras ou juntas em estruturas que apresentam vazamento de água. Nesse sentido, o autor cita dois tipos básicos de técnicas de injeção de resina utilizadas para reparar estruturas de concreto: uso de resinas epóxi, e uso de poliuretanos e acrilatos metacrílicos. Resinas epóxi são usadas para reconstruir estruturalmente as fissuras que estão dormentes e relativamente secas, enquanto vários poliuretanos e alguns acrilatos metacrílicos são usados para vedar rachaduras ou juntas que vazam água. Além disso, devido ao alto custo da injeção de resina, ela normalmente não é usada para reparar fissuras superficiais ou fissuras de retração. Portanto, se os reparos são necessários para esses tipos de fissuras, uma abordagem de simples vedação é geralmente mais eficaz.

De maneira semelhante, De Paula *et al.* (2015) fazem uma distinção entre dois tipos de sistema de injeção de resinas, *os rígidos e os flexíveis*. Os primeiros são utilizados para a recomposição estrutural, que é pretendida por meio do reestabelecimento do monolitismo de estruturas danificadas, visando recuperar suas condições iniciais de suporte. Nesse caso, a injeção pode ser feita com resinas à base de epóxi, poliuretano rígido e microcimento. O sistema de injeção de resinas flexíveis é empregado visando à impermeabilização e selamento de fissuras para que as estruturas possam voltar a ser estanques. Os sistemas mais usados são à base de poliuretano hidroativado, gel poliuretano e até mesmo gel acrílico, que consegue formar uma membrana flexível em pouco tempo e pode, assim, ser empregado em impermeabilizações abaixo do lenço freático.

Em geral sistemas rígidos empregam materiais que possuem alta resistência mecânica, estabilidade volumétrica, excelente aderência ao substrato e grande durabilidade. Ainda assim, existe uma diferenciação dos materiais que é feita com base em maiores especificidades de suas características de aplicação, viscosidade e resistência. Assim sendo, por meio desses parâmetros, é possível determinar qual a melhor solução a ser empregada em cada situação específica de recuperação. Na Tabela 2.5 são mostradas as diferentes classificações dos sistemas rígidos, baseados no exposto por De Paula *et al.* (2015) que tem como referência o estabelecido em normas como a EN 1504:2013 – Parte 5.

Tabela 2.5 - Classificação dos materiais utilizados nas injeções de fissuras.

<b>Materiais</b>	<b>Produto</b>	<b>Condições da fissura</b>	<b>Fissura mínima</b>	<b>Viscosidade</b>	<b>Pot life a 20°C e 50% UR</b>
<b>Resinas Epóxi</b>	Resina epóxi A	Seca	> 0,2mm	180 mPa.s	45 min
	Resina epóxi B	Seca	> 0,1mm	95 mPa.s	50 min
	Resina epóxi C	Úmida e seca	> 0,2mm	320 mPa.s	45 min
<b>Microcimento</b>	Microcimento A	Úmida e seca	> 0,5mm	45 MPa	30 min
	Microcimento B	Úmida e seca	> 0,2mm	42 MPa	60 min
<b>Poliuretano Rígido</b>	Poliuretano Estrutural A	Úmida	> 0,2mm	200 mPa.s	30 seg
	Poliuretano Estrutural B	Úmida	> 0,2mm	200 mPa.s	10 min
	Poliuretano Estrutural C	Úmida	> 0,2mm	200 mPa.s	45 min
	Poliuretano Estrutural D	Submersa	> 0,2mm	230 mPa.s	43 seg

Fonte: De Paula *et al.* (2015).

Dentre esses materiais dá-se destaque especial às resinas epoxídicas. Segundo Fay (2015), a injeção de resinas epóxi é eficiente para fissuras de 0,05mm até aproximadamente 6,3mm. Para valores fora desse intervalo a utilização dessa metodologia torna-se ineficaz ou mesmo impraticável. O autor ressalta, porém, que certas metodologias que utilizam resinas de alta viscosidade têm conseguido algum sucesso na injeção de fissuras com aberturas superiores ao limite citado.

O autor destaca ainda que a cura das resinas epóxi proporciona a formação de sólidos com alta resistência e módulo de elasticidade relativamente alto. Essas resinas se ligam ao concreto e são capazes, quando aplicados adequadamente, de restaurar a resistência estrutural original ao concreto fissurado. Mesmo com esse comportamento, deve-se atentar para algumas situações em que o alto módulo de elasticidade faz com que os sistemas de resinas epoxídicas sejam inadequados na restauração do concreto. Isso ocorre, por exemplo, quando as estruturas restauradas passarão por alta movimentação subsequente.

Sob ponto vista estrutural, Al-Nu'man e Al-Sahlani (2006) conduzem uma investigação acerca da recuperação, por meio de injeção de resinas epóxi, de vigas rompidas devido aos esforços de cisalhamento. Os autores apresentam em seu trabalho uma revisão dos estudos e dos resultados obtidos por diversas pesquisas anteriores que analisaram o comportamento de vigas reforçadas com injeção de resinas. De modo geral, o que se pode se observar é que a estrutura

reforçada se apresenta praticamente equivalente à estrutura inicial monolítica sem danos. Essa equivalência ocorreu tanto em termos da resistência final da peça, quanto em termos de sua rigidez ou até mesmo em relação à sua ductilidade.

Outro aspecto importante no trabalho dos autores é referente à verificação da pesquisa de Azis *et al.* (1989)<sup>1</sup> *apud* Al-Nu'man e Al-Sahlani (2006), que demonstrou que a injeção de resinas foi um procedimento muito satisfatório na recuperação de elementos que romperam devido à formação grandes fissuras diagonais. Nesse trabalho verificou-se que a colagem de chapas metálicas não causou ganhos significativos na recuperação de elementos com esse tipo de dado estrutural.

Foi observado também que, nos diversos trabalhos conduzidos com a injeção de resinas, um dos resultados comuns era que as fissuras injetadas não foram reabertas nos ensaios das peças recuperadas, o que ocorreu foi formação de fissuras em outros pontos, próximos àqueles injetados. A esse fenômeno Fay (2015) explica que as forças de adesão da resina epóxi podem facilmente exceder a resistência ao cisalhamento ou à tração do concreto. Isso faz com que, para carregamentos superiores que aqueles determinados no dimensionamento da estrutura de concreto armado convencional, surjam fissuras nas adjacências daquelas anteriormente injetadas. O autor ressalta que esse comportamento inviabiliza a utilização da injeção de resinas em fissuras causadas por carregamentos aos quais a estrutura estará sempre exposta, chamadas pelo autor de “fissuras de trabalho”.

Assim como qualquer procedimento de reparo de estruturas danificadas de concreto, a recuperação estrutural com injeção de resinas depende do diagnóstico e avaliação precisos das causas da deterioração. Além disso, a compreensão do comportamento estrutural e a realização de atividades numa sequência coerente são indispensáveis para o sucesso do método. Nesse aspecto, Al-Nu'man e Al-Sahlani (2006) apresentam uma série de procedimentos para conseguir restabelecer corretamente o monolitismo das peças ensaiadas, sugerindo que:

- Seja realizada inicialmente uma limpeza das fissuras e suas áreas vizinhas, eliminando-se detritos e outros contaminantes pela aplicação de ar comprimido para garantir uma boa penetração da resina e a aderência adequada da pasta (Figura 2.25);

---

<sup>1</sup> Aziz, R. J., et. al.. **Performance of Repaired Reinforced Concrete Beams Subjected to Static and Cyclic Loading.** Structural Faults and Repair 89, Proceeding International Conference on Structural Faults and Repair. Vol. 1, Held 27-29 June 1989, Venue Kensington Town, London, pp. 183-191.

Figura 2.25 - Limpeza da superfície de uma fissura usando uma pequena lixadeira.



Fonte: Fay (2015).

- Sejam feitas perfurações adjacentes às fissuras com subsequente fixação bicos espaçados de 10 a 15 cm para que possa haver penetração da resina (Figura 2.26). Ressalta-se que em alguns casos empregam-se bicos de adesão, que são colados com resina de alta resistência sobre as fissuras a serem injetadas, não sendo necessário realizar perfurações;

Figura 2.26 - Perfuração da estrutura e colocação dos bicos para injeção da resina.



Fonte: Fay (2015).

- Façam-se vedações das fissuras expostas com a aplicação de resinas numa extensão de 20 a 30 mm em ambos os lados da fenda com 2 a 3 mm de espessura para evitar a saída

de resina (Figura 2.27). Deve-se garantir a cura completa da pasta aguardando de 30 a 45 minutos para novo manuseio da peça.

Figura 2.27 - Vedação das fissuras.



Fonte: Fay (2015).

- Inicie-se o processo de injeção das resinas pelo bombeamento de resinas no bico mais baixo até que a resina possa fluir pelo bico acima deste. Isso ocorre até que a fissura seja preenchida completamente. O tempo de cura é de aproximadamente 24 horas (Figura 2.28).

Figura 2.28 – Processo de injeção de fissuras com resina epóxi.



Fonte: Al Nu'man e Al-Sahlani (2006).

- Depois que a resina epóxi é curada, removem-se os bicos e veda-se a superfície lascada.

O notável sucesso da injeção de resinas como reparo estrutural levou a pesquisas mais específicas sobre o tema. Segundo Marukha (2013), o aumento da vida residual das estruturas danificadas de concreto armado por meio das tecnologias de injeção é um problema complexo que abrange os conceitos da mecânica físico-química dos materiais e exige certas soluções tecnológicas de engenharia. O estudo do autor aprofunda-se no comportamento microscópico da estrutura sendo concentrado nos principais aspectos que contribuem para a eficiência da abordagem proposta. Estes são: a avaliação do estado de corrosão sob tensão de estruturas contendo fissuras preenchidas com materiais de vedação; a determinação dos modos de injeção; o desenvolvimento de novos materiais de injeção e inibidores de corrosão com o objetivo de combinar a recuperação de resistência com a proteção do inibidor; e o desenvolvimento de processos de recuperação de resistência por meio de injeção.

Por fim observa-se que as técnicas de recuperação estrutural são várias, portanto podem ser realizadas conjuntamente, explorando o que cada uma pode oferecer de melhor no reparo dos elementos. Nesse sentido, Karayannis e Sirkelis (2008) apresentam um trabalho que analisa o desempenho da combinação de injeção de resinas epóxi com a aplicação de lâminas reforçadas com fibra de carbono em junções de viga-pilar submetidas a carregamentos cíclicos. Nesse trabalho foi possível observar como o reforço melhorou as características da junção tanto em seu desempenho quando na capacidade de absorver energia, a ponto de os danos apresentados nos modelos reforçados ocorrerem fora da parte fortalecida.

## **2.7. Estudos realizados por outros autores**

### **2.7.1. Lima (2017)**

Lima (2017) produziu um trabalho que teve como objetivo principal realizar a avaliação do comportamento estrutural de vigas de concreto armado submetidas à degradação da rigidez, com auxílio das características dinâmicas. Para isso, o autor buscou identificar a alteração da frequência natural de vibração de modelos reduzidos de vigas de concreto armado, quando submetidas a diferentes níveis de carregamento e, conseqüentemente, com níveis de degradação diferentes. Esses modelos reduzidos possuíam dimensões nominais de 9x18x180, com armadura longitudinal de tração composta por duas barras de diâmetro variável conforme

identificação da viga e porta-estribos composto por duas barras de aço CA60 com diâmetro  $\varnothing 4.2$  mm.

Para o desenvolvimento do programa experimental e no intuito de gerar uma visão paramétrica mais ampla, foi estabelecida uma variação das características dos modelos de vigas de concreto armado. Foram propostos quatro valores de relação água/cimento ( $a/c = 0,45; 0,60; 0,70$  e  $0,80$ ) para o traço, e de três valores da taxa de armadura ( $0,41\%; 0,56\%$  e  $0,79\%$ ) que correspondem, respectivamente, ao uso de  $2 \varnothing 5,0$ ;  $2 \varnothing 6,3$  e  $2 \varnothing 8,0$ . Isso corresponde a um delineamento fatorial  $4 \times 3$ , que gerou 12 modelos distintos. Visando melhor representatividade dos resultados foram feitas 3 repetições de cada modelo, o que levou a um total de 36 vigas ensaiadas.

Para promover a degradação da rigidez das vigas de concreto armado, os modelos experimentais foram submetidos a um ensaio de flexão do tipo Stuttgart, ficando os pontos de aplicação de carga a 55,0 cm da linha de eixo do apoio. O carregamento do elemento foi realizado por meio de estágios de carga, até que se obtivesse uma próxima ao colapso. Após alcançar um determinado estágio de carga no ensaio de flexão, a carga era retirada e era aplicado um golpe na viga com o martelo instrumentado, a fim de se obter a frequência fundamental correspondente àquele estágio de carga.

Visando-se comparar os resultados, os modelos de viga foram simulados numericamente com auxílio do programa computacional Deforme v3.02-c1 e determinados por meio de um modelo analítico. Com base nisso, o autor concluiu que o procedimento para estimativa de flechas a partir das características dinâmicas descreve de forma adequada os fenômenos que ocorrem em uma viga de concreto armado submetida à flexão simples, como por exemplo efeito de *Tension Stiffening*.

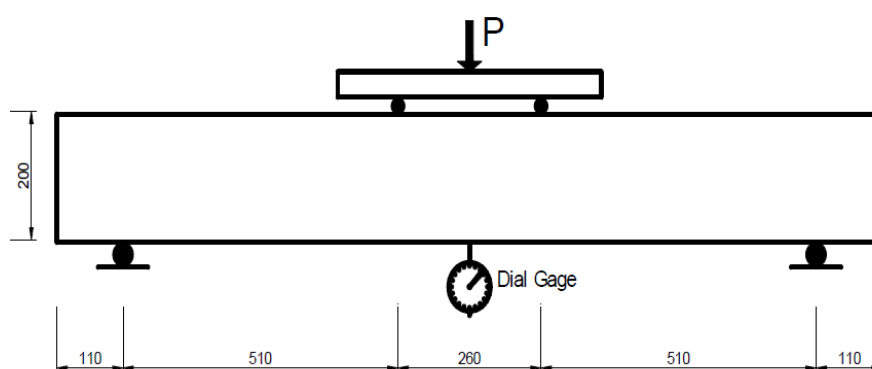
Ao final do trabalho, o autor chama a atenção para outro aspecto importante, que o fato de que os elementos estudados quando atingem o colapso ainda conservam entre 50% e 60% de sua rigidez inicial. De uma forma mais ampla, concluiu-se que a obtenção da rigidez residual e de flechas de vigas de concreto armado por meio de sua frequência fundamental, mostra-se como uma excelente ferramenta para avaliação da integridade destes elementos, podendo, portanto, ser utilizada em programas de reforço de estruturas danificadas.

### **2.7.2. Al Nu'man e Al-Sahlani (2006)**

Segundo Al Nu'man e Al-Sahlani (2006), a ruptura por cisalhamento é repentina e catastrófica, devendo ser prevenida no processo de dimensionamento. Além disso, esse tipo de ruptura ocorre devido à resultante das tensões principais, responsável por gerar fissuras diagonais no elemento que reduzem sua capacidade resistente. Por esse motivo é sugerida no trabalho a utilização de injeção de resinas epóxi, já que esse procedimento tem por princípio a recuperação do monolitismo do elemento com o preenchimento e selamento de fissuras. Sendo assim, o trabalho realizado apresenta uma investigação das características de resistência e deformação de vigas retangulares de concreto armado que falharam devido a esforços de cisalhamento e foram, posteriormente, reparadas por injeção de resinas epóxi.

Na execução do ensaio, foram utilizadas cinco vigas de concreto armado sem a colocação de armaduras de cisalhamento. Isso foi feito no intuito de se garantir que a falha das vigas ensaiadas se desse devido ao cisalhamento e não aos esforços de flexão. As vigas foram simplesmente apoiadas, e apresentavam vãos de 1,28 m, com pequenos balanços de 110 mm para cada lado, totalizando um elemento de 1,50 m. Todos os modelos possuíam seção com 100 mm de largura por 200 mm de altura e tiveram sua solicitação feita por cargas de dois pontos numa configuração simétrica, sendo de 250 mm o espaçamento entre os pontos de aplicação do carregamento (Figura 2.29).

Figura 2.29 - Configuração do ensaio de flexão realizado por Al Nu'man e Al-Sahlani (2006).



Fonte: Al Nu'man e Al-Sahlani (2006).

Após a falha dos elementos devido ao cisalhamento, que resultou na formação de grandes fissuras diagonais, um método de injeção de resina epóxi foi empregado no reparo. Os autores detalham cuidadosamente todos os passos seguidos para que o processo possa ser bem sucedido, atingindo todo o potencial da metodologia.

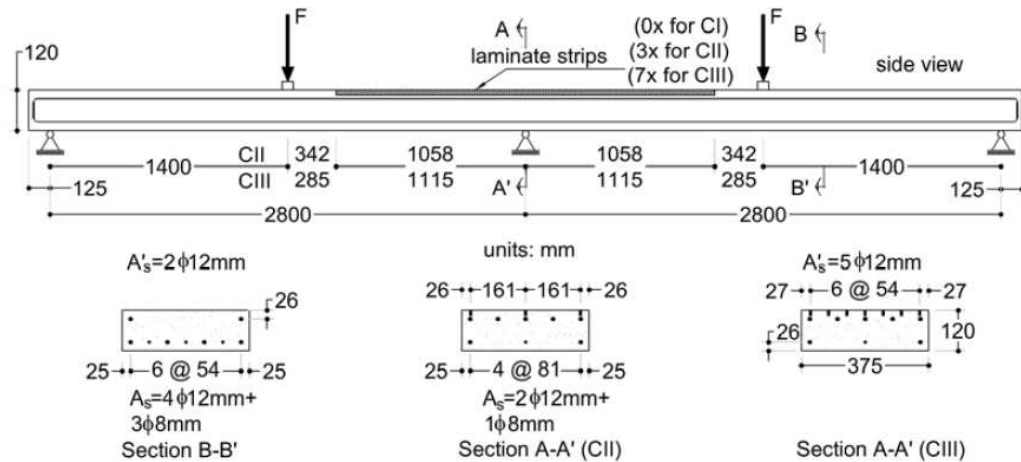
Depois de reparados, os elementos são novamente carregados de modo que ao final do trabalho as principais conclusões foram que: o método de reparo foi bem sucedido, havendo aumento ou, pelo menos, reestabelecimento da capacidade de cisalhamento das vigas; as fissuras diagonais de cisalhamento dos elementos reparados não reabrem após o novo carregamento, sendo que, em vez disso, novas fissuras de cisalhamento adjacentes às primeiras são desenvolvidas; e os elementos reparados mostram uma menor rigidez e maior ductilidade do que os elementos originais.

### **2.8.2. Salgado, Ayala e Rangel (2016)**

Segundo Salgado, Ayala e Rangel (2016), a utilização de compósitos no reforço estrutural é uma prática bastante disseminada e eficiente. Todavia, os estudos relacionados a esse método concentram-se na determinação e avaliação do aumento da capacidade estrutural última, não havendo muitos trabalhos focados na performance dinâmica desses tipos de elemento. Nessa linha de pensamento, os autores desenvolveram um trabalho cujo objetivo principal foi avaliar as respostas dinâmicas de vigas de concreto armado reforçadas com lâminas de CFRP. Para isso, foram estabelecidos parâmetros de vibração durante ensaios de flexão, nos quais o carregamento era levado até ocorrer a falha das vigas. Essa metodologia foi aplicada visando estabelecer relações entre as respostas de vibração dos elementos, antes e depois dos danos causados, e o nível de reforço aplicado às vigas ensaiadas.

No trabalho, foram utilizadas três vigas: CI, que foi o modelo de referência, construída sem reforço de CFRP; CII, modelo em que foram aplicadas 3 lâminas de CFRP; e CIII, na qual foram utilizadas 7 lâminas de CFRP. Todos esses modelos possuíam mesmas dimensões, sendo o comprimento axial igual a 5,85 m, largura de 0,375 m e altura de 0,120m. Para realização do ensaio, as vigas foram apoiadas em três pontos. Um dos apoios se encontrava no meio da viga e os outros próximos às extremidades, salvaguardando um balanço de 0,125m para cada lado. Desse modo, ficaram configurados vãos de 2,80m, onde eram aplicados carregamentos concentrados em seu ponto central (Figura 2.30).

Figura 2.30 - Configuração do ensaio realizado.



Fonte: Salgado, Ayala e Rangel (2016).

Para realização da avaliação dinâmica, foram colocados 8 acelerômetros na estrutura e determinadas as frequências de vibração de seis modos de vibração diferentes. Esse processo foi feito para todas as três vigas, antes e depois da ruptura, visando assim estabelecer como se deu a perda de rigidez de cada modelo.

Para validar os resultados encontrados experimentalmente, foi proposto um modelo numérico de elementos finitos (MEF) das vigas de concreto armado reforçadas. As propriedades deste modelo foram calibradas usando os parâmetros modais experimentais enquanto os danos ocasionados pelo carregamento foram simulados modificando o módulo de elasticidades ao longo do comprimento das vigas.

Ao final do trabalho os autores concluíram que, por meio da identificação modal das três amostras, ficou claro que os laminados de CFRP adicionados às vigas não modificaram significativamente sua resposta dinâmica, mesmo quando sua carga estática final, em comparação com o caso sem reforço, aumentou consideravelmente.

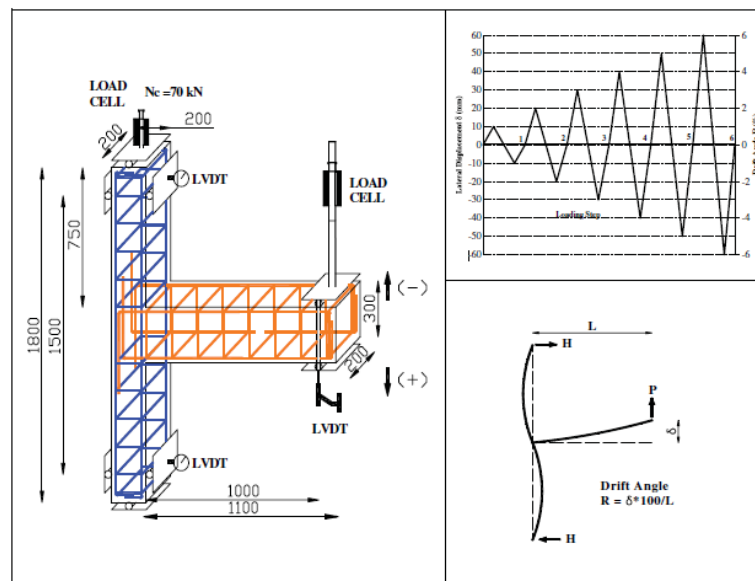
#### **2.8.4. Karayannis e Sirkelis (2008)**

Em seu trabalho, Karayannis e Sirkelis (2008) apresentaram resultados de uma investigação experimental sobre o comportamento de ligações viga-pilar reparadas e/ou reforçadas com uma combinação de injeções de resina epóxi e polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP). Os autores buscaram associar as duas práticas à modificação do comportamento da ligação quando submetida a um carregamento cíclico. Esse procedimento foi realizado como forma de simular problemas estruturais advindos das ações sísmicas, um conteúdo de extrema

importância para a engenharia que ainda possui vertentes pouco exploradas, devido a sua complexidade.

O programa experimental compreendeu 12 corpos de prova que reproduziam conexões viga-pilar. Todos os espécimes apresentavam mesma geometria: a coluna possuía um comprimento axial total igual a 1800 mm e uma seção transversal constante de 200x200 mm; a viga, por sua vez, possuía um comprimento total de 1100 mm e uma seção transversal; de 200x300 mm (Figura 2.31).

Figura 2.31 - Modelo estrutural do ensaio realizado e história do carregamento cíclico utilizado.



Fonte: Karayannis e Sirkelis (2008).

Foram utilizados 2 grupos de corpos de prova diferentes, A e B, sendo que a diferença principal entre eles foi que no espécimes do Grupo B foram aplicados quatro estribos na área da ligação para evitar a falha nessa área.

Ao final do estudo e com a observação das respostas dos espécimes examinados, os autores concluíram que a técnica de injeções de resina epóxi é apropriada para a reabilitação total da capacidade sísmica das articulações, uma vez que não foram observados danos na área das articulações dos espécimes após o reparo. Além disso, os autores observaram que a combinação desta técnica com o uso de lâminas de CFRP leva a uma melhoria significativa da capacidade de carga, da absorção de energia e da ductilidade. Ficou evidenciado ainda que o uso combinado das duas técnicas de reparo leva a um dano menos propício a gerar um colapso progressivo, quando comparado aos modos de danos dos modelos de controle.



# 3

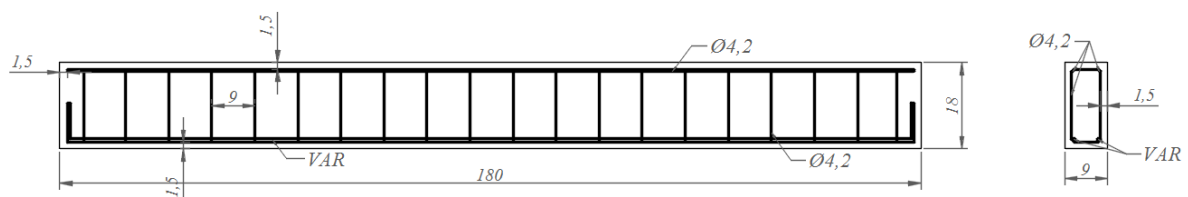
## MATERIAIS E MÉTODOS

Neste Capítulo são apresentadas as características dos modelos utilizados no programa experimental, as propriedades e especificações dos materiais de reforço, as técnicas de reabilitação empregadas, a descrição da instrumentação e dos equipamentos utilizados e a metodologia adotada para avaliação estrutural dos elementos reforçados.

### 3.1. Características dos modelos experimentais danificados

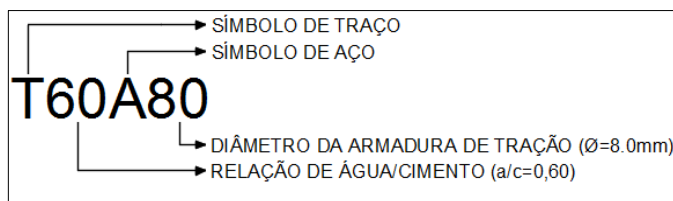
Os modelos utilizados para realização deste trabalho foram produzidos e ensaiados no âmbito da pesquisa de Lima (2017). O autor produziu elementos com mesmas dimensões nominais e com diferentes relações de água/cimento, variando ainda a armadura de tração utilizada. Na Figura 3.1 é possível observar a configuração do elemento, bem como suas dimensões nominais.

Figura 3.1 - Modelo ensaiado por Lima (2017).



Na identificação desses elementos foi empregada a letra T (símbolo de traço), seguida pela relação de água/cimento ( $a/c$ ) adotada, e a letra A (símbolo de aço) seguida por um número que representava a bitola da armadura de tração adotada (Figura 3.2). O autor adotou quatro relações  $a/c$  e três taxas de armadura diferentes. Além disso, para cada modelo de mesmo traço e mesma taxa de armadura, foram confeccionados três exemplares, identificados como R1, R2 e R3. Neste trabalho foi utilizada a série T60, ou seja, foram tomados todos os 9 exemplares produzidos com um concreto de relação água/cimento igual a 0,60 (Tabela 3.1).

Figura 3.2 - Identificação adotada para os modelos de viga de Lima (2017).



Fonte: Lima (2017).

Tabela 3.1 - Identificação dos modelos utilizados.

Modelo	Características		
	a/c	$A_s$	$A_s'$
<b>T60A50</b>	0,6	2Ø 5.0	2Ø 4.2
<b>T60A63</b>	0,6	2Ø 6.3	2Ø 4.2
<b>T60A80</b>	0,6	2Ø 8.0	2Ø 4.2

Na pesquisa de Lima (2017) os elementos foram levados a um nível de tensão no qual houve a ocorrência de falha devido ao escoamento do aço. Para verificar as características desses elementos foi então necessária, além de uma averiguação dos resultados e parâmetros obtidos pelo autor, uma avaliação do nível de degradação dos modelos. Para tal, foram feitas inspeções visuais, medição do espaçamento entre fissuras, verificação do tamanho de abertura dessas fissuras e observação de sua configuração ao longo do elemento. Foi medida ainda a flecha residual presente nas vigas.

Na inspeção realizada, todas as fissuras visíveis a olho nu foram identificadas e numeradas. A determinação da posição dessas fissuras foi feita por meio de medições realizadas a partir de uma das extremidades da viga com auxílio de uma trena. A determinação da abertura dessas fissuras foi feita com um fissurômetro, que permite a aferição da abertura por meio de comparação visual com as marcações do instrumento. Como a fissura não é paralela à extremidade de referência e, além disso, apresentava variação em sua abertura ao longo da base do elemento, foram realizadas três medições em cada um dos casos. Por fim, foram aferidas as extensões das fissuras, sendo realizadas medições em ambos os lados do elemento. Os valores medidos, bem como a média desses valores, são apresentados no Apêndice B.

Na Tabela 3.2 é apresentado um resumo das características gerais das vigas utilizadas no desenvolvimento do trabalho. Essa tabela contém os dados advindos da pesquisa de Lima (2017) e as aferições feitas nos elementos danificados. Ressalta-se que a flecha foi medida

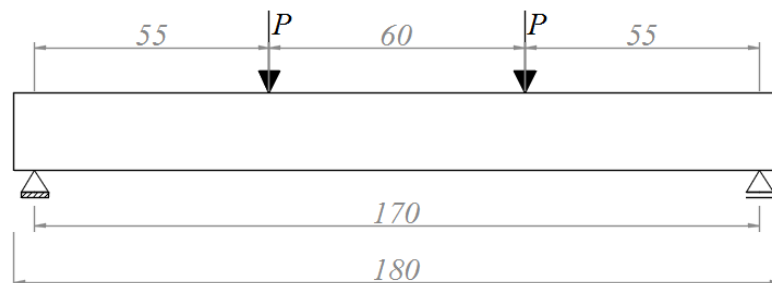
no centro do vão, com o auxílio de um paquímetro, dos dois lados da viga que estava apoiada em piso plano, com sua concavidade voltada para baixo conforme mostrado na Figura 3.4-a.

Tabela 3.2 - Características gerais dos modelos danificados.

Modelo	T60A50			T60A63			T60A80			
	Exemplar	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3
Características	$E_s$ (MPa)	210000			210000			210000		
	$f_c$ (MPa)	50,2			50,2			50,2		
	$f_{ct,m}$ (MPa)	3,6			3,6			3,6		
	$E_c$ (MPa)	26880			26880			26880		
	Carga Última (kN)	19,61	19,43	19,82	26,64	26,40	25,66	43,96	47,75	48,06
	Flecha (mm)	15,28	14,62	14,73	14,53	15,08	14,74	20,06	20,15	20,04
	Freq (Hz)	55,48	54,30	58,19	66,24	65,10	66,09	66,27	62,02	63,51
	$EI \times 10^5$ (inic.) (Nm <sup>2</sup> )	9,71	10,52	10,87	9,84	9,61	9,89	9,80	9,91	10,34
	$EI \times 10^5$ (final) (Nm <sup>2</sup> )	4,12	3,80	4,37	5,62	5,43	5,60	5,66	4,95	5,20
	Deg EI	42,39%	36,18%	40,20%	57,12%	56,48%	56,60%	57,72%	50,01%	50,26%
	Nº de fissuras	6	6	6	4	4	5	6	8	8
	Distância média entre fissuras (cm)	11,14	11,51	11,36	15,91	15,79	14,18	9,10	8,41	8,77
	Maior fissura (mm)	0,70	0,83	0,77	0,90	0,60	0,70	0,63	0,70	0,53
	Menor fissura (mm)	0,23	0,20	0,20	0,20	0,40	0,30	0,30	0,40	0,13
	Flecha perm. (mm)	4,81	4,62	4,62	4,35	4,61	4,67	7,11	11,17	8,10
	$\varepsilon_{b,i}$ (‰)	1,89	1,86	1,91	1,85	1,92	2,01	2,94	4,79	3,01

Na última linha da Tabela 3.2 é apresentado o valor de  $\varepsilon_{b,i}$ , dado em ‰. Esse valor representa a deformação residual na face inferior do elemento, sendo um dos parâmetros utilizados para o dimensionamento da fibra, conforme apresentado no item 2.5.6. A estimativa desse valor foi feita com base nos aspectos geométricos da viga deformada. Isto é, determinou-se  $\varepsilon_{b,i}$  tendo em vista a flecha residual medida no centro do vão. Isso foi feito por meio de uma análise inversa da equação da linha elástica para vigas biapoiadas com vão  $L$  e carregamento concentrado em dois pontos (Figura 3.3) e da equação da deformação elástica (expressões 3.1 e 3.2, respectivamente). Mais detalhes dos modelos são apresentados na Figura 3.4.

Figura 3.3 - Modelo estrutural do ensaio de flexão realizado.



$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{Pa}{24EI} (3L^2 - 4a^2) \Rightarrow \frac{1}{EI} = \frac{24 \delta_{m\acute{a}x}}{Pa (3L^2 - 4a^2)} \quad (3.1)$$

$$\varepsilon_{b,i} = \frac{My}{EI} = \frac{Pay}{EI} \Rightarrow \frac{1}{EI} = \frac{\varepsilon_{b,i}}{Pay} \quad (3.2)$$

em que:

$\delta_{m\acute{a}x}$  é a flecha no centro do v\~ao;

$a$  é a dist\~ancia entre a o apoio e o ponto de aplica\~cao da for\~ca;

$L$  é o v\~ao da viga;

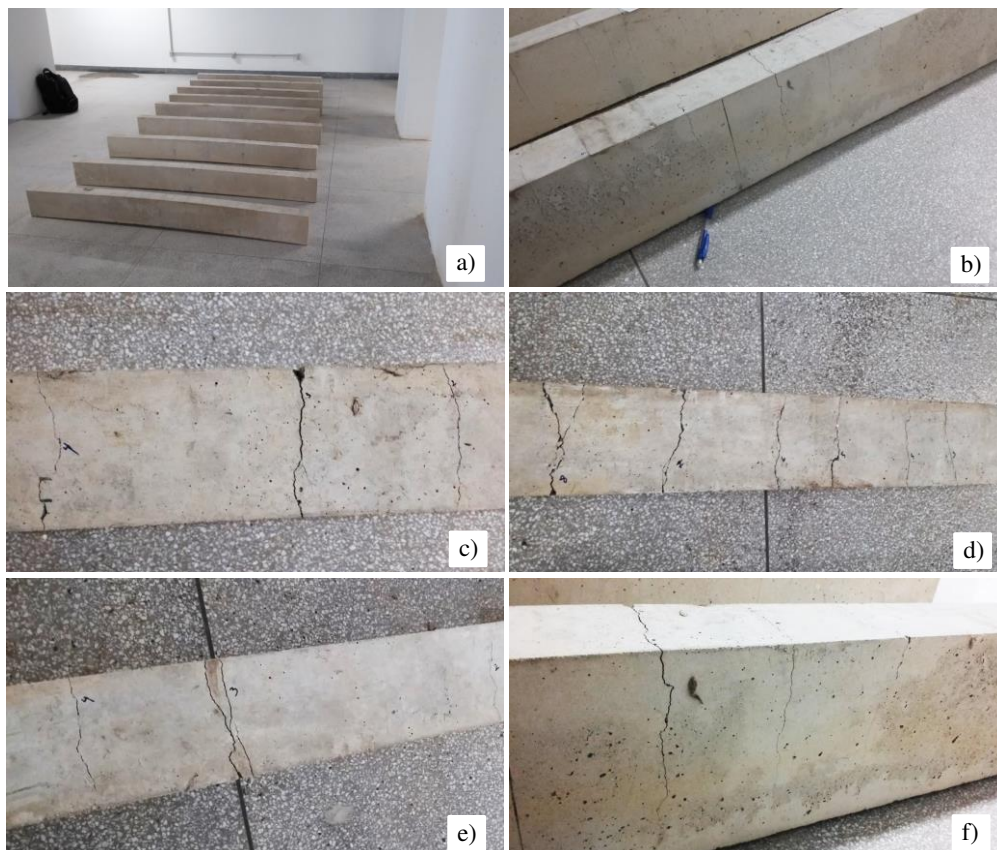
$y$  é a dist\~ancia da linha neutra at\~e a fibra mais tracionada;

$P$  é a for\~ca concentrada.

Portanto:

$$\frac{24\delta_{m\acute{a}x}}{Pa \times (3L^2 - 4a^2)} = \frac{\varepsilon_{b,i}}{Pay} \Rightarrow \varepsilon_{b,i} = \frac{24\delta_{m\acute{a}x}y}{(3L^2 - 4a^2)} \quad (3.3)$$

Figura 3.4 - a) Modelos danificados; b) Evid\~encia da exist\~encia de flecha residual no modelo T60A50-R1; c) Fissuras na face inferior do modelo T60A50-R1; d) Fissuras na face inferior do modelo T60A80-R2; e) Fissura dupla na face inferior no modelo T60A63-R1; f) Extens\~ao de uma fissura no modelo T60A80-R2.



## **3.2. Execução da recuperação estrutural nos modelos experimentais**

### ***3.2.1. Considerações preliminares***

Conforme estabelecido nos objetivos do presente trabalho, foi empregada uma técnica de recuperação estrutural para reabilitação dos elementos danificados, a injeção de fissuras com resinas epóxi, e uma técnica de reforço estrutural para aumento da capacidade portante desses modelos danificados, a colagem de CFRP na parte tracionada da viga.

O dimensionamento do reforço à flexão com CFRP foi realizado conforme o estabelecido pelo ACI 440.2R-08, seguindo a sequência de cálculos apresentada no item 2.5.6. Esse dimensionamento foi feito para cada elemento de acordo com a carga máxima encontrada por Lima (2017), cujos valores são apresentados na Tabela 3.2. A sequência de cálculos para dimensionamento do reforço à flexão, bem como a determinação da ancoragem de cada elemento específico se encontram no Apêndice A.

Conforme apresentado no item 2.6, o entendimento do processo de fissuração é essencial para a escolha do tipo de resina a ser utilizado na injeção. No presente trabalho, todas as fissuras catalogadas foram decorrentes das deformações plásticas das vigas ensaiadas. Isto é, eram fissuras “secas” e estruturais, nas quais é recomendado o uso do sistema de injeção com resinas rígidas.

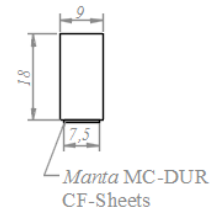
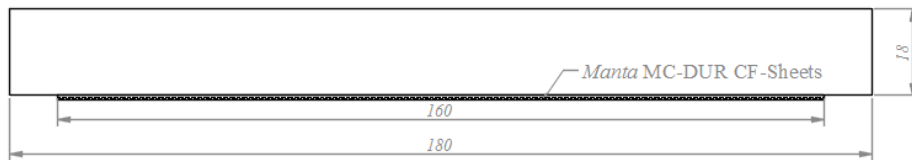
As fissuras apresentavam aberturas que variavam de aproximadamente 0,1 mm até 0,9 mm. Devido a essa gama de valores, foram empregadas duas resinas na injeção. Uma delas (MC-Injekt 1264 Compact) é recomendada para fissuras com aberturas superiores a 0,3 mm, enquanto a outra (MC-Injekt 1264 TF-TR) é recomendada para fissuras com aberturas superiores a 0,1 mm. A utilização desses dois materiais distintos foi feita no intuito de avaliar a influência de fissuras menores do que 0,3 mm na rigidez total do elemento.

Tendo em vista esses processos, cada um dos três exemplares de cada série teve um reforço distinto. Todas as peças foram reforçadas pela colagem de uma camada de manta de fibra de carbono na parte tracionada. Nos modelos A63 e A80 foram ainda coladas faixas em U para realização da ancoragem, conforme explicitado no dimensionamento apresentado no Apêndice A e detalhamento mostrado na Figura 3.5 e Figura 3.6. Nas peças R1 não houve a realização de nenhum processo de injeção. Nas peças R2 foi feita a injeção com a resina MC-Injekt 1264

Compact, para fissuras  $> 0,3$  mm. Nas peças R3 foi feita a injeção com a resina MC-Injekt 1264 TF-TR, para fissuras  $> 0,1$  mm.

Figura 3.5 - Detalhamento da manta de CFRP de reforço.

MODELOS A50



MODELOS A63 E A80

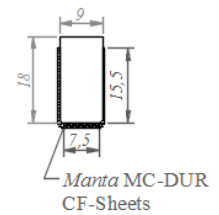
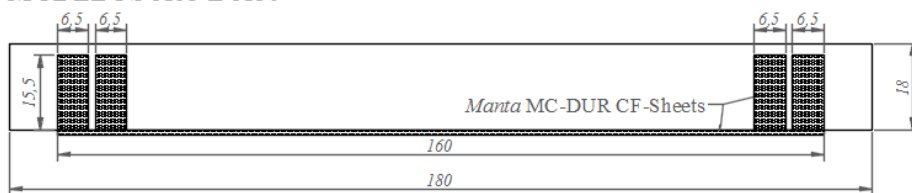


Figura 3.6 - Modelos reforçados sem ancoragem (a) e com ancoragem (b).



Foi proposta uma nova nomenclatura para identificar mais facilmente o processo de recuperação empregado para cada viga. Como todas as peças tem a mesma relação  $a/c$ , 0,60, foi omitido o código que faz referência a esse traço. O código relacionado à armadura foi mantido. Foi acrescentado o código CR à frente da identificação, indicando o fato de se tratarem de peças recuperadas com fibra de carbono (*Carbon Reinforcement*). E, ao final, um código

que identifica o processo de injeção adotado. Para as peças recuperadas sem injeção, empregou-se a sigla NI (*No Injection*). Às peças nas quais se empregou a resina MC-Injekt 1264 Compact adicionou-se o código IC, referente à Injeção e ao nome da resina, Compact. Nas peças com injeção com a resina MC-Injekt 1264 TF-TR, empregou-se o código IT, analogamente ao caso da outra resina. Na Tabela 3.3 é apresentado um resumo geral dos procedimentos adotados para as peças reforçadas.

Tabela 3.3 - Identificação dos exemplares de acordo com o processo de recuperação estrutural.

ID. Lima (2017)	Processo de recuperação estrutural adotado		ID. Atual
	Colagem de Manta de CFRP	Injeção MC-Injekt 1264 Compact	
T60A50-R1	X		CRA50-NI
T60A50-R2	X	X	CRA50-IC
T60A50-R3	X		CRA50-IT
T60A63-R1	X		CRA63-NI
T60A63-R2	X	X	CRA63-IC
T60A63-R3	X		CRA63-IT
T60A80-R1	X		CRA80-NI
T60A80-R2	X	X	CRA80-IC
T60A80-R3	X		CRA80-IT

### 3.2.2. Reparo com injeção de fissuras

#### 3.2.2.1. Materiais e equipamentos utilizados

Conforme exposto anteriormente, a injeção de fissuras foi feita com duas resinas distintas. São listados na Tabela 3.4, além dessas duas resinas, todos os materiais e equipamentos utilizados para realização da injeção. Na tabela constam fabricantes, modelos e propriedades características.


Tabela 3.4 - Materiais e equipamentos injeção das fissuras com as resinas epóxi.

<b>MATERIAIS</b>	
<b>Material</b>	<b>Descrição</b>
	<p>Durômero epoxídico de baixa viscosidade para selamento e reparo estrutural de trincas por injeção MC-Injekt 1264 Compact.</p> <p>Material bicomponente indicado para preenchimento rígido por injeção de trincas, juntas ou vazios em elementos construtivos.</p> <p>Boa penetração em trincas <math>\geq 0,3</math> mm</p> <p>Proporção de mistura (em peso): 2,5:1 (base : endurecedor)</p> <p>Densidade: 1,08 g/cm<sup>3</sup></p> <p>Tempo de trabalhabilidade: 30 minutos</p> <p>Viscosidade: 300 mPa.s</p> <p>Resistência à compressão: 70 MPa</p> <p>Resistência à tração na flexão: 30 MPa</p> <p>Alongamento na ruptura: 6%</p> <p>Módulo de elasticidade: aprox. 2600 MPa</p> <p>Condições de aplicação: Temperatura do ar e substrato: <math>8 \leq ^\circ\text{C} \leq 35</math>;</p>
	<p>Resina epóxi para injeção e reparo estrutural de trincas MC-Injekt 1264 TF-TR.</p> <p>Material bicomponente de baixa viscosidade indicado para preenchimento rígido por injeção de trincas, juntas ou vazios em elementos construtivos.</p> <p>Boa penetração em trincas <math>\geq 0,1</math> mm</p> <p>Proporção de mistura (em volume): 3:1 (base : endurecedor)</p> <p>Densidade: 1,07 g/cm<sup>3</sup></p> <p>Tempo de trabalhabilidade: 80 minutos</p> <p>Viscosidade: 145 mPa.s</p> <p>Resistência à compressão: 75 MPa</p> <p>Resistência à tração na flexão: 65 MPa</p> <p>Alongamento na ruptura: 4,5%</p> <p>Módulo de elasticidade: aprox. 3000 MPa</p> <p>Condições de aplicação: Temperatura do ar e substrato: <math>8 \leq ^\circ\text{C} \leq 30</math>;</p>

Tabela 3.4 – Materiais e equipamentos injeção das fissuras com as resinas epóxi (Continuação).

Material	Descrição
	<p>Adesivo estrutural a base de epóxi MC-DUR 1300 TX</p> <p>Adesivo à base de resina epóxi bicomponente sem solvente utilizado para reforço de estruturas existentes, colagens em geral e reparo de danos em estruturas de concreto.</p> <p>Proporção de mistura (em peso): 3:1 (base : endurecedor)</p> <p>Densidade: 1,8 g/cm<sup>3</sup></p> <p>Consumo médio: 0,8 à 1,0 kg/m<sup>2</sup></p> <p>Resistência à compressão: 60 MPa (7d)</p> <p>Condições de aplicação:</p> <p>Temperatura do ar e substrato: 8 ≤ °C ≤ 30;</p> <p>Umidade relativa: ≤ 85</p> <p>Umidade do substrato: ≤ 6</p>
<b>EQUIPAMENTOS</b>	
Equipamento	Descrição
	Bico de adesão
	Espátula metálica
	Bomba de injeção MC-I 510-Wiwa

Tabela 3.4 – Materiais e equipamentos injeção das fissuras com as resinas epóxi (Continuação).

Equipamento	Descrição
	Compressor Bravo Trifásico CSL 15BR

### 3.2.2.2. Procedimento de injeção de fissuras com resinas epóxi

Devido às dimensões reduzidas das vigas a serem injetadas, optou-se pela utilização de bicos de adesão ao invés dos bicos de perfuração. A perfuração das peças para alocação de bicos poderia ser um procedimento muito invasivo que danificaria consideravelmente as peças, prejudicando assim o processo final de recuperação.

A peça foi posicionada de modo que as fissuras ficassem pra cima, contribuindo para penetração da resina. Isso viabilizou a utilização de apenas um bico de adesão por fissura, sendo esse fixado na face fissurada da peça. Antes do posicionamento dos bicos, foi feita a limpeza da região de fissuração das peças de concreto, com auxílio de uma estopa com álcool etílico hidratado 92,8 INPM (Figura 3.7).

Figura 3.7 - Limpeza da área fissurada com auxílio de uma estopa com álcool.



Depois de observada a evaporação total do álcool os bicos foram posicionados sobre as fissuras. Para manter esse posicionamento e garantir que exista pelo menos um ponto para penetração da resina de na fissura após seu selamento, foram cravados pregos na superfície do elemento (Figura 3.8). Feito isso, fissuras foram então seladas e os bicos colados, com auxílio de uma desempenadeira metálica, utilizando para isso o adesivo epóxi MC-DUR 1300 TX (Figura 3.9).

Figura 3.8 - Bicos de adesão posicionados com auxílio de pregos.



Figura 3.9 - Fixação dos bicos de adesão (a) e selamento das fissuras (b).



Após o término do procedimento de colagem dos bicos e selamento das fissuras esperaram-se aproximadamente 3 dias para realização da injeção das resinas epóxi, visando garantir a cura

do adesivo epóxi MC-DUR 1300 TX. Para realização da injeção, inicialmente foram removidos os pregos e rosqueadas as graxas nos bicos de injeção (Figura 3.10). Depois disso, o recipiente onde é colocada a resina já misturada e a mangueira da bomba de injeção foram limpos com thinner para evitar qualquer contaminação dos produtos a serem injetados.

Figura 3.10 – Graxas sendo rosqueadas.



A resina MC-Injekt 1264 Compact foi misturada conforme as definições do fabricante durante 3 minutos. Depois disso foi adicionada ao recipiente da bomba, já limpo, para dar início ao procedimento de injeção. O bico da mangueira da bomba foi então fixado, por um operador, à graxa do bico de injeção colado sobre a peça (Figura 3.11).

Figura 3.11 - Fixação do bico da mangueira ao bico de adesão colado sobre uma fissura.



Após a fixação, outro operador acionava a bomba, abrindo gradualmente o registro que era conectado ao compressor. A pressão foi aumentada à medida que ocorria uma pequena estagnação da passagem do produto, o que indicava não estar havendo penetração. O procedimento de injeção de cada fissura terminava quando era observado o vazamento do material injetado (Figura 3.12), sendo fechados os registros da mangueira e da bomba. O procedimento se repetia para cada fissura.

Figura 3.12 - Momento do vazamento da resina de injeção no final da extensão da fissura.



Depois da realização da injeção com a resina MC-Injekt 1264 Compact nas 3 peças correspondentes, o recipiente da bomba e a mangueira foram novamente limpos com thinner. Feito isso, foi realizada a mistura da resina MC-Injekt 1264 TF-TR e se sucedeu o processo de injeção da mesma forma que o descrito para a outra resina. Ressalta-se que em ambas as

injeções a pressão (medida no manômetro da bomba e convertida pelo fator 33, que representa o fator de multiplicação aproximado de aumento da pressão do compressor pelo mecanismo de pistões da bomba de injeção) variou entre 35 bar e 100 bar, valores inferiores aos 200 bar sugeridos pelo fabricante como pressão máxima para realização da injeção de fissuras.

### 3.2.3. Reforço com manta de CFRP

#### 3.2.3.1. Materiais e equipamentos utilizados

Para execução do reforço estrutural com a colagem de CFRP foram utilizados os materiais e equipamentos listados na Tabela 3.5. Nela são apresentados fabricantes, modelos e propriedades características:

Tabela 3.5 - Materiais e equipamentos para colagem da manta de CFRP.


<b>MATERIAIS</b>	
<b>Material</b>	<b>Descrição</b>
	<p>Adesivo tixotrópico para reforço estrutural com manta de fibra de carbono MC-DUR 1209 TX</p> <p>Adesivo à base de resina epóxi bicomponente sem solvente utilizado como primer e camada de regularização para colagem de manta de reforço de alta resistência à tração para reforço de componentes estruturais em concreto armado e alvenaria.</p> <p>Proporção de mistura (em peso): 3:1 (base : endurecedor)</p> <p>Densidade: 1,33 g/cm<sup>3</sup></p> <p>Consumo médio: 0,7 à 1,0 kg/m<sup>2</sup></p> <p>Resistência de aderência: 14 MPa para aço/aço (Ø 20 mm)</p> <p>Módulo de elasticidade: aprox. 4700 MPa</p> <p>Condições de aplicação:</p> <p>Temperatura do ar e substrato: 8 ≤ °C ≤ 40;</p> <p>Temperatura do material: 15 ≤ °C ≤ 20;</p> <p>Umidade relativa: ≤ 85</p>

Tabela 3.6 – Materiais e equipamentos para colagem da manta de CFRP (Continuação).

Material	Descrição
	<p>Resina de laminação para reforço estrutural com manta de fibra de carbono MC-DUR 1209</p> <p>Resina à base de epóxi bicomponente, sem solvente, utilizada com adesivo para a colagem de manta de reforço de alta resistência à tração para reforço de componentes estruturais em concreto armado e alvenaria.</p> <p>Proporção de mistura (em peso): 3:1 (base : endurecedor)</p> <p>Densidade: 1,12 g/cm<sup>3</sup></p> <p>Consumo médio: 0,3 kg/m<sup>2</sup> por camada</p> <p>Resistência de aderência: 14 MPa para aço/aço (Ø 20 mm)</p> <p>Módulo de elasticidade: 3000 MPa</p> <p>Condições de aplicação:</p> <p>Temperatura do ar e substrato: 8 ≤ °C ≤ 40;</p> <p>Temperatura do material: 15 ≤ °C ≤ 25; Umidade relativa: ≤ 85</p>
	<p>Adesivo estrutural fluido à base de resina epóxi VIAPOXI ADESIVO.</p> <p>Adesivo bicomponente de base epóxi, de fluidez controlada, indicado para colagem de concreto, aço, alumínio, cerâmico e outros.</p> <p>Proporção de mistura (em peso): 2:1 (base : endurecedor)</p> <p>Densidade: 1,60 g/cm<sup>3</sup></p> <p>Consumo médio: 1600 kg/m<sup>3</sup>.</p> <p>Resistência de aderência: 14 MPa para aço/aço (Ø 20 mm)</p> <p>Res. à compressão (1 dia): &gt;40 MPa</p> <p>Res. à compressão (7 dias): &gt;60 MPa</p> <p>Condições de aplicação:</p> <p>Temperatura do ar e substrato: 5 ≤ °C ≤ 35;</p> <p>Tempo de cura inicial: 24 horas; Tempo de cura final: 7 dias;</p>
	<p>Manta de fibra de carbono para reforço estrutural MC-DUR CF-Sheets</p> <p>Manta de fibra de carbono, unidirecional, para Sistema de Reforço Estrutural.</p> <p>Peso próprio; 300g/m<sup>2</sup></p> <p>Largura do rolo: 500 mm</p> <p>Seção transversal da fibra 0,166 mm</p> <p>Alongamento na ruptura (manta não impregnada): 2,1%</p> <p>Resistência à tração (manta não impregnada): 3600 MPa</p> <p>Módulo de Elasticidade: 230000 MPa (NBR 8522:2008)</p>

Tabela 3.6 – Materiais e equipamentos para colagem da manta de CFRP (Continuação).

<b>EQUIPAMENTOS</b>	
<b>Equipamento</b>	<b>Descrição</b>
	Esmerilhadeira angular Makita
	Trincha simples 3''
	Rolo de espuma
	Espátula de plástico
	Espátula metálica
	Balança eletrônica de precisão

### 3.2.3.2. Procedimento de colagem da manta de CFRP

Inicialmente foram feitos alguns reparos na parte inferior dos elementos de concreto. Algumas áreas encontravam-se quebradas ou continham pequenos pedaços quase soltos. Essas áreas

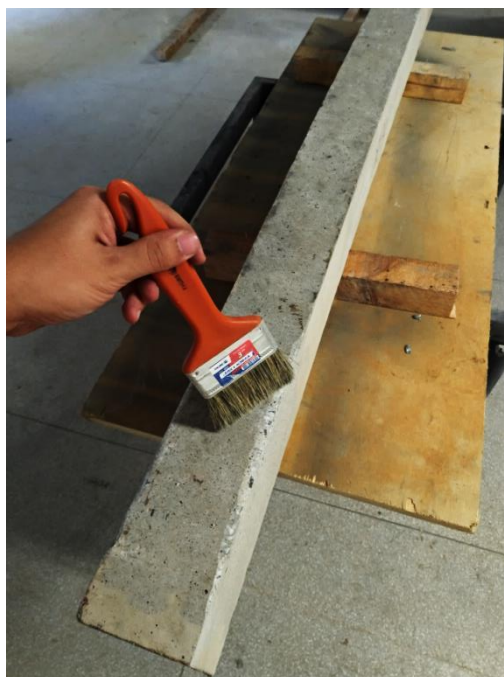
foram preenchidas com o Viapoxi Adesivo, visando uniformizar a superfície de aplicação do reforço, sem haver um gasto exagerado de adesivo primer (Figura 3.13).

Figura 3.13 - a) Retirada dos fragmentos soltos; b) viga com os fragmentos retirados; c) preenchimento com o Viapoxi Adesivo; d) Regularização da superfície.



Para colagem da manta de CFRP buscou-se garantir que o primer possuísse a melhor aderência possível com a superfície do substrato. Para isso, inicialmente as regiões onde seriam coladas as fibras de carbono (parte inferior e a laterais onde se faria a ancoragem) foram lixadas, com auxílio da esmerilhadeira, evidenciando a porosidade do elemento e contribuindo para sua ligação com o primer. Posteriormente a superfície de concreto foi limpa com auxílio da trincha, eliminando partículas de poeira, gorduras ou outros tipos de agentes contaminantes que pudessem prejudicar a aderência (Figura 3.14).

Figura 3.14 - Limpeza do elemento após a superfície para a colagem da manta de CFRP ter sido lixada.



Para a aplicação, os componentes A e B (base e endurecedor da linha MC-DUR 1209 TX, respectivamente) foram misturados na proporção de 3:1 em peso, conforme sugerido pelo fabricante. A mistura foi feita manualmente, com auxílio da espátula metálica, durante 4 minutos, visando garantir a homogeneidade do material. Posteriormente fez-se a aplicação do adesivo primer usando uma espátula plástica, conforme mostrado na Figura 3.15.

Figura 3.15 - Aplicação do adesivo MC-DUR 1209 TX.



O posicionamento e a colagem das mantas MC DUR CF-Sheets foi realizado quando o primer atingiu consistência de endurecimento adequada. A manta, já cortada nas dimensões de projeto, foi posicionada e pressionada contra o adesivo gradativamente ao longo de seu comprimento, com o auxílio de um rolo de espuma (Figura 3.16). Tomou-se cuidado para que não houvesse irregularidades na superfície de aderência ou pontos de enrugamento da manta.

Figura 3.16 - Fixação da manta de CFRP.



Após a cura do adesivo, já com a manta colada, foi feita a aplicação da resina de laminação MC-DUR 1209. Esse material, também bicomponente, foi misturado da mesma forma que o adesivo primer, na proporção de 3:1, em peso, dos componentes A e B (base e endurecedor). A mistura foi feita durante 4 minutos, garantindo assim a homogeneidade necessária para a aplicação do produto. A manta foi então impregnada com a resina de laminação com o auxílio do rolo de espuma, tomando as precauções necessárias para que a fibra de carbono da manta fosse completamente embebida com resina (Figura 3.17). Na Figura 3.6 é possível observar o aspecto do modelo após o processo de reforço.

Figura 3.17 - Impregnação da manta de CFRP com a resina MC-DUR 1209.



### 3.3. Programa experimental

#### 3.3.1. Ensaio de flexão

##### 3.3.1.1. Equipamentos utilizados

O ensaio de flexão foi realizado com a utilização dos equipamentos listados na Tabela 6. Nela são apresentados fabricantes, modelos e configurações.

Tabela 3.6- Equipamentos utilizados para realização do ensaio de flexão.

Equipamento	Descrição
	Máquina universal de ensaios, da EMIC, modelo DL60000, com capacidade de aplicação de 60 tf.
	Transdutor de deslocamento, da RDP, modelo LDC 2000A, com curso de 100 mm.
	Transdutor de deslocamento, da HBM, modelo WA/50, com curso de 50mm.

Tabela 3.7 – Equipamentos utilizados para realização do ensaio de flexão (Continuação).



Célula de carga, da HBM, modelo C6A, com capacidade nominal 200 kN.



Extensômetros, da Kyowa, modelo KC-70-120-A1-11, configurado em ¼ de ponte ligado a 4 fios.



SAD, da HBM, modelos QuantumX MX1614 e MX840A, configurados com uma taxa de amostragem de 5 Hz.



Microcomputador utilizado para controlar a máquina universal de ensaios por meio do software TESC.



Notebook utilizado para controlar o SAD da HBM.

### 3.3.1.2. Instrumentação e procedimento de ensaio

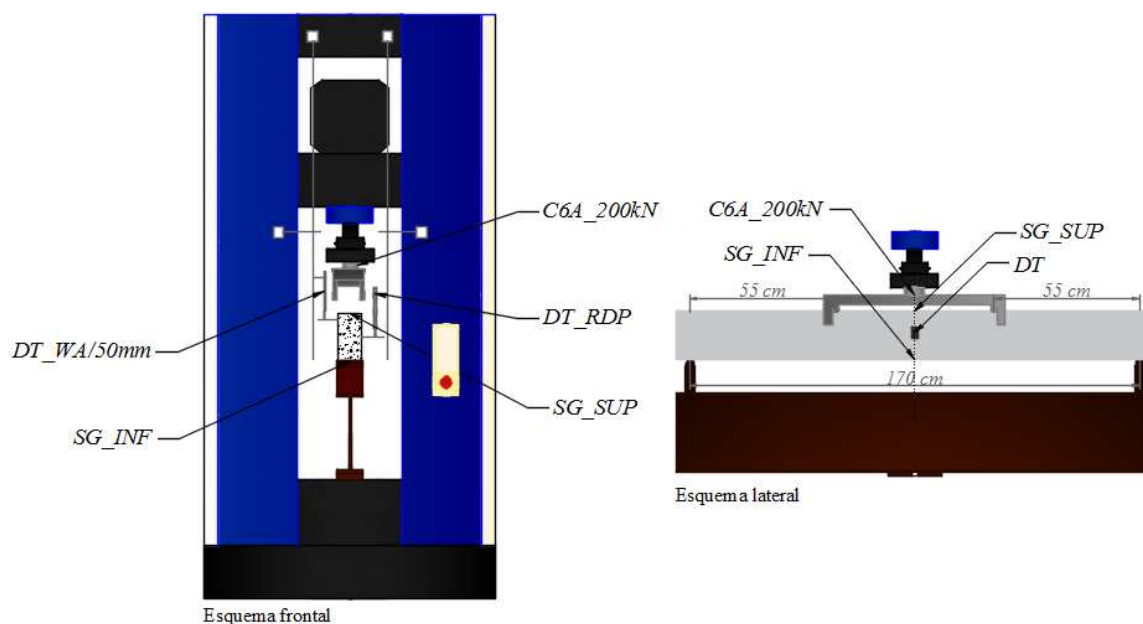
O ensaio de flexão ocorreu basicamente da mesma forma que o experimento de referência realizado por Lima (2017). Os modelos experimentais foram submetidos a um ensaio de flexão de quatro pontos (Ensaio de Stuttgart), configuração que permite a obtenção de um trecho de

momento puro e constante. A aplicação da carga foi realizada a 55 cm dos apoios, sendo os dois pontos de aplicação distantes 60 cm entre si. Essa configuração pode ser visualizada na Figura 3.3.

A aplicação do carregamento foi feita acoplando-se ao atuador da máquina universal de ensaios um elemento de aço que permitiu a transmissão da força em dois pontos. Esse carregamento foi aplicado de maneira contínua, com controle do deslocamento imposto ao braço da máquina, a uma taxa de 0,01 mm/s. Posicionou-se sobre a máquina uma viga de reação de aço que contava dois cavaletes em suas extremidades, simulando apoios rotulados, estando esses espaçados de 170 cm. A viga de reação foi apoiada em suas duas extremidades e parafusada à máquina universal em sua região central. Sobre essa viga foi colocado o modelo experimental, posicionado de forma simétrica em relação ao eixo central da máquina.

A instrumentação do ensaio foi feita utilizando-se dois transdutores de deslocamento (RDP e WA/50mm), sendo esses instalados no eixo central da peça. O transdutor RDP foi instalado na metade da altura do elemento, enquanto o transdutor WA/50mm foi instalado um pouco acima, no lado oposto. Além dos transdutores, foram utilizados dois extensômetros, ambos posicionados no eixo central da peça. Um dos extensômetros foi fixado na parte superior do elemento (SG\_SUP) e outro na parte inferior (SG\_INF), para aferir a deformação do concreto e a deformação da fibra de carbono, respectivamente. Por fim, foi utilizada a célula de carga C6A\_200kN, posicionada entre o elemento de aço para transmissão do carregamento e a rótula do atuador da máquina universal. Na Figura 3.18 está representado o esquema de montagem do ensaio de flexão.

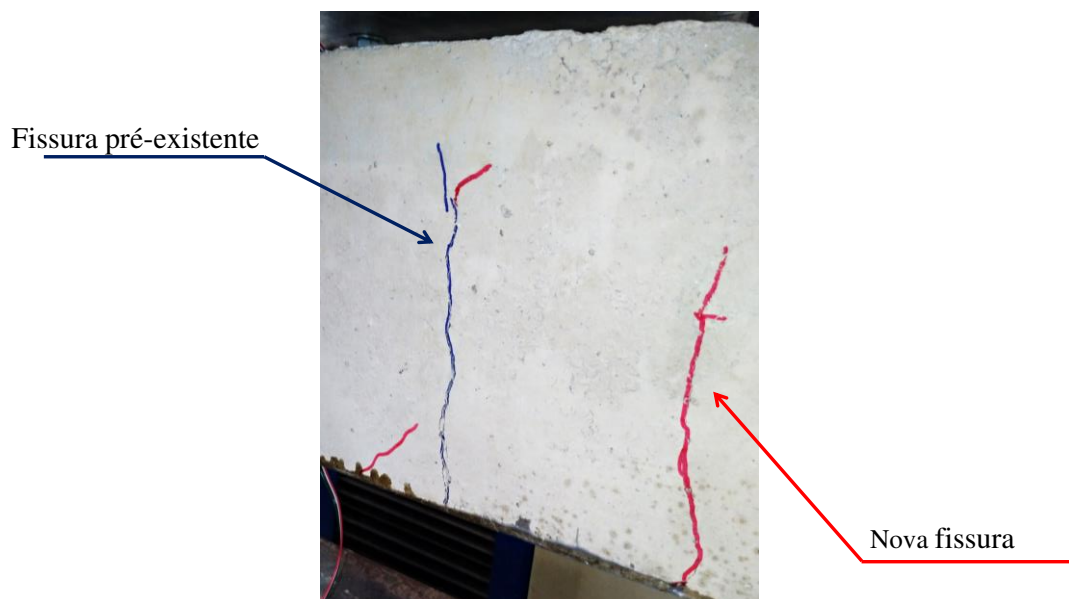
Figura 3.18 - Esquema de montagem do ensaio de flexão.



As vigas foram submetidas a estágios de carregamento progressivos, com medição dos deslocamentos, deformações e carregamento. Os dados foram obtidos com o auxílio do SAD da HBM que se comunicava com o sistema operacional do notebook por meio do software CatmanEasy v3.4. Ao final de cada estágio, o carregamento era completamente removido com a suspensão do atuador, restabelecendo a condição biapoiada da viga. Esse procedimento restabelecia a parcela de deformação elástica do elemento, mantendo-se a parcela inelástica.

Para cada estágio de carregamento ao qual o modelo foi submetido, as fissuras foram registradas. As fissuras dos modelos nos quais não foi realizado o procedimento de injeção foram marcadas inicialmente para posterior comparação com demais fissuras que vieram a surgir. Na Figura 3.19 é possível ser observada uma fissura pré-existente ao lado de outra que se abriu durante o ensaio do elemento já reforçado com fibra de carbono. No caso dos elementos que passaram pelo processo de injeção, foram indicadas as posições das fissuras iniciais, para posterior comparação com o posicionamento daquelas que surgiram durante o ensaio de flexão.

Figura 3.19 - Detalhe da fissuração do modelo experimental.



### 3.3.2. Ensaio para determinação das características dinâmicas

#### 3.3.2.1. Equipamentos utilizados

Na realização do ensaio para determinação das características dinâmicas foram utilizados os equipamentos listados na Tabela 3.7. Nela são apresentados fabricantes, modelos e configurações.

Tabela 3.7 - Equipamentos utilizados para realização do ensaio para determinação das características dinâmicas.



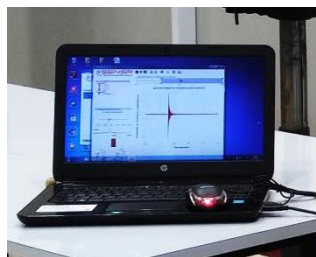
Equipamento	Descrição
	<p>Acelerômetro tri-axial MEMS (micro-electro-mechanical systems), da Sensr, modelo GP2LxUSB da marca SENSR. Conexão USB em notebook com programa de aquisição de dados instalado.</p>
	<p>Martelo de borracha 60mm.</p>

Tabela 3.8 – Equipamentos utilizados para realização do ensaio para determinação das características dinâmicas (Continuação).

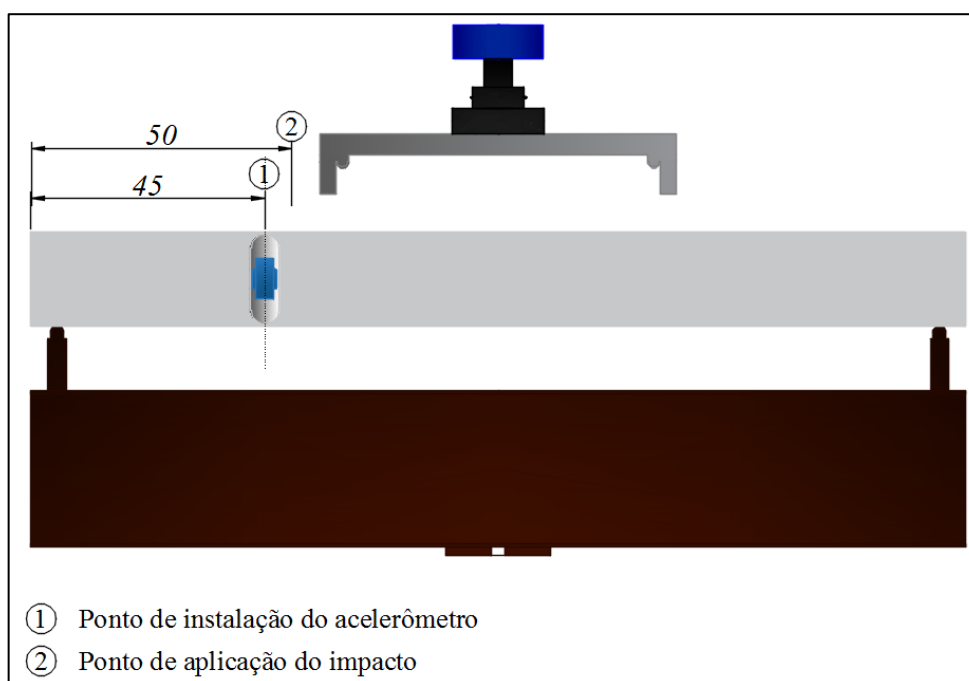


Notebook utilizado para controlar o programa de aquisição de dados da Sensr (SensView v1.1.0).

### 3.3.2.2. Instrumentação e procedimento de ensaio

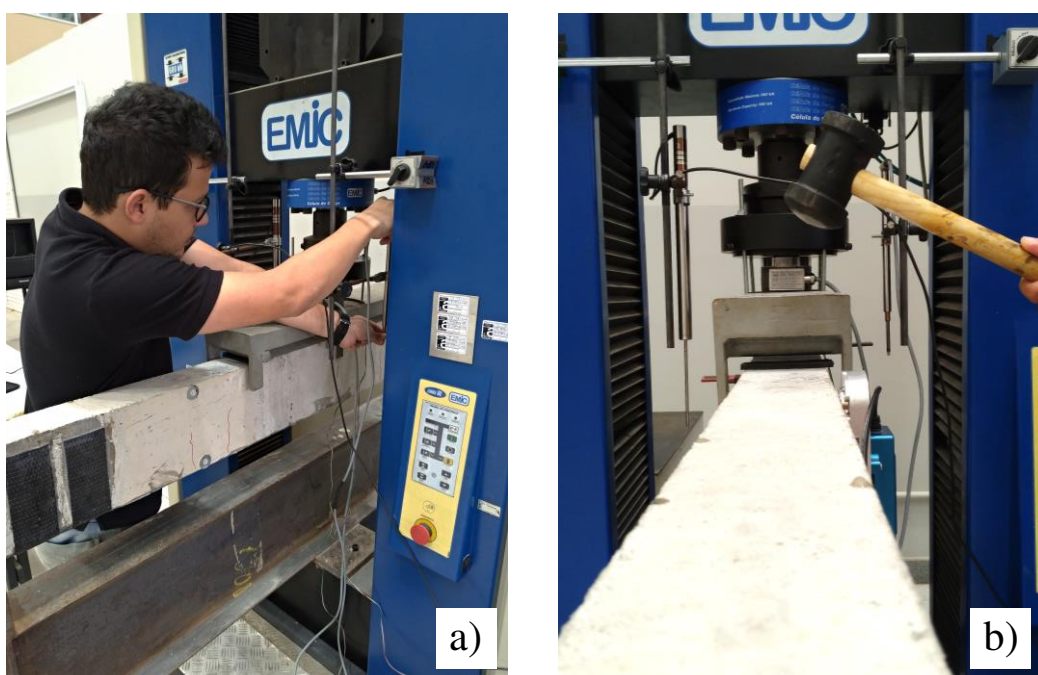
Os modelos experimentais foram instrumentados com fixação do acelerômetro GP2LxUSB da SENSR por meio de sua base magnética. Para isso foram coladas arruelas metálicas na lateral da viga de modo que o acelerômetro permanecesse com seu eixo longitudinal na posição 1, indicada na Figura 3.20. Para obtenção da frequência fundamental dos modelos foi aplicado um golpe na viga, com martelo de borracha, na posição 2 mostrada na Figura 3.20.

Figura 3.20 - Posição do acelerômetro e ponto de aplicação do impacto no ensaio para obtenção das características dinâmicas.



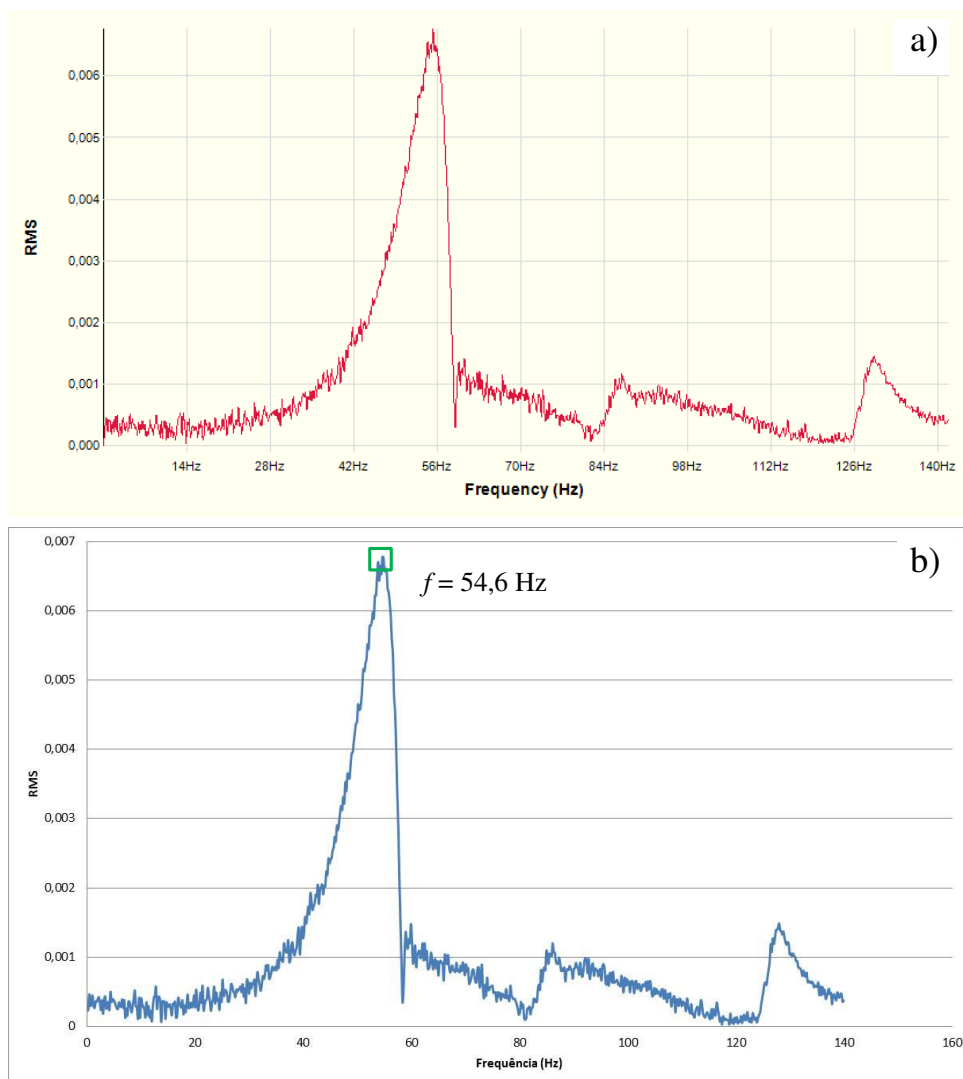
O ensaio para obtenção das características dinâmicas dos modelos experimentais foi feito antes dos procedimentos de reparo das peças, após a realização desses procedimentos e para cada estágio de carregamento do ensaio de flexão. Em todos os casos, a viga se encontrava na condição biapoiada, uma vez que ao final de cada estágio de aplicação de carga, o atuador da máquina universal era suspenso e os transdutores de deslocamento afastados (Figura 3.21).

Figura 3.21 - a) Afastamento dos transdutores; b) Detalhe do ensaio sendo feito com o atuador suspenso e transdutores afastados.



Os resultados foram obtidos pelo software de aquisição de dados SensView v1.1.0. O programa apresentava graficamente os resultados de aceleração e frequência, realizando de maneira direta a transformada de Fourier. Visando uma precisão maior nos resultados, os dados de aceleração e tempo adquiridos foram exportados para planilhas do software Excel, no qual foi realizada a análise de Fourier e obtido o valor exato da frequência fundamental para aquela série de dados. Na Figura 3.22 fica clara a correspondência entre as duas análises. Nela são apresentados os gráficos gerados pelo SensView e pelo Excel após realização da análise de Fourier.

Figura 3.22 - Comparação dos gráficos de frequência gerados pelo SensView (a) e pelo Excel (b).



Conhecida a frequência fundamental de vibração e mantidas as condições de contorno dos modelos experimentais, foi possível estimar analiticamente a rigidez residual dos elementos, correspondente a cada estágio de carregamento. Partindo do pressuposto de que a condição de contorno da viga era praticamente um apoio perfeito (elemento apoiado-apoiado), foi empregada a Expressão 2.3 para determinar a rigidez ( $EI$ ) dos modelos, utilizando o valor de  $\beta^2$  igual a 9,869.

# 4

---

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Considerações preliminares

Neste Capítulo, inicialmente são apresentados e discutidos os resultados da recuperação estrutural realizada por meio da injeção de fissuras com resinas epóxi e da colagem da manta de CFRP. Em seguida, são apresentados e discutidos os resultados do ensaio de flexão e do ensaio para determinação das características dinâmicas. Por fim, são abordados os modos de falha apresentados pelos modelos recuperados.

Uma avaliação da recuperação estrutural, obtida pela injeção das fissuras e pela colagem das mantas de CFRP, é feita com base na estimativa da rigidez à flexão dos modelos. Sendo assim, são apresentados os resultados obtidos antes e depois de empregadas as técnicas de recuperação. Para os modelos nos quais se empregaram as duas técnicas, apresentam-se três resultados distintos, sendo o segundo após a injeção de fissuras e o terceiro após a colagem das mantas. Com isso, é possível estimar a influência de cada procedimento na rigidez do modelo recuperado.

Os resultados do ensaio de flexão são apresentados juntamente com uma estimativa analítica da flecha e uma estimativa da flecha em função da resposta dinâmica dos modelos. São discutidos separadamente os modelos A50, A63 e A80, uma vez que cada um dos três elementos com mesma taxa de armadura apresenta situação semelhante de degradação antes do processo de recuperação estrutural.

Os resultados das cargas e flechas finais são apresentados juntamente com os modos de falha observados. Isso é feito de maneira separada para os modelos A50, A63 e A80 já que apresentaram um comportamento semelhante para a mesma taxa de armadura.

## 4.2. Estimativa da rigidez antes e após a recuperação estrutural

A seguir são apresentados e discutidos os resultados da rigidez estimada antes e depois dos processos de recuperação estrutural. Essa avaliação é feita com base nas acelerações e posterior transformação desses valores em frequências fundamentais, conforme procedimento apresentado no item 3.3.2. De posse da frequência fundamental de vibração, pode-se estimar a rigidez ( $EI$ ) de cada modelo com auxílio da Expressão 2.3.

### 4.2.1. Modelos reparados com injeção de resinas epóxi

Na Tabela 4.1 são apresentados os valores de frequência medida e rigidez estimada antes e após a injeção de fissuras com resinas epóxi, que foi realizada conforme procedimento apresentado no item 3.2.2.

Tabela 4.1 - Frequência medida e rigidez estimada antes e após o processo de injeção de resinas epóxi.

Elemento	Frequência			Rigidez		
	Antes (Hz)	Após (Hz)	Variação	Antes $10^5 \times EI$ (Nm <sup>2</sup> )	Após $10^5 \times EI$ (Nm <sup>2</sup> )	Variação
CRA50-NI	53,94	57,19	6,0%	3,76	4,22	12,4%
CRA50-IC	53,74	80,70	50,1%	3,73	8,40	125,4%
CRA50-IT	57,11	76,42	33,8%	4,21	7,54	79,1%
CRA63-NI	56,46	59,48	5,3%	4,08	4,53	11,0%
CRA63-IC	58,78	71,84	22,2%	4,42	6,61	49,4%
CRA63-IT	61,28	74,12	21,0%	4,81	7,04	46,3%
CRA80-NI	62,27	61,43	-1,3%	4,99	4,86	-2,7%
CRA80-IC	55,57	74,19	33,5%	3,98	7,09	78,2%
CRA80-IT	58,70	75,68	28,9%	4,44	7,38	66,2%

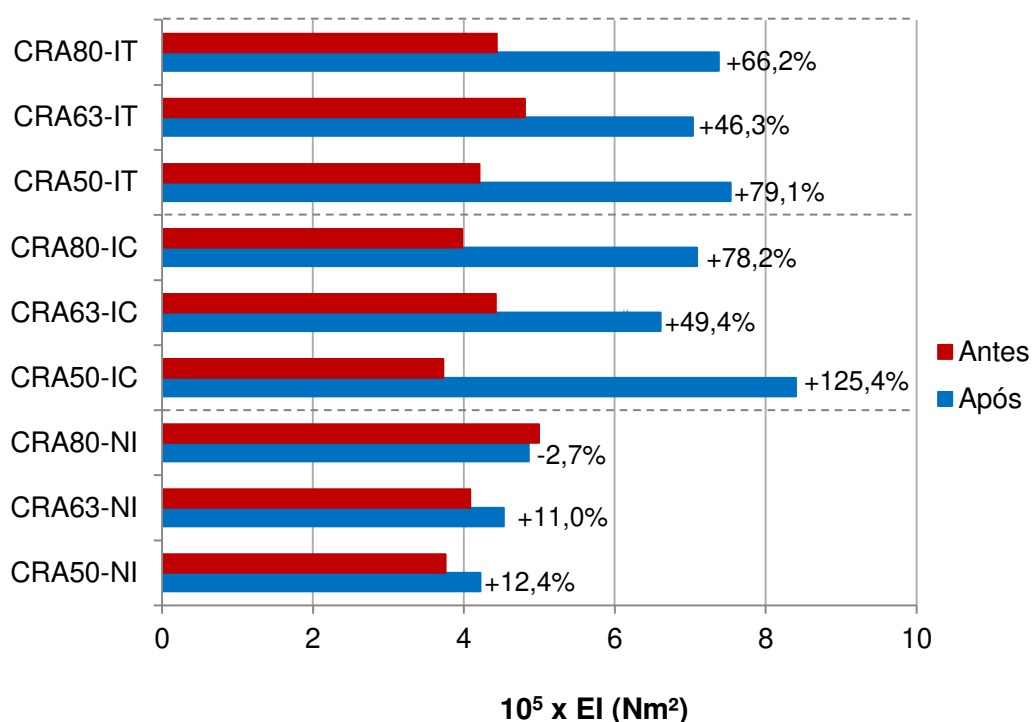
Os valores apresentados nas colunas de *Variação* representam a diferença percentual entre a leitura feita depois e antes da injeção de resinas epóxi. Esses valores foram calculados tomando-se como base a frequência e a rigidez antes do processo de reparo. Nota-se que a variação da rigidez estimada é mais expressiva do que a variação da frequência medida, já que, conforme a Expressão 2.3, a rigidez é proporcional ao quadrado da frequência.

Na Tabela 4.1 são apresentados os resultados dos modelos que não foram injetados. Era de se esperar que eles não apresentassem variação nas respostas do ensaio de determinação das características dinâmicas, já que mantiveram seu nível de degradação inalterado por qualquer procedimento externo. Entretanto, notou-se uma pequena variação nos resultados, o que pode

ter ocorrido em função de alguma condição um pouco diferente na realização do ensaio ou de uma pequena variação na aquisição dos dados pelo acelerômetro, já que o equipamento é muito sensível, mesmo a pequenas alterações.

Para evidenciar a diferença dos resultados, apresenta-se na Figura 4.1 um gráfico com a variação dos valores de rigidez estimados antes e depois da injeção.

Figura 4.1 - Rigidez estimada antes e após o processo de injeção de resinas epóxi.



#### 4.2.2. Modelos reforçados com manta de CFRP

Na Tabela 4.2 são apresentados os valores de frequência medida e rigidez estimada antes e após o reforço com CFRP, que foi realizada conforme procedimento apresentado no item 3.2.3.

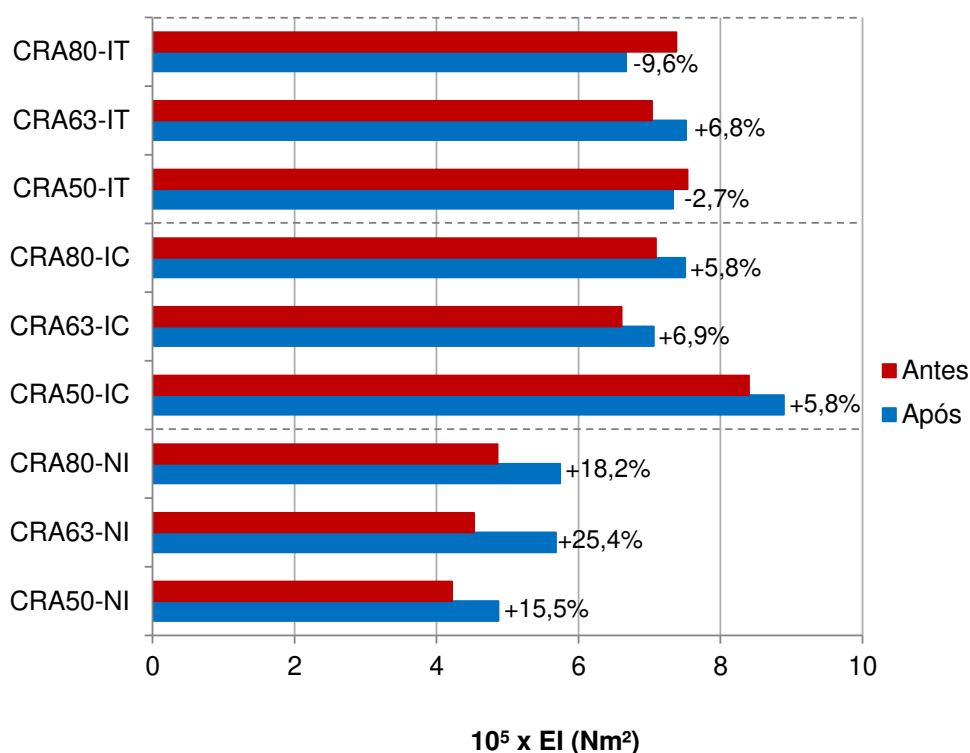
Tabela 4.2 - Frequência medida e rigidez estimada antes e após o processo de colagem de mantas de CFRP.

Elemento	Frequência			Rigidez		
	Antes (Hz)	Após (Hz)	Variação	Antes $10^5 \times EI$ (Nm <sup>2</sup> )	Após $10^5 \times EI$ (Nm <sup>2</sup> )	Variação
<b>CRA50-NI</b>	57,19	61,45	7,5%	4,22	4,87	15,5%
<b>CRA50-IC</b>	80,70	83,01	2,9%	8,40	8,89	5,8%
<b>CRA50-IT</b>	76,42	75,39	-1,4%	7,54	7,33	-2,7%
<b>CRA63-NI</b>	59,48	66,61	12,0%	4,53	5,68	25,4%
<b>CRA63-IC</b>	71,84	74,26	3,4%	6,61	7,06	6,9%
<b>CRA63-IT</b>	74,12	76,59	3,3%	7,04	7,51	6,8%
<b>CRA80-NI</b>	61,43	66,78	8,7%	4,86	5,74	18,2%
<b>CRA80-IC</b>	74,19	76,32	2,9%	7,09	7,50	5,8%
<b>CRA80-IT</b>	75,68	71,97	-4,9%	7,38	6,67	-9,6%

De forma semelhante ao apresentado no item 4.2.1, os valores apresentados nas colunas de *Variação* representam a diferença percentual entre a leitura feita depois e antes da colagem de manta de CFRP. Ressalta-se que esses valores foram calculados tomando-se como base a frequência e a rigidez antes do processo de reforço com CFRP, com os modelos de viga já submetidos ao processo de injeção de fissuras.

Na Figura 4.2 apresentam-se graficamente os valores da rigidez antes e após o reforço com CFRP.

Figura 4.2 - Rigidez estimada antes e após o processo de colagem de mantas de CFRP.



### **4.2.3. Discussão dos resultados**

Observando a Tabela 4.1, nota-se que os modelos que passaram pelo processo de injeção de fissuras com resinas epóxi tiveram um aumento significativo na sua rigidez estimada. Tomando como base a estimativa de rigidez da peça degradada, esse aumento variou entre 46% e 125%. Com base nesses resultados, pode-se observar que a injeção das fissuras com um material estruturalmente compatível com o concreto, como é o caso das resinas epóxi, contribui para o reestabelecimento da inércia da peça danificada e, conseqüentemente, para o aumento de sua rigidez.

Pelos resultados apresentados no item 4.2.2, é possível também verificar a influência da utilização de tipos de resina diferentes para injeção. Segundo o fornecedor, a resina MC-Injekt 1264 Compact possui boa penetração para fissuras com aberturas maiores ou iguais a 0,3 mm. Já a resina MC-Injekt 1264 TF-TR, mais fluida, possui, segundo o fornecedor, uma boa penetração para fissuras maiores ou iguais a 0,1 mm. Com base nessas informações, pressupôs-se que a resina menos viscosa conseguiria alcançar um nível de reparo maior, já que, diferentemente da outra, preencheria também as fissuras com aberturas entre 0,1 mm e 0,3 mm. Entretanto, observa-se pela Tabela 4.1 que os resultados não indicaram essa diferença. Analisando a rigidez estimada após a injeção, é possível verificar que os modelos apresentaram resultados bem similares para as duas resinas. Isso indica que, para o método de estimativa de rigidez utilizado, as fissuras menores do que 0,3 mm não interferem de maneira considerável na rigidez total da peça.

No caso das estimativas de rigidez feitas antes e após o reforço com CFRP, pode-se observar na Tabela 4.2 que as peças não injetadas tiveram um aumento percentual maior em comparação com as peças que passaram pelo processo de injeção. Isso se justifica, em parte, pelo fato da diferença percentual ser tomada em relação à peça antes do procedimento de reforço com a manta. Dessa forma, como os modelos não injetados apresentavam uma rigidez consideravelmente menor, uma mesma diferença absoluta reflete uma maior diferença percentual. Quantitativamente observou-se um aumento médio de  $0,40 \times 10^5 \text{ Nm}^2$  após a colagem da manta de CFRP.

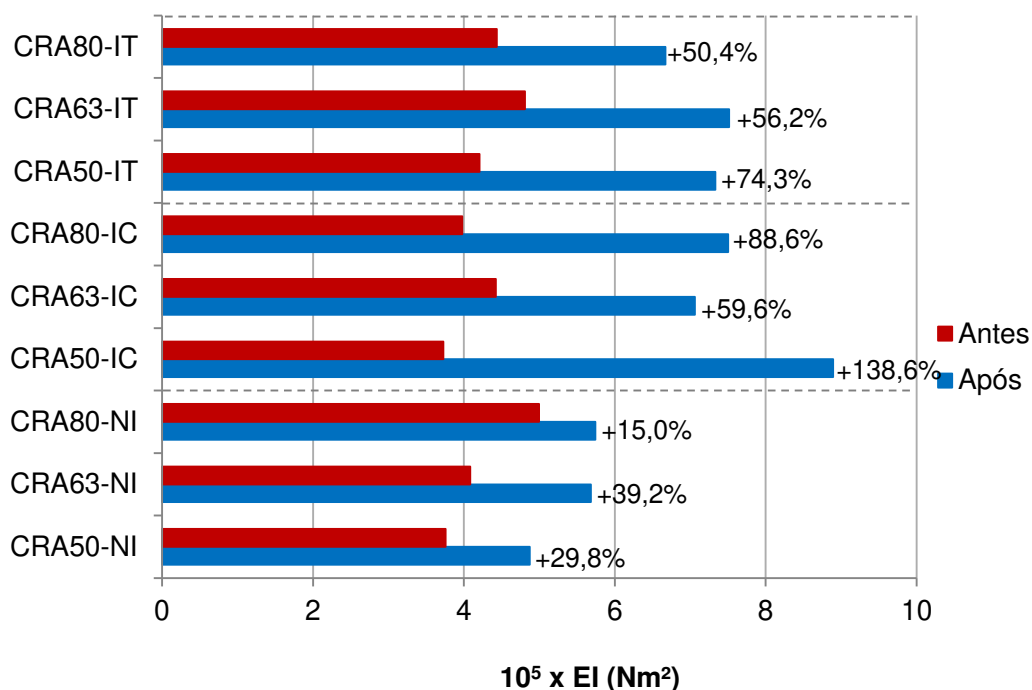
Fazendo-se a estimativa de rigidez para o processo de recuperação como um todo, somando-se as contribuições da injeção de fissuras e do reforço com CFRP, chega-se aos valores

apresentados na Tabela 4.3 e na Figura 4.3. Com base nesses resultados, é possível afirmar que houve um aumento na rigidez estimada de todos os elementos recuperados.

Tabela 4.3 - Frequência medida e rigidez estimada antes e após a recuperação estrutural dos modelos.

Elemento	Frequência			Rigidez		
	Antes (Hz)	Após (Hz)	Variação	Antes $10^5 \times EI$ (Nm <sup>2</sup> )	Após $10^5 \times EI$ (Nm <sup>2</sup> )	Variação
<b>CRA50-NI</b>	53,94	61,45	13,9%	3,76	4,87	29,8%
<b>CRA50-IC</b>	53,74	83,01	54,5%	3,73	8,89	138,6%
<b>CRA50-IT</b>	57,11	75,39	32,0%	4,21	7,33	74,3%
<b>CRA63-NI</b>	56,46	66,61	18,0%	4,08	5,68	39,2%
<b>CRA63-IC</b>	58,78	74,26	26,3%	4,42	7,06	59,6%
<b>CRA63-IT</b>	61,28	76,59	25,0%	4,81	7,51	56,2%
<b>CRA80-NI</b>	62,27	66,78	7,2%	4,99	5,74	15,0%
<b>CRA80-IC</b>	55,57	76,32	37,3%	3,98	7,50	88,6%
<b>CRA80-IT</b>	58,70	71,97	22,6%	4,44	6,67	50,4%

Figura 4.3 - Rigidez estimada antes e após a recuperação estrutural.



Outra maneira de visualizar a recuperação estrutural realizada pode ser feita pela comparação dos resultados obtidos com os valores de rigidez apresentados pelos modelos íntegros, antes de serem ensaiados por Lima (2017). Essa comparação é exposta nas tabelas 4.4 e 4.5, evidenciando quantitativamente a recuperação estrutural realizada.

Tabela 4.4 - Degradação da rigidez antes da recuperação estrutural.

Elemento	Frequência			Rigidez		
	Inicial (Lima,2017)	Antes da recuperação	$EI_{residual}$	Inicial (Lima,2017)	Antes da recuperação	$EI_{residual}$
	(Hz)	(Hz)		$10^5 \times EI$ (Nm <sup>2</sup> )	$10^5 \times EI$ (Nm <sup>2</sup> )	
<b>CRA50-NI</b>	86,74	53,94	62,2%	9,71	3,76	38,7%
<b>CRA50-IC</b>	90,27	53,74	59,5%	10,52	3,73	35,4%
<b>CRA50-IT</b>	91,78	57,11	62,2%	10,87	4,21	38,7%
<b>CRA63-NI</b>	87,65	56,46	64,4%	9,84	4,08	41,5%
<b>CRA63-IC</b>	86,62	58,78	67,9%	9,61	4,42	46,0%
<b>CRA63-IT</b>	87,85	61,28	69,8%	9,88	4,81	48,7%
<b>CRA80-NI</b>	87,22	62,27	71,4%	9,80	4,99	51,0%
<b>CRA80-IC</b>	87,70	55,57	63,4%	9,91	3,98	40,2%
<b>CRA80-IT</b>	89,59	58,70	65,5%	10,34	4,44	42,9%

Tabela 4.5 - Degradação da rigidez após a recuperação estrutural.

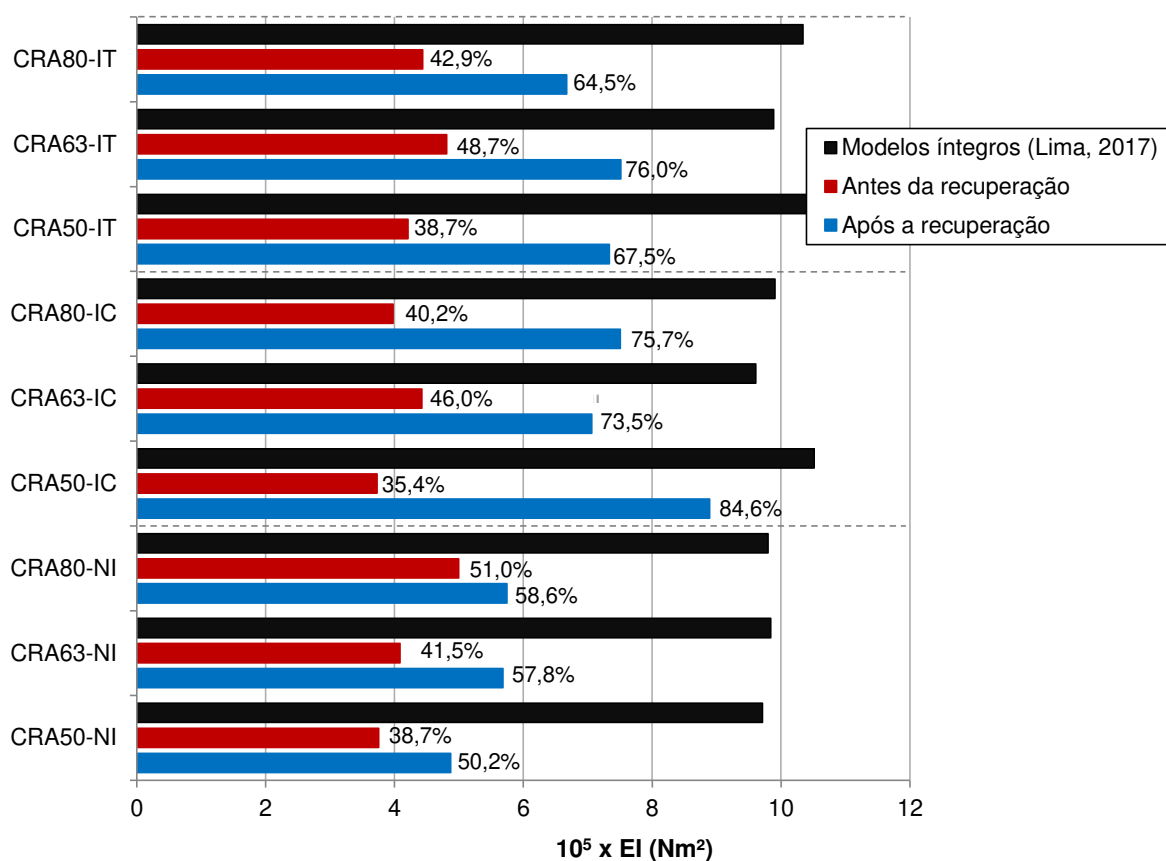
Elemento	Frequência			Rigidez		
	Inicial (Lima,2017)	Após a recuperação	$EI_{residual}$	Inicial (Lima,2017)	Após a recuperação	$EI_{residual}$
	(Hz)	(Hz)		$10^5 \times EI$ (Nm <sup>2</sup> )	$10^5 \times EI$ (Nm <sup>2</sup> )	
<b>CRA50-NI</b>	86,74	61,45	70,8%	9,71	4,87	50,2%
<b>CRA50-IC</b>	90,27	83,01	92,0%	10,52	8,89	84,6%
<b>CRA50-IT</b>	91,78	75,39	82,1%	10,87	7,33	67,5%
<b>CRA63-NI</b>	87,65	66,61	76,0%	9,84	5,68	57,8%
<b>CRA63-IC</b>	86,62	74,26	85,7%	9,61	7,06	73,5%
<b>CRA63-IT</b>	87,85	76,59	87,2%	9,88	7,51	76,0%
<b>CRA80-NI</b>	87,22	66,78	76,6%	9,80	5,74	58,6%
<b>CRA80-IC</b>	87,70	76,32	87,0%	9,91	7,50	75,7%
<b>CRA80-IT</b>	89,59	71,97	80,3%	10,34	6,67	64,5%

Na Tabela 4.4 é possível notar que os modelos, antes de passarem pelo processo de recuperação estrutural, apresentavam uma rigidez estimada variando entre 35% a 50% da rigidez dos elementos íntegros.

Observa-se pela Tabela 4.5 que, após a recuperação estrutural, os elementos que passaram pelo processo de injeção e foram reforçados com CFRP passaram a apresentar uma rigidez média estimada de aproximadamente 75% em relação ao que apresentavam inicialmente. Por outro lado, os elementos que tiveram apenas o reforço com CFRP e não foram injetados passaram a apresentar uma rigidez média de 55% com relação aos valores iniciais. Sendo assim, verifica-se que ambos os procedimentos resultaram em aumento da rigidez estimada. Todavia, fica evidente que a influência da injeção de fissuras é consideravelmente maior do que a influência do reforço com CFRP. Esse resultado vai ao encontro do que foi observado por Salgado, Ayala e Rangel (2016) e por Al Nu'man e Al-Sahlani (2006) no que diz respeito à influência do processo de recuperação na rigidez do elemento.

Na Figura 4.4 é apresentado um resumo dos valores mostrados nas tabelas 4.4 e 4.5 evidenciando o nível de degradação da rigidez antes e após a recuperação estrutural, em comparação com a rigidez estimada para os modelos íntegros de Lima (2017).

Figura 4.4 - Rigidez estimada dos modelos íntegros (Lima, 2017), antes da recuperação estrutural e após a recuperação estrutural.



### 4.3. Estimativa de flecha e degradação da rigidez dos modelos recuperados

A seguir são apresentados os resultados do ensaio de flexão e a rigidez estimada em cada ciclo de carregamento, conforme o procedimento apresentado nos itens 3.3.1 e 3.3.2. Os resultados dos ensaios são mostrados separadamente para os modelos com mesma taxa de armadura. Como cada um desses modelos foi submetido a um processo de recuperação estrutural distinto, é possível comparar a influência desses procedimentos no comportamento dos modelos quando submetidos à flexão.

Juntamente com as tabelas dos resultados dos ensaios de flexão são apresentados diagramas Carga-Flecha com resultados experimentais e resultados baseados em estimativas realizadas para cada estágio de carregamento. Foram estimadas flechas em função das características dinâmicas e com base no modelo analítico proposto por Branson. Para isso utilizou-se a equação da deformada para elementos sujeitos à aplicação de duas forças concentradas igualmente espaçadas dos apoios (Expressão 3.1).

Os resultados obtidos são apresentados numa mesma sequência para todos os modelos. As considerações sobre a construção dos diagramas são apresentadas detalhadamente para os modelos CRA50. Os diagramas dos demais modelos são apresentados na sequência.

Ao final é feita uma discussão acerca do comportamento observado para o conjunto de modelos. Faz-se uma análise comparativa dos resultados encontrados para modelos com mesma taxa de armadura e para os modelos submetidos ao mesmo processo de recuperação estrutural. O comportamento dos modelos recuperados é também contrastado com os resultados obtidos por Lima (2017) para as peças íntegras.

#### **4.3.1. Modelos CRA50**

Nas tabelas 4.6, 4.7 e 4.8 são apresentados os resultados dos ensaios de flexão realizados para os modelos CRA50. Observa-se que na quarta coluna são apresentadas as estimativas de rigidez de acordo com a Expressão 2.3. Na quinta coluna apresenta-se a degradação dessa rigidez, tomando-se como base o valor estimado antes da aplicação dos carregamentos. Como o ensaio para obtenção da frequência de vibração foi realizado após a aplicação de cada carregamento, não são apresentados os valores de frequência, rigidez e degradação relativos ao último ciclo. Isso se deve ao fato das peças terem apresentado, em sua maioria, uma ruptura repentina. Sendo assim, um valor de frequência obtido após o último ciclo representaria a condição do elemento após o colapso, o que não é de interesse no âmbito deste trabalho.

Tabela 4.6 - Modelo CRA50-NI.

Carga Total (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	$10^5 \times EI$ (Nm <sup>2</sup> )	$EI_{\text{residual}}$ (%)
0,12	0,04	59,49	4,57	100%
1,26	0,57	58,38	4,40	96%
6,74	2,07	57,00	4,19	92%
12,88	4,09	57,31	4,24	93%
18,47	6,39	57,83	4,32	95%
23,63	8,74	56,98	4,19	92%
27,37	11,32	55,60	3,99	87%
29,98	14,02	55,43	3,97	87%
32,25	16,64	56,42	4,11	90%
34,23	19,38	54,93	3,89	85%
35,97	22,26	-	-	-

Tabela 4.7 - Modelo CRA50-IC.

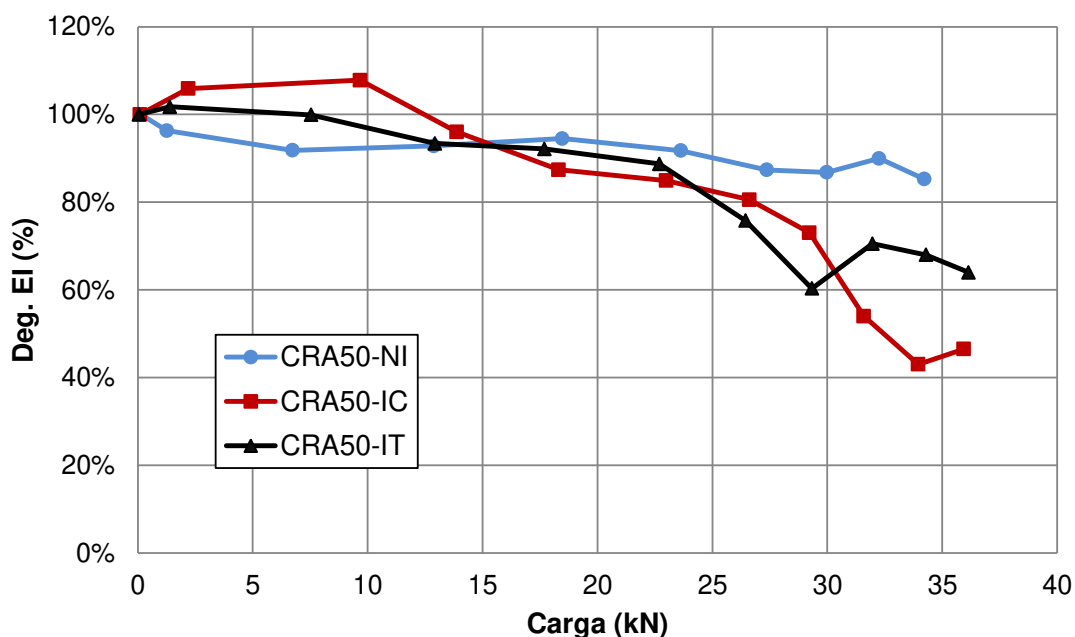
Carga Total (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	$10^5 \times EI$ (Nm <sup>2</sup> )	$EI_{\text{residual}}$ (%)
0,09	0,09	85,88	9,52	100%
2,19	0,38	88,38	10,08	106%
9,67	1,57	89,17	10,26	108%
13,87	3,50	84,17	9,14	96%
18,31	6,06	80,29	8,32	87%
23,00	8,69	79,14	8,08	85%
26,61	11,14	77,08	7,67	81%
29,22	13,94	73,40	6,95	73%
31,59	16,68	63,12	5,14	54%
33,96	19,47	56,32	4,09	43%
35,94	22,06	58,56	4,43	47%
35,69	23,09	-	-	-

Tabela 4.8 - Modelo CRA50-IT.

Carga Total (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	$10^5 \times EI$ (Nm <sup>2</sup> )	$EI_{\text{residual}}$ (%)
0,05	0,02	75,18	7,29	100%
1,40	0,23	75,83	7,42	102%
7,54	1,24	75,15	7,29	100%
12,93	3,17	72,65	6,81	93%
17,69	5,58	72,17	6,72	92%
22,70	8,03	70,81	6,47	89%
26,45	10,70	65,44	5,53	76%
29,34	13,15	58,38	4,40	60%
31,97	16,05	63,14	5,14	71%
34,30	18,98	61,98	4,96	68%
36,15	21,87	60,13	4,67	64%
35,86	22,55	-	-	-

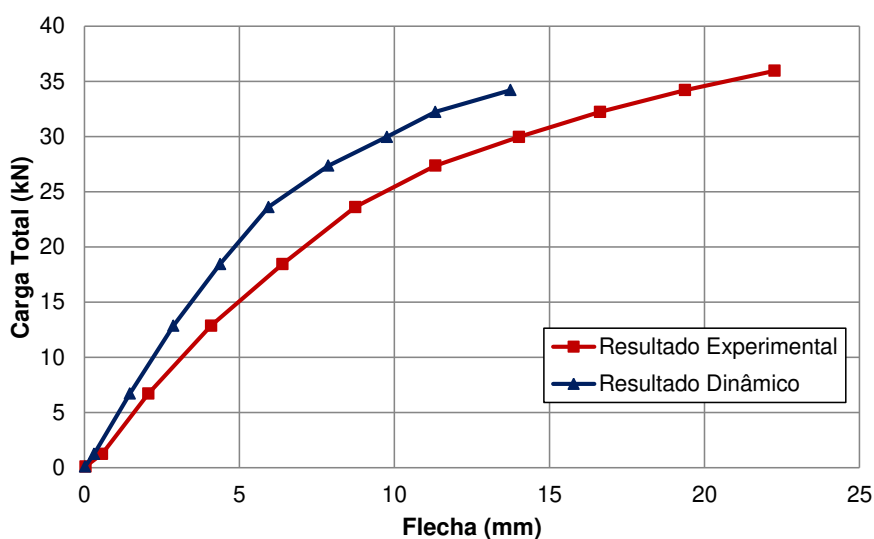
Na Figura 4.5 é apresentado o decaimento da rigidez, em termos percentuais, ao longo do ensaio de flexão. É possível observar uma queda nos valores estimados, o que indica o aumento na degradação da rigidez à medida que se aplica carregamentos mais elevados. Pode-se inferir que essa queda de rigidez esteja relacionada diretamente com o aumento da fissuração e, conseqüente, com a diminuição da inércia do modelo.

Figura 4.5 - Diagrama de degradação da rigidez dos modelos CRA50.



Para cada estágio de carregamento, calculou-se a flecha com base na Expressão 3.1 utilizando a rigidez estimada pela Expressão 2.3. O resultado desse cálculo corresponde à flecha elástica no centro do vão da viga. Ao final de cada ciclo de carregamento foi observada uma flecha residual, que ocorreu em virtude das deformações plásticas para o nível de carga alcançado. A flecha total relativa a cada estágio de carregamento corresponde à soma da flecha calculada com base na rigidez estimada, com a flecha residual medida. Na Figura 4.6 é possível comparar os resultados calculados com aqueles obtidos experimentalmente.

Figura 4.6 – Diagrama Carga-Flecha do modelo CRA50-NI com resultados experimentais e calculados com base na rigidez estimada por meio do ensaio dinâmico.

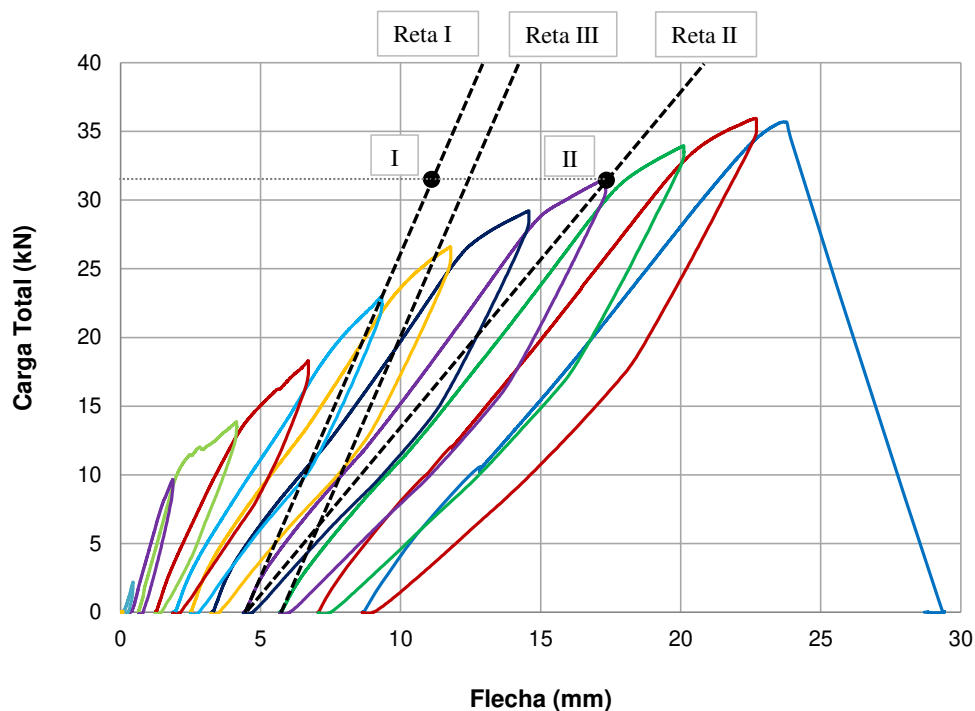


Como pode-se observar na Figura 4.6, a curva de resultados calculados a partir da rigidez estimada e a curva de resultados experimentais têm uma tendência bastante semelhante, mas apresentam diferenças.

Na Figura 4.7 apresenta-se um diagrama Carga-Flecha típico do ensaio de flexão, com os ciclos de carregamento e descarregamento realizados. Com base nessa figura, pode-se explicar a diferença de flechas identificada na Figura 4.6. Essa discrepância se deve ao fato de que quando se mede a frequência da viga descarregada, após sofrer certo nível de dano, a rigidez ( $EI$ ) é retratada pela inclinação inicial da curva de um ciclo de carregamento subsequente, caracterizada pela reta III da Figura 4.7. Como ao longo da aplicação do carregamento a rigidez não permanece constante, havendo uma diminuição da inclinação da curva, se a flecha da viga for estimada com base na rigidez inicial, obtém-se uma flecha total menor do que a medida experimentalmente.

O ponto II da Figura 4.7 corresponde à carga e flecha máximos de um ciclo, obtidos experimentalmente. A reta III é tangente ao início da curva de carregamento do ciclo subsequente ao descarregamento a partir do ponto II, retratando, portanto, a rigidez estimada quando o elemento foi totalmente descarregado. Quando se faz o cálculo da flecha com base na rigidez estimada, como mostrado na Figura 4.6, obtém-se o valor da flecha do ponto I, já que se soma a parcela elástica estimada a partir da rigidez inicial do ciclo subsequente com a parcela residual. Essa estimativa pode ser representada na Figura 4.7 pela reta I, que é paralela à reta III, mas que tem início na flecha residual do ciclo correspondente.

Figura 4.7 - Ciclos de carregamento e descarregamento do modelo CRA50-IC



Com base na Figura 4.7, pode-se observar que a inclinação do início do ciclo subsequente (reta III) é maior do que a inclinação da reta II, definida entre o ponto de início e final do ciclo de carregamento. Portanto, para calcular a flecha de forma mais realista, é necessário reduzir a rigidez estimada com base na frequência fundamental.

Observando as retas I e II do diagrama da Figura 4.7 pode-se notar um aspecto semelhante ao que ocorre nos diagramas tensão-deformação quando se compara o módulo de elasticidade tangente inicial do concreto ( $E_{ci}$ ) com o módulo de elasticidade secante ( $E_{c,s}$ ). De maneira análoga, no caso do diagrama Carga-Flecha, seria possível pensar numa rigidez tangente inicial (reta I) e numa rigidez secante (reta II). Em função disso, decidiu-se buscar um coeficiente de ajuste que pudesse relacionar a rigidez definida entre o ponto de início e final do ciclo de carregamento (reta II) e a rigidez determinada por meio dos ensaios dinâmicos (reta III), que retrata inclinação inicial da curva de um ciclo de carregamento subsequente. Esse coeficiente é diferente da relação entre o  $E_{c,s}$  e o  $E_{ci}$ , já que considera também a variação da inércia ao longo do carregamento.

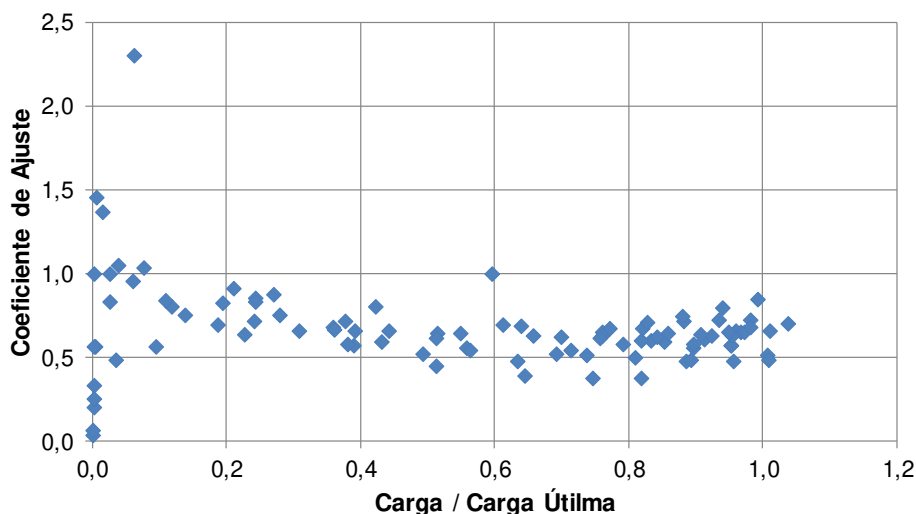
Com base nos resultados de todos os pontos correspondentes ao final de cada ciclo de carregamento, que compõem os diagramas carga-flecha do conjunto de modelos experimentais do presente estudo, foi determinado um coeficiente de ajuste para redução da rigidez, de modo

que as flechas estimadas pudessem coincidir com as flechas medidas experimentalmente. Na Tabela 4.9 são apresentados todos os valores de ajuste calculados. Na Figura 4.8 mostra-se a variação do coeficiente de ajuste em função da relação entre a carga de cada ciclo e carga última alcançada pelo modelo correspondente.

Tabela 4.9 - Determinação do coeficiente de ajuste

CR-A50-NI						CR-A50-IC						CR-A50-IT					
Carga/ Carga Última	Flecha <sub>exp</sub> (mm)	E <sub>last,red</sub> (10 <sup>5</sup> x Nm <sup>2</sup> )	Flecha <sub>est</sub> (mm)	Coef. Ajuste	E <sub>last,red</sub> (10 <sup>5</sup> x Nm <sup>2</sup> )	Carga/ Carga Última	Flecha <sub>exp</sub> (mm)	E <sub>last,red</sub> (10 <sup>5</sup> x Nm <sup>2</sup> )	Flecha <sub>est</sub> (mm)	Coef. Ajuste	E <sub>last,red</sub> (10 <sup>5</sup> x Nm <sup>2</sup> )	Carga/ Carga Última	Flecha <sub>exp</sub> (mm)	E <sub>last,red</sub> (10 <sup>5</sup> x Nm <sup>2</sup> )	Flecha <sub>est</sub> (mm)	Coef. Ajuste	E <sub>last,red</sub> (10 <sup>5</sup> x Nm <sup>2</sup> )
0.00	0.04	4.57	0.02	<b>0.57</b>	2.59	0.00	0.09	9.52	0.08	<b>0.57</b>	5.39	0.00	0.02	7.29	0.01	<b>0.33</b>	2.44
0.04	0.57	4.40	0.31	<b>0.49</b>	2.15	0.05	0.38	10.08	0.49	<b>2.30</b>	23.19	0.04	0.23	7.42	0.24	<b>1.05</b>	7.80
0.19	2.07	4.19	1.47	<b>0.70</b>	2.92	0.27	1.57	10.26	1.46	<b>0.88</b>	8.98	0.21	1.24	7.29	1.16	<b>0.91</b>	6.66
0.36	4.09	4.24	2.87	<b>0.68</b>	2.89	0.39	3.50	9.14	2.54	<b>0.57</b>	5.24	0.36	3.17	6.81	2.36	<b>0.67</b>	4.54
0.51	6.39	4.32	4.38	<b>0.65</b>	2.78	0.51	6.06	8.32	3.75	<b>0.45</b>	3.73	0.49	5.58	6.72	3.52	<b>0.52</b>	3.51
0.66	8.74	4.19	5.94	<b>0.63</b>	2.65	0.64	8.59	6.08	4.94	<b>0.39</b>	3.16	0.63	8.03	6.47	4.78	<b>0.48</b>	3.10
0.76	11.32	3.99	7.87	<b>0.63</b>	2.51	0.75	11.14	7.67	6.21	<b>0.38</b>	2.88	0.82	10.70	5.53	6.82	<b>0.51</b>	2.84
0.83	14.02	3.97	9.76	<b>0.60</b>	2.39	0.82	13.94	6.95	7.99	<b>0.38</b>	2.62	0.82	13.15	4.40	9.33	<b>0.60</b>	2.63
0.90	16.64	4.11	11.32	<b>0.56</b>	2.29	0.89	16.68	5.14	10.95	<b>0.48</b>	2.46	0.89	16.05	5.14	10.46	<b>0.49</b>	2.51
0.95	19.38	3.89	13.75	<b>0.57</b>	2.23	0.95	19.47	4.09	14.16	<b>0.57</b>	2.34	0.95	18.98	4.96	12.61	<b>0.48</b>	2.39
						1.01	22.06	4.43	15.58	<b>0.52</b>	2.29	1.01	21.87	4.67	14.93	<b>0.49</b>	2.28
CR-A63-NI						CR-A63-IC						CR-A63-IT					
Carga/ Carga Última	Flecha <sub>exp</sub> (mm)	E <sub>last,red</sub> (10 <sup>5</sup> x Nm <sup>2</sup> )	Flecha <sub>est</sub> (mm)	Coef. Ajuste	E <sub>last,red</sub> (10 <sup>5</sup> x Nm <sup>2</sup> )	Carga/ Carga Última	Flecha <sub>exp</sub> (mm)	E <sub>last,red</sub> (10 <sup>5</sup> x Nm <sup>2</sup> )	Flecha <sub>est</sub> (mm)	Coef. Ajuste	E <sub>last,red</sub> (10 <sup>5</sup> x Nm <sup>2</sup> )	Carga/ Carga Última	Flecha <sub>exp</sub> (mm)	E <sub>last,red</sub> (10 <sup>5</sup> x Nm <sup>2</sup> )	Flecha <sub>est</sub> (mm)	Coef. Ajuste	E <sub>last,red</sub> (10 <sup>5</sup> x Nm <sup>2</sup> )
0.00	0.09	5.82	0.05	<b>0.20</b>	1.17	0.00	0.08	7.17	0.05	<b>0.25</b>	1.83	0.00	0.07	7.50	0.10	-	7.50
0.03	0.34	6.08	0.31	<b>0.83</b>	5.08	0.01	0.16	7.15	0.17	<b>1.45</b>	10.39	0.05	0.62	7.35	0.61	<b>0.96</b>	7.05
0.14	1.58	6.06	1.31	<b>0.76</b>	4.58	0.09	1.42	7.08	1.05	<b>0.57</b>	4.01	0.24	2.10	7.51	1.92	<b>0.86</b>	6.44
0.28	3.20	5.89	2.63	<b>0.76</b>	4.46	0.23	2.95	6.66	2.25	<b>0.64</b>	4.25	0.24	4.02	7.10	3.54	<b>0.81</b>	5.73
0.44	5.51	5.94	4.09	<b>0.68</b>	3.93	0.38	5.33	6.43	3.77	<b>0.58</b>	3.74	0.60	5.13	6.67	5.12	<b>1.00</b>	6.66
0.61	7.96	5.39	6.09	<b>0.69</b>	3.74	0.56	7.82	6.38	5.31	<b>0.56</b>	3.57	0.76	9.33	6.36	6.84	<b>0.62</b>	3.94
0.76	10.54	5.46	7.75	<b>0.65</b>	3.55	0.71	10.35	6.36	6.95	<b>0.55</b>	3.47	0.83	12.33	4.99	10.08	<b>0.71</b>	3.56
0.82	13.49	4.92	10.49	<b>0.67</b>	3.32	0.79	13.33	5.70	9.65	<b>0.58</b>	3.30	0.88	15.14	4.48	12.86	<b>0.75</b>	3.34
0.88	16.44	4.43	13.57	<b>0.72</b>	3.20	0.85	16.27	5.37	12.28	<b>0.59</b>	3.18	0.94	17.97	3.98	15.91	<b>0.80</b>	3.17
0.93	19.46	4.21	16.31	<b>0.72</b>	3.05	0.91	19.14	5.04	14.97	<b>0.61</b>	3.09	0.99	20.64	3.58	18.95	<b>0.85</b>	3.04
0.98	22.41	4.03	19.03	<b>0.73</b>	2.94	0.96	21.78	4.61	17.84	<b>0.66</b>	3.03						
CR-A80-NI						CR-A80-IC						CR-A80-IT					
Carga/ Carga Última	Flecha <sub>exp</sub> (mm)	E <sub>last,red</sub> (10 <sup>5</sup> x Nm <sup>2</sup> )	Flecha <sub>est</sub> (mm)	Coef. Ajuste	E <sub>last,red</sub> (10 <sup>5</sup> x Nm <sup>2</sup> )	Carga/ Carga Última	Flecha <sub>exp</sub> (mm)	E <sub>last,red</sub> (10 <sup>5</sup> x Nm <sup>2</sup> )	Flecha <sub>est</sub> (mm)	Coef. Ajuste	E <sub>last,red</sub> (10 <sup>5</sup> x Nm <sup>2</sup> )	Carga/ Carga Última	Flecha <sub>exp</sub> (mm)	E <sub>last,red</sub> (10 <sup>5</sup> x Nm <sup>2</sup> )	Flecha <sub>est</sub> (mm)	Coef. Ajuste	E <sub>last,red</sub> (10 <sup>5</sup> x Nm <sup>2</sup> )
0.00	0.06	5.83	0.06	<b>1.00</b>	5.83	0.00	0.11	7.53	0.04	<b>0.04</b>	0.29	0.00	0.08	6.70	0.03	<b>0.07</b>	0.44
0.03	0.38	5.78	0.37	<b>1.00</b>	5.78	0.01	0.17	7.57	0.26	-	7.57	0.02	0.22	7.18	0.25	<b>1.37</b>	9.81
0.12	1.47	5.84	1.27	<b>0.81</b>	4.72	0.08	0.91	7.73	0.93	<b>1.04</b>	8.03	0.11	1.26	8.28	1.13	<b>0.84</b>	6.94
0.24	3.16	5.97	2.47	<b>0.71</b>	4.27	0.19	2.25	7.69	1.99	<b>0.83</b>	6.38	0.24	2.77	7.84	2.47	<b>0.84</b>	6.57
0.39	5.30	5.97	3.87	<b>0.66</b>	3.95	0.31	4.34	7.54	3.29	<b>0.66</b>	5.00	0.38	4.88	7.20	3.88	<b>0.72</b>	5.19
0.55	7.48	5.97	5.35	<b>0.65</b>	3.87	0.43	6.53	7.37	4.53	<b>0.59</b>	4.38	0.51	7.09	7.58	5.01	<b>0.62</b>	4.68
0.70	9.57	6.05	6.57	<b>0.62</b>	3.76	0.56	8.83	7.57	5.73	<b>0.55</b>	4.14	0.64	9.39	6.29	7.11	<b>0.69</b>	4.33
0.84	11.76	5.94	8.16	<b>0.63</b>	3.73	0.69	11.14	7.54	6.96	<b>0.52</b>	3.96	0.77	11.86	6.12	8.89	<b>0.68</b>	4.14
0.92	14.27	5.71	10.23	<b>0.63</b>	3.60	0.81	13.49	7.60	8.20	<b>0.50</b>	3.82	0.86	14.40	6.09	10.58	<b>0.65</b>	3.94
0.97	16.87	5.41	12.77	<b>0.65</b>	3.52	0.90	16.97	6.40	11.81	<b>0.58</b>	3.72	0.91	17.08	5.87	12.70	<b>0.64</b>	3.73
1.01	19.55	5.15	15.21	<b>0.66</b>	3.39	0.95	20.02	5.83	15.20	<b>0.63</b>	3.68	0.95	19.57	5.63	15.08	<b>0.65</b>	3.66
1.04	22.71	4.62	18.63	<b>0.70</b>	3.24	0.97	22.33	5.43	17.54	<b>0.65</b>	3.54	0.98	22.10	5.25	17.82	<b>0.68</b>	3.59

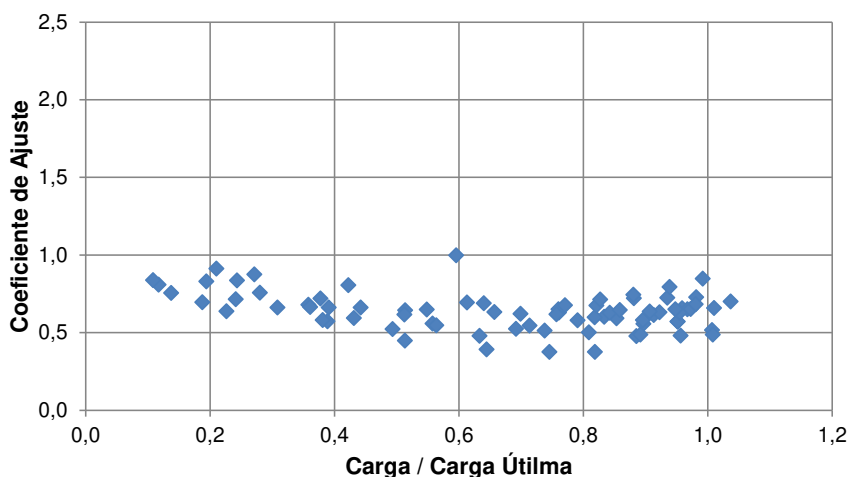
Figura 4.8 - Coeficiente de ajuste em função do carregamento aplicado.



Na Figura 4.8 é possível observar uma dispersão nos valores dos coeficientes de ajuste, principalmente para os carregamentos iniciais. Isso se deve, possivelmente, a acomodações que ocorrem no início do carregamento. Sendo assim, os coeficientes de ajuste para os ciclos iniciais, que apresentam relação Carga/Carga Útilma inferior a 0,10, foram excluídos da análise, como apresentado na Figura 4.9.

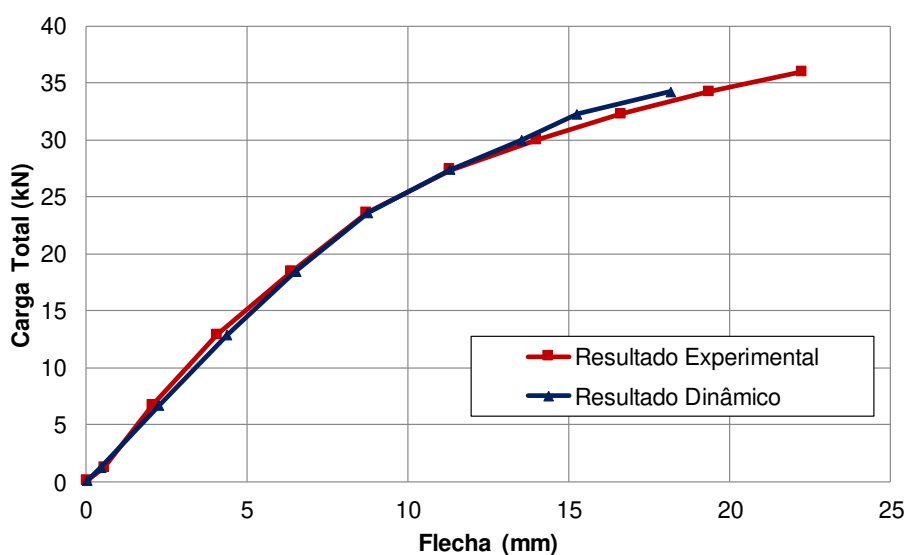
Com base na Figura 4.9, nota-se que o coeficiente de ajuste teve pouca variabilidade a partir de 0,10 Carga/Carga Útilma, com um coeficiente de variação de 18,5%. A função matemática mais representativa da relação entre o coeficiente de ajuste e o nível de carga é a função constante. Portanto, é razoável admitir a média dos valores calculados para o coeficiente de redução da rigidez. No estudo desenvolvido foi obtido um valor de 0,64.

Figura 4.9 - Coeficiente de ajuste em função do carregamento aplicado, desconsiderando valores de Carga/Carga Útilma inferiores a 0,10.



Ainda que o coeficiente de ajuste obtido seja interpretado como um valor determinístico, já que não possui uma relação direta com outras características do comportamento dos modelos ensaiados, pode-se observar, por meio da Figura 4.10, que o coeficiente de ajuste de 0,64 permite uma boa aproximação entre resultados experimentais e estimados, quando comparados com aqueles apresentados anteriormente na Figura 4.6. Tendo em vista a correspondência dos resultados para este trabalho, todos os diagramas Carga-Flecha obtidos com base nas características dinâmicas apresentados a seguir foram elaborados considerando o coeficiente de ajuste para redução da rigidez de 0,64.

Figura 4.10 – Diagrama Carga-Flecha do modelo CRA50-NI com resultados experimentais e calculados com base na rigidez estimada por meio do ensaio dinâmico, corrigida pelo coeficiente de ajuste.



Na Tabela 4.10 são apresentados os valores das flechas estimadas com base nas características dinâmicas, considerando a soma das flechas residuais de cada estágio e o coeficiente de ajuste.

Tabela 4.10 – Flecha dos modelos CRA50 calculada com base características dinâmicas.

CRA50-NI		CRA50-IC		CRA50-IT	
Carga Total (kN)	Flecha (mm)	Carga Total (kN)	Flecha (mm)	Carga Total (kN)	Flecha (mm)
0,12	0,04	0,09	0,09	0,05	0,01
1,26	0,45	2,19	0,59	1,40	0,33
6,74	2,24	9,67	1,91	7,54	1,65
12,88	4,33	13,87	3,27	12,93	3,27
18,47	6,43	18,31	4,80	17,69	4,79
23,63	8,65	23,00	6,30	22,70	6,47
27,37	11,17	26,61	7,88	26,45	9,12
29,98	13,39	29,22	10,01	29,34	12,54
32,25	15,10	31,59	13,90	31,97	13,45
34,23	17,97	33,96	18,15	34,30	15,94
-	-	35,94	19,49	36,15	18,65
-	-	-	-	-	-

Nota: Flecha calculada conforme a Expressão 3.1, considerando a carga P, que equivale à metade da carga total lida na célula de carga.

O comportamento das peças submetidas à flexão também foi estudado segundo o modelo analítico proposto por Branson. Ressalta-se que como todos os modelos ensaiados foram reforçados com CFRP, foi preciso adaptar as expressões 2.7 a 2.10 de modo que se considere, além da presença do aço, a presença da manta de CFRP. Sendo assim, para os estágios de carregamento que provocaram momentos inferiores ao momento de fissuração do concreto, foi estimada uma rigidez considerando o módulo de elasticidade secante do concreto ( $E_{c,s}$ ) e a inércia do elemento no Estádio I (Expressão 4.1).

$$I_I' = \frac{bh^3}{12} + bh \left( x_I - \frac{h}{2} \right)^2 + (\alpha_e - 1) A_s (d - x_I)^2 + \alpha_f A_f (d_f - x_I)^2 \quad (4.1)$$

em que:

$d_f$  é a distância do centro de gravidade da manta de CFRP até a extremidade comprimida da seção.

$\alpha_f$  é a relação entre o módulo de elasticidade da manta de CFRP ( $E_f$ ) e o módulo de elasticidade secante do concreto ( $E_{c,s}$ );

$A_f$  é área da manta de CFRP tracionada;

$x_I$  é a posição da linha neutra no Estádio I, dada pela Expressão 4.2;

$$x_I = \frac{\frac{bh^2}{2} + (\alpha_e - 1)A_s d + \alpha_f A_f d_f}{bh + (\alpha_e - 1)A_s + \alpha_f A_f} \quad (4.2)$$

Para os carregamentos que provocaram momentos superiores ao de fissuração, o modelo de Branson propõe uma rigidez equivalente que representa uma ponderação entre o Estádio I e o Estádio II<sub>0</sub>, considerando assim o fenômeno de *Tension Stiffening* (Expressão 2.12) e apresentando um comportamento não-linear. Quando se utiliza o reforço de CFRP, o cálculo da inércia no Estádio II<sub>0</sub>, necessário para se estimar a rigidez equivalente, se dá pela Expressão 4.3.

$$I_{II} = \frac{bx_{II}^3}{3} + (\alpha_e - 1)A_s (d - x_{II})^2 + \alpha_f A_f (d_f - x_{II})^2 \quad (4.3)$$

em que:

$x_{II}$  é a posição da linha neutra no Estádio II<sub>0</sub>, dada pela solução da Expressão 4.4.

$$\frac{bx_{II}^2}{2} + (\alpha_e A_s + \alpha_f A_f)x_{II} - \alpha_e A_s d - \alpha_f A_f d_f = 0 \quad (4.4)$$

Na Tabela 4.11 são apresentados os resultados da flecha analítica para os modelos CRA50, com base na rigidez estimada pela Equação de Branson.

Tabela 4.11 - Flecha dos modelos CRA50 calculada com base no modelo analítico de Branson.

CRA50-NI		CRA50-IC		CRA50-IT	
Carga Total (kN)	Flecha (mm)	Carga Total (kN)	Flecha (mm)	Carga Total (kN)	Flecha (mm)
0,12	0,01	0,09	0,01	0,05	0,00
1,26	0,10	2,19	0,17	1,40	0,11
6,74	0,51	9,67	0,78	7,54	0,57
12,88	2,08	13,87	2,63	12,93	2,11
18,47	5,75	18,31	5,63	17,69	5,17
23,63	9,78	23,00	9,28	22,70	9,04
27,37	12,70	26,61	12,10	26,45	11,98
29,98	14,66	29,22	14,10	29,34	14,18
32,25	16,34	31,59	15,85	31,97	16,13
34,23	17,75	33,96	17,56	34,30	17,81
35,97	18,99	35,94	18,96	36,15	19,11
		35,69	18,79	35,86	18,91

Nota: Flecha calculada conforme a Expressão 3.1, considerando a carga P, que equivale à metade da carga total lida na célula de carga.

Como pode-se observar a partir das Expressões 4.1 a 4.4, no modelo analítico de Branson é necessário se fazer o cálculo da posição da linha neutra com base no equilíbrio dos esforços internos da seção transversal. Durante o ensaio essa posição foi também estimada a partir de resultados experimentais, com base nos valores de deformação medidos para o concreto e para manta de CFRP. Com o estabelecimento dessa posição, foram calculadas as inércias no Estádio I e Estádio II<sub>0</sub>, obtendo-se um valor diferente de rigidez equivalente e, conseqüentemente, uma flecha diferente para cada estágio de carregamento. Na Tabela 4.12 são apresentados os resultados das flechas calculadas para os modelos CRA50 quando considerada a posição da linha neutra em função das deformações medidas.

Tabela 4.12 - Flecha dos modelos CRA50 calculada com base no modelo de Branson com estimativa experimental da posição da linha neutra.

CRA50-NI		CRA50-IC		CRA50-IT	
Carga Total (kN)	Flecha (mm)	Carga Total (kN)	Flecha (mm)	Carga Total (kN)	Flecha (mm)
0,12	0,01	0,09	0,01	0,05	0,00
1,26	0,09	2,19	0,16	1,40	0,10
6,74	0,44	9,67	0,77	7,54	0,49
12,88	1,84	13,87	1,92	12,93	2,00
18,47	4,92	18,31	5,23	17,69	4,86
23,63	8,58	23,00	8,63	22,70	8,48
27,37	11,72	26,61	11,42	26,45	11,30
29,98	14,08	29,22	13,46	29,34	13,62
32,25	15,97	31,59	15,26	31,97	15,65
34,23	17,52	33,96	17,02	34,30	17,38
35,97	18,80	35,94	18,45	36,15	18,71
		35,69	18,30	35,86	18,51

Nota: Flecha calculada conforme a Expressão 3.1, considerando a carga P, que equivale à metade da carga total lida na célula de carga.

Para melhor visualização do comportamento dos modelos ensaiados, os resultados obtidos foram agrupados graficamente. A seguir são apresentados os diagramas Carga-Flecha para os modelos CRA50 (Figuras 4.11 a 4.13). Nesses diagramas utilizaram-se, após os nomes dos modelos, os sufixos: “EXP.”, para indicar a curva com os resultados obtidos experimentalmente; “DIN.”, para indicar a curva com os valores estimados por meio das características dinâmicas do modelo, considerando o incremento da flecha recuperada; “ANALIT.”, para indicar a curva com os resultados obtidos por meio do modelo analítico de Branson; e “AN.CAL.”, para indicar a curva obtida também por meio do modelo de Branson, mas considerando uma calibração em função posição da linha neutra obtida de acordo com os valores de deformações medidos experimentalmente.

Ressalta-se que em todas as tabelas apresentadas os valores das flechas não levam em conta a flecha já existente antes do início do ensaio de flexão. Os valores das flechas residuais foram medidos para cada modelo, conforme apresentado pela Tabela 3.2. Nos diagramas Carga-Flecha esses valores são somados aos encontrados no ensaio de flexão, no intuito de evidenciar o deslocamento máximo no centro dos vãos dos modelos antes da ruptura.

Figura 4.11 - Diagrama Carga-Flecha do modelo CRA50-NI.

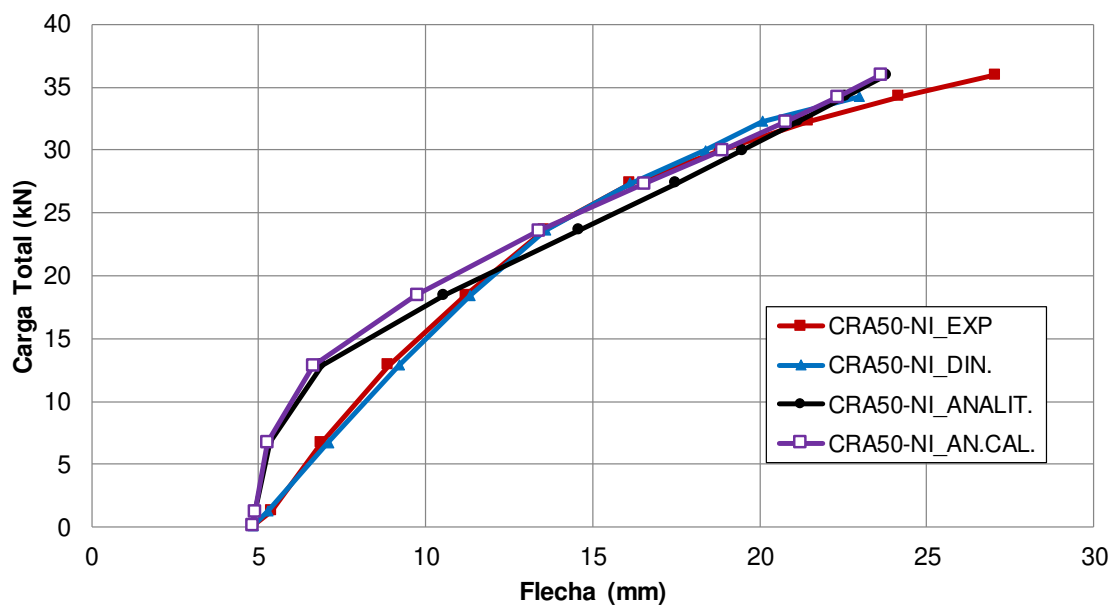


Figura 4.12 - Diagrama Carga-Flecha do modelo CRA50-IC.

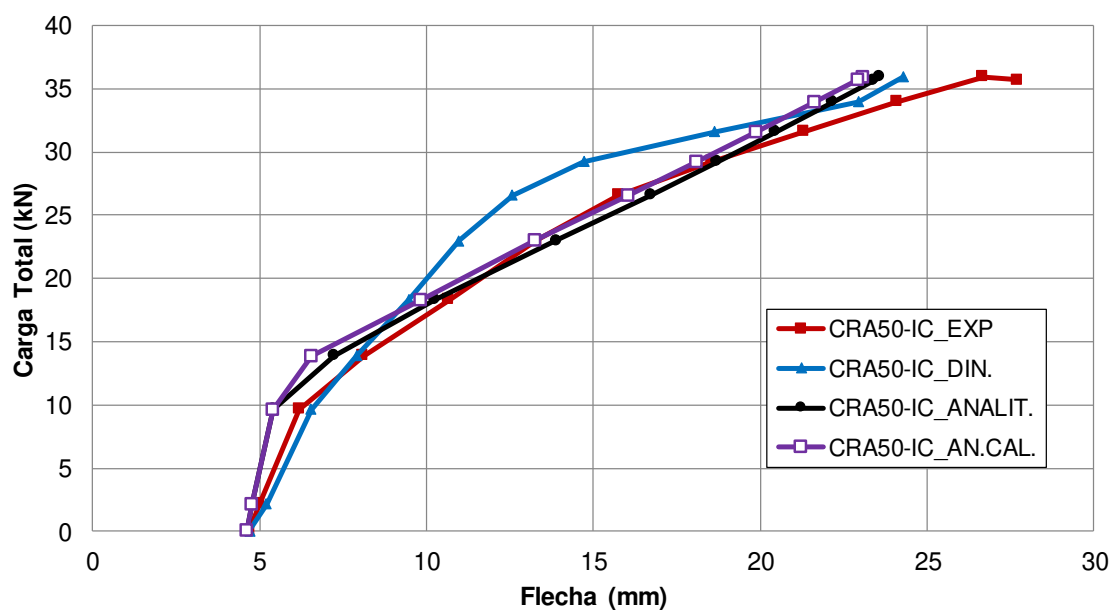
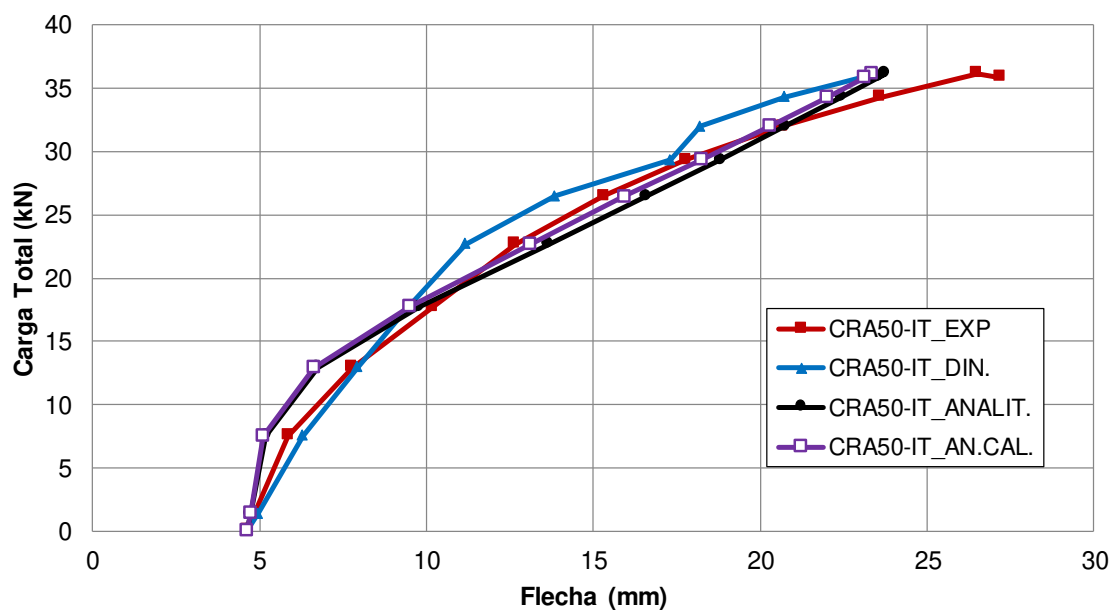


Figura 4.13 - Diagrama Carga-Flecha do modelo CRA50-IT.



#### 4.3.2. Modelos CRA63

Nas tabelas 4.13, 4.14 e 4.15 são apresentados os resultados dos ensaios de flexão realizados para os modelos CRA63.

Tabela 4.13 - Modelo CRA63-NI.

Carga Total (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	$10^5 \times EI$ (Nm <sup>2</sup> )	$EI_{residual}$ (%)
0,07	0,09	67,41	5,82	100%
1,16	0,34	68,92	6,08	105%
5,99	1,58	68,80	6,06	104%
12,22	3,20	67,80	5,89	101%
19,31	5,51	68,07	5,94	102%
26,76	7,96	64,87	5,39	93%
33,19	10,54	65,27	5,46	94%
35,84	13,49	61,99	4,92	85%
38,48	16,44	58,82	4,43	76%
40,82	19,46	57,31	4,21	72%
42,85	22,41	56,08	4,03	69%
43,66	24,00	-	-	-

Tabela 4.14 - Modelo CRA63-IC.

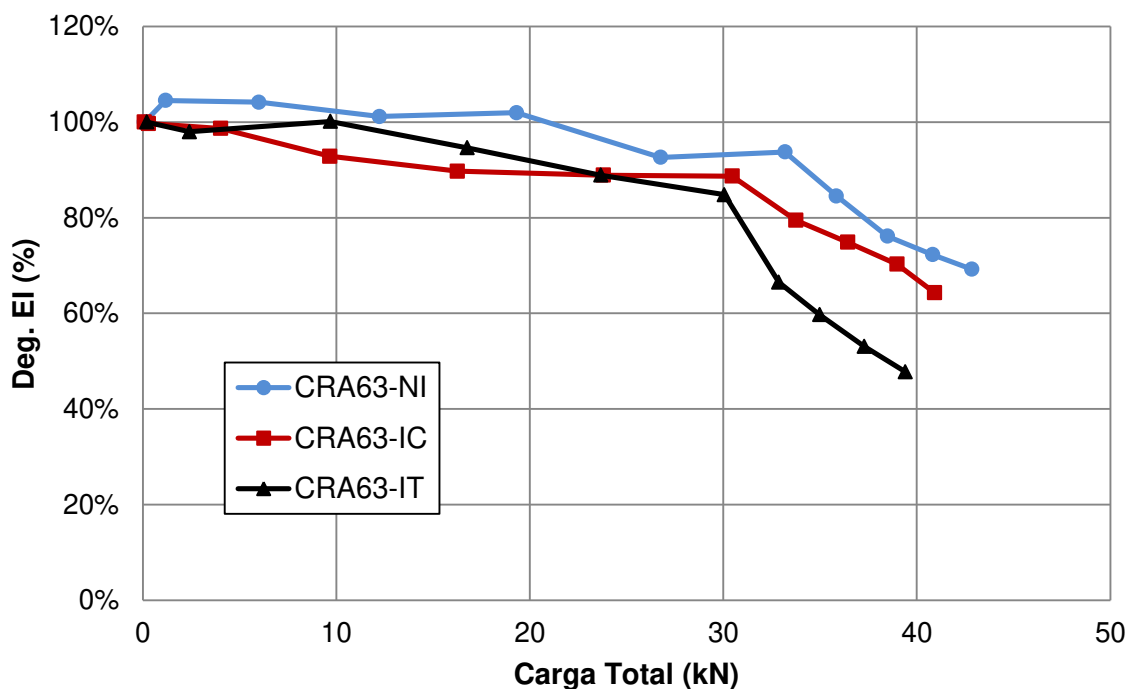
Carga Total (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	$10^5 \times EI$ (Nm <sup>2</sup> )	$EI_{\text{residual}}$ (%)
0,07	0,08	74,82	7,17	100%
0,28	0,16	74,71	7,15	100%
4,01	1,42	74,33	7,08	99%
9,65	2,95	72,11	6,66	93%
16,25	5,33	70,87	6,43	90%
23,80	7,82	70,55	6,38	89%
30,46	10,35	70,47	6,36	89%
33,75	13,33	66,70	5,70	79%
36,43	16,27	64,74	5,37	75%
38,97	19,14	62,73	5,04	70%
40,92	21,78	60,00	4,61	64%
42,68	26,49	-	-	-

Tabela 4.15 - Modelo CRA63-IT.

Carga Total (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	$10^5 \times EI$ (Nm <sup>2</sup> )	$EI_{\text{residual}}$ (%)
0,20	0,07	76,54	7,50	100%
2,40	0,62	75,76	7,35	98%
9,68	2,10	76,60	7,51	100%
16,76	4,02	74,46	7,10	95%
23,67	5,13	72,17	6,67	89%
30,06	9,33	70,48	6,36	85%
32,87	12,33	62,41	4,99	66%
34,98	15,14	59,15	4,48	60%
37,29	17,97	55,75	3,98	53%
39,40	20,64	52,90	3,58	48%
39,73	21,55	-	-	-

Na Figura 4.14 é apresentado o desenvolvimento da rigidez, em termos percentuais, ao longo do ensaio de flexão dos modelos CRA63.

Figura 4.14 – Diagrama de degradação da rigidez dos modelos CRA63.



Na Tabela 4.16 são apresentados os valores das flechas estimadas com base nas características dinâmicas, considerando a soma das flechas residuais de cada estágio e o coeficiente de ajuste.

Tabela 4.16 - Flecha dos modelos CRA63 calculada com base características dinâmicas.

CRA63-NI		CRA63-IC		CRA63-IT	
Carga Total (kN)	Flecha (mm)	Carga Total (kN)	Flecha (mm)	Carga Total (kN)	Flecha (mm)
0,07	0,05	0,07	0,06	0,20	0,11
1,16	0,40	0,28	0,19	2,40	0,77
5,99	1,78	4,01	1,32	9,68	2,54
12,22	3,63	9,65	2,95	16,76	4,67
19,31	5,65	16,25	4,99	23,67	6,83
26,76	8,48	23,80	7,10	30,06	9,11
33,19	10,67	30,46	9,25	32,87	13,25
35,84	13,99	33,75	12,50	34,98	16,61
38,48	17,75	36,43	15,54	37,29	20,41
40,82	20,97	38,97	18,69	39,40	24,24
42,85	24,14	40,92	22,10	-	-
-	-	-	-	-	-

Nota: Flecha calculada conforme a Expressão 3.1, considerando a carga P, que equivale à metade da carga total lida na célula de carga.

Na Tabela 4.17 são apresentados os resultados da flecha analítica para os modelos CRA63, com base na rigidez estimada pela Equação de Branson.

Tabela 4.17 - Flecha dos modelos CRA63 calculada com base no modelo analítico de Branson.

CRA63-NI		CRA63-IC		CRA63-IT	
Carga Total (kN)	Flecha (mm)	Carga Total (kN)	Flecha (mm)	Carga Total (kN)	Flecha (mm)
0,07	0,01	0,07	0,01	0,20	0,01
1,16	0,09	0,28	0,02	2,40	0,18
5,99	0,45	4,01	0,30	9,68	0,79
12,22	1,71	9,65	0,78	16,76	4,14
19,31	5,72	16,25	3,83	23,67	8,50
26,76	10,41	23,80	8,58	30,06	12,38
33,19	14,19	30,46	12,62	32,87	14,00
35,84	15,67	33,75	14,50	34,98	15,19
38,48	17,11	36,43	15,99	37,29	16,46
40,82	18,37	38,97	17,38	39,40	17,61
42,85	19,44	40,92	18,42	39,73	17,78
43,66	19,87	42,68	19,35		

Nota: Flecha calculada conforme a Expressão 3.1, considerando a carga P, que equivale à metade da carga total lida na célula de carga.

Na Tabela 4.18 são apresentados os resultados das flechas calculadas para os modelos CRA63 quando considerada a posição da linha neutra em função das deformações medidas.

Tabela 4.18 - Flecha dos modelos CRA63 calculada com base no modelo de Branson com estimativa experimental da posição da linha neutra.

CRA63-NI		CRA63-IC		CRA63-IT	
Carga Total (kN)	Flecha (mm)	Carga Total (kN)	Flecha (mm)	Carga Total (kN)	Flecha (mm)
0,07	0,00	0,07	0,01	0,20	0,01
1,16	0,07	0,28	0,02	2,40	0,18
5,99	0,31	4,01	0,24	9,68	0,78
12,22	1,65	9,65	0,78	16,76	3,55
19,31	5,18	16,25	3,56	23,67	7,42
26,76	9,13	23,80	7,76	30,06	10,84
33,19	12,33	30,46	11,25	32,87	13,08
35,84	14,71	33,75	13,73	34,98	14,51
38,48	16,31	36,43	15,48	37,29	15,93
40,82	17,68	38,97	17,03	39,40	17,23
42,85	18,87	40,92	18,16	39,73	17,45
43,66	19,43	42,68	19,15		

Nota: Flecha calculada conforme a Expressão 3.1, considerando a carga P, que equivale à metade da carga total lida na célula de carga.

A seguir são apresentados os diagramas Carga-Flecha para os modelos CRA63 (Figuras 4.15 a 4.17). Ressalta-se que nesses diagramas os valores das flechas residuais dos modelos são somados aos encontrados no ensaio de flexão.

Figura 4.15 - Diagrama Carga-Flecha do modelo CRA63-NI.

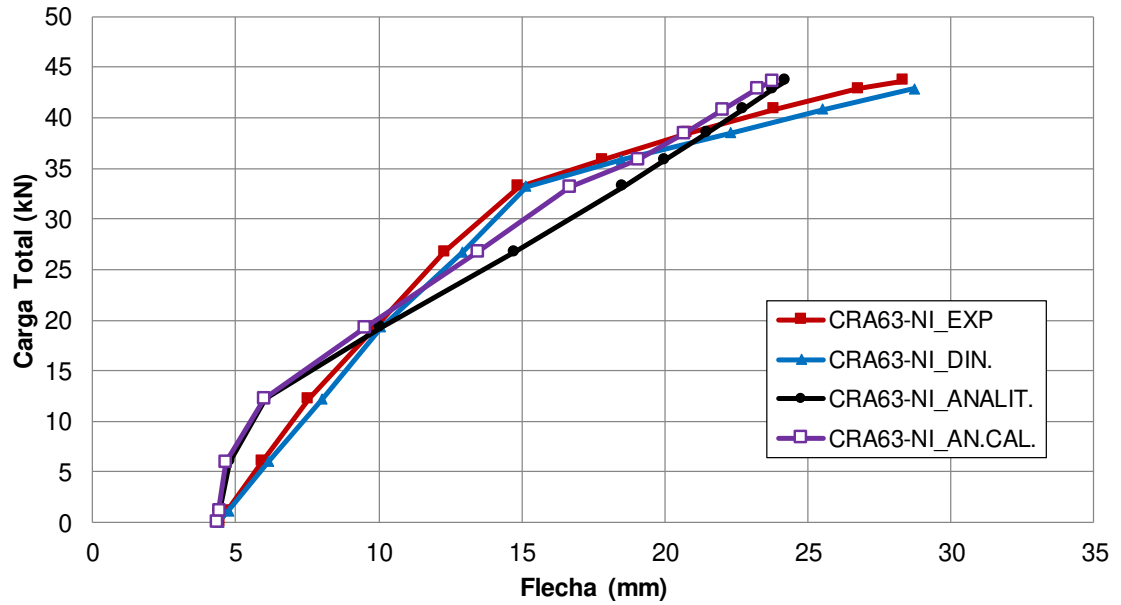


Figura 4.16 - Diagrama Carga-Flecha do modelo CRA63-IC.

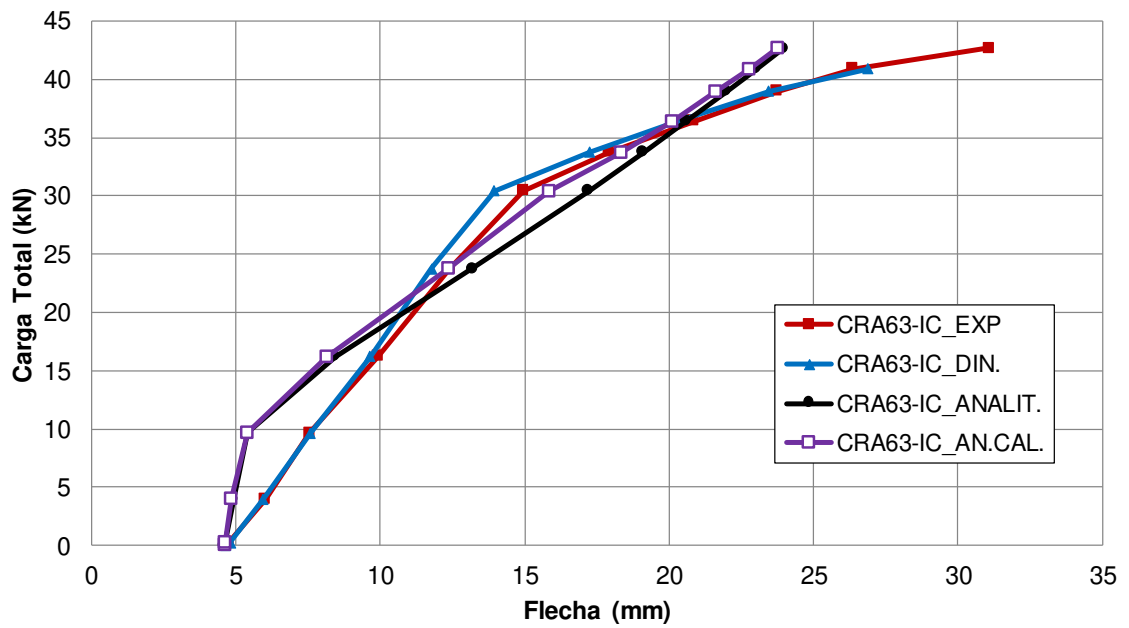
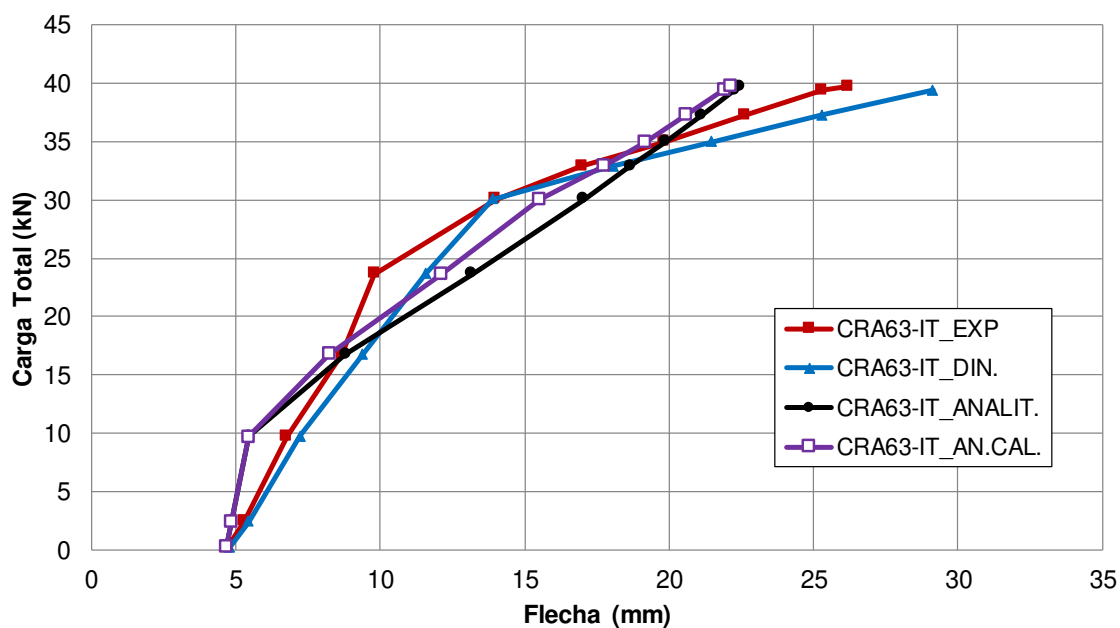


Figura 4.17 - Diagrama Carga-Flecha do modelo CRA63-IT.



### 4.3.3. Modelos CRA80

Nas tabelas 4.19, 4.20 e 4.21 são apresentados os resultados dos ensaios de flexão realizados para os modelos CRA63.

Tabela 4.19 - Modelo CRA80-NI.

Carga Total (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	$10^5 \times EI$ (Nm <sup>2</sup> )	$EI_{residual}$ (%)
0,08	0,06	67,27	5,83	100%
1,31	0,38	66,97	5,78	99%
5,86	1,47	67,30	5,84	100%
12,07	3,16	68,09	5,97	102%
19,53	5,30	68,06	5,97	102%
27,41	7,48	68,07	5,97	102%
34,96	9,57	68,56	6,05	104%
42,12	11,76	67,93	5,94	102%
46,13	14,27	66,59	5,71	98%
48,36	16,87	64,82	5,41	93%
50,50	19,55	63,24	5,15	88%
51,84	22,71	59,87	4,62	79%
50,00	24,76	-	-	-

Tabela 4.20 - Modelo CRA80-IC.

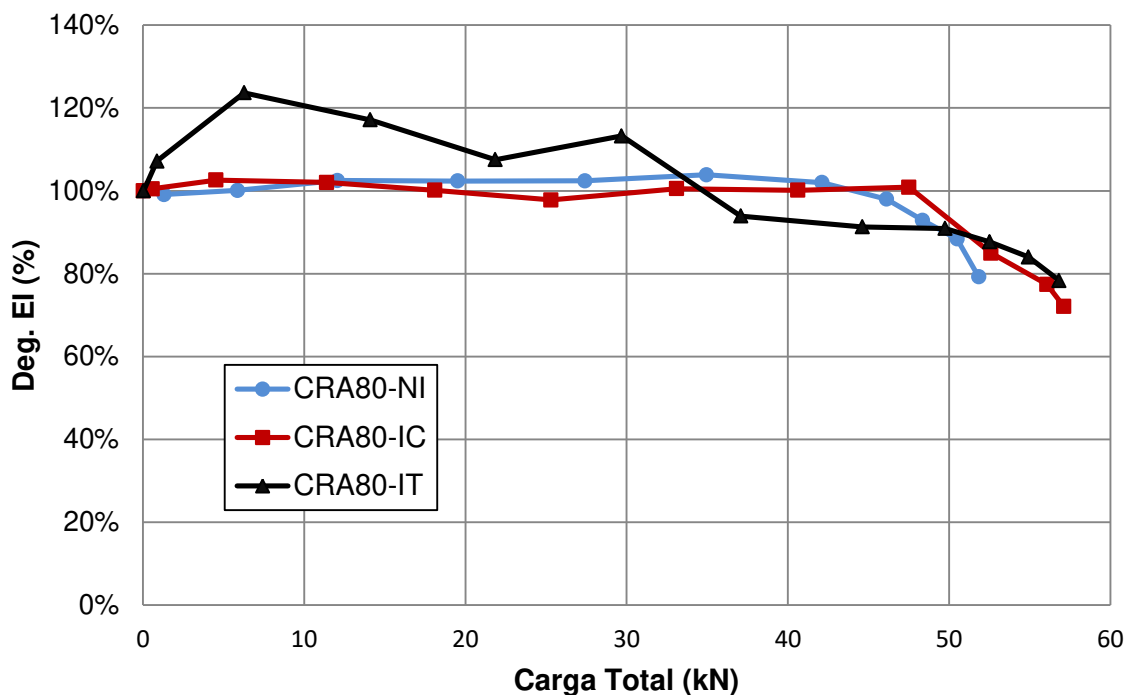
Carga Total (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	$10^5 \times EI$ (Nm <sup>2</sup> )	$EI_{\text{residual}}$ (%)
0,03	0,11	76,47	7,53	100%
0,58	0,17	76,66	7,57	101%
4,53	0,91	77,45	7,73	103%
11,39	2,25	77,25	7,69	102%
18,11	4,34	76,53	7,54	100%
25,31	6,53	75,63	7,37	98%
33,10	8,83	76,67	7,57	101%
40,62	11,14	76,52	7,54	100%
47,51	13,49	76,81	7,60	101%
52,61	16,87	70,49	6,40	85%
56,06	20,02	67,28	5,83	77%
57,11	22,33	64,95	5,43	72%
58,72	23,88	-	-	-

Tabela 4.21 - Modelo CRA80-IT.

Carga Total (kN)	Flecha (mm)	Freq (Hz)	$10^5 \times EI$ (Nm <sup>2</sup> )	$EI_{\text{residual}}$ (%)
0,03	0,08	72,11	6,70	100%
0,87	0,22	74,64	7,18	107%
6,28	1,26	80,18	8,28	124%
14,10	2,77	78,03	7,84	117%
21,86	4,88	74,77	7,20	108%
29,69	7,09	76,73	7,58	113%
37,08	9,39	69,87	6,29	94%
44,64	11,86	68,90	6,12	91%
49,76	14,40	68,76	6,09	91%
52,53	17,08	67,53	5,87	88%
54,92	19,57	66,10	5,63	84%
56,83	22,10	63,82	5,25	78%
57,94	24,91	-	-	-

Na Figura 4.18 é apresentado o desenvolvimento da rigidez, em termos percentuais, ao longo do ensaio de flexão dos modelos CRA63.

Figura 4.18 - Diagrama de degradação da rigidez dos modelos CRA80.



Na Tabela 4.22 são apresentados os valores das flechas estimadas com base nas características dinâmicas, considerando a soma das flechas residuais de cada estágio e o coeficiente de ajuste.

Tabela 4.22 - Flecha dos modelos CRA80 calculada com base características dinâmicas.

CRA80-NI		CRA80-IC		CRA80-IT	
Carga Total (kN)	Flecha (mm)	Carga Total (kN)	Flecha (mm)	Carga Total (kN)	Flecha (mm)
0,08	0,07	0,03	0,04	0,03	0,03
1,31	0,48	0,58	0,30	0,87	0,31
5,86	1,75	4,53	1,21	6,28	1,50
12,07	3,44	11,39	2,70	14,10	3,34
19,53	5,45	18,11	4,45	21,86	5,33
27,41	7,56	25,31	6,18	29,69	6,90
34,96	9,34	33,10	7,83	37,08	9,95
42,12	11,57	40,62	9,55	44,64	12,40
46,13	14,12	47,51	11,20	49,76	14,51
48,36	17,06	52,61	15,77	52,53	17,00
50,50	19,92	56,06	19,83	54,92	19,78
51,84	24,03	57,11	22,60	56,83	23,02

Nota: Flecha calculada conforme a Expressão 3.1, considerando a carga P, que equivale à metade da carga total lida na célula de carga.

Na Tabela 4.23 são apresentados os resultados da flecha analítica para os modelos CRA80, com base na rigidez estimada pela Equação de Branson.

Tabela 4.23 - Flecha dos modelos CRA80 calculada com base no modelo analítico de Branson.

CRA80-NI		CRA80-IC		CRA80-IT	
Carga Total (kN)	Flecha (mm)	Carga Total (kN)	Flecha (mm)	Carga Total (kN)	Flecha (mm)
0,08	0,01	0,03	0,00	0,03	0,00
1,31	0,10	0,58	0,04	0,87	0,06
5,86	0,43	4,53	0,34	6,28	0,47
12,07	1,58	11,39	1,33	14,10	2,43
19,53	5,06	18,11	4,35	21,86	6,20
27,41	8,80	25,31	7,84	29,69	9,82
34,96	12,08	33,10	11,29	37,08	12,96
42,12	15,01	40,62	14,40	44,64	16,01
46,13	16,60	47,51	17,14	49,76	18,02
48,36	17,47	52,61	19,13	52,53	19,10
50,50	18,31	56,06	20,46	54,92	20,02
51,84	18,83	57,11	20,86	56,83	20,75
50,00	18,11	58,72	21,48	57,94	21,18

Nota: Flecha calculada conforme a Expressão 3.1, considerando a carga P, que equivale à metade da carga total lida na célula de carga.

Na Tabela 4.24 são apresentados os resultados das flechas calculadas para os modelos CRA80 quando considerada a posição da linha neutra em função das deformações medidas.

Tabela 4.24 - Flecha dos modelos CRA80 calculada com base no modelo de Branson com estimativa experimental da posição da linha neutra.

CRA80-NI		CRA80-IC		CRA80-IT	
Carga Total (kN)	Flecha (mm)	Carga Total (kN)	Flecha (mm)	Carga Total (kN)	Flecha (mm)
0,08	0,00	0,03	0,00	0,03	0,00
1,31	0,08	0,58	0,04	0,87	0,06
5,86	0,35	4,53	0,34	6,28	0,45
12,07	1,46	11,39	1,19	14,10	1,95
19,53	4,07	18,11	3,75	21,86	4,95
27,41	6,83	25,31	6,82	29,69	8,06
34,96	9,33	33,10	9,84	37,08	11,09
42,12	11,73	40,62	12,59	44,64	13,55
46,13	13,73	47,51	15,09	49,76	15,82
48,36	16,04	52,61	18,15	52,53	17,72
50,50	17,25	56,06	19,88	54,92	18,96
51,84	17,95	57,11	20,37	56,83	19,91
50,00	17,46	58,72	21,02	57,94	20,49

Nota: Flecha calculada conforme a Expressão 3.1, considerando a carga P, que equivale à metade da carga total lida na célula de carga.

A seguir são apresentados os diagramas Carga-Flecha para os modelos CRA80 (Figuras 4.19 a 4.21). Ressalta-se que, da mesma forma que nos outros casos, nesses diagramas os valores das flechas residuais dos modelos são somados aos encontrados no ensaio de flexão.

Figura 4.19 - Diagrama Carga-Flecha do modelo CRA80-NI.

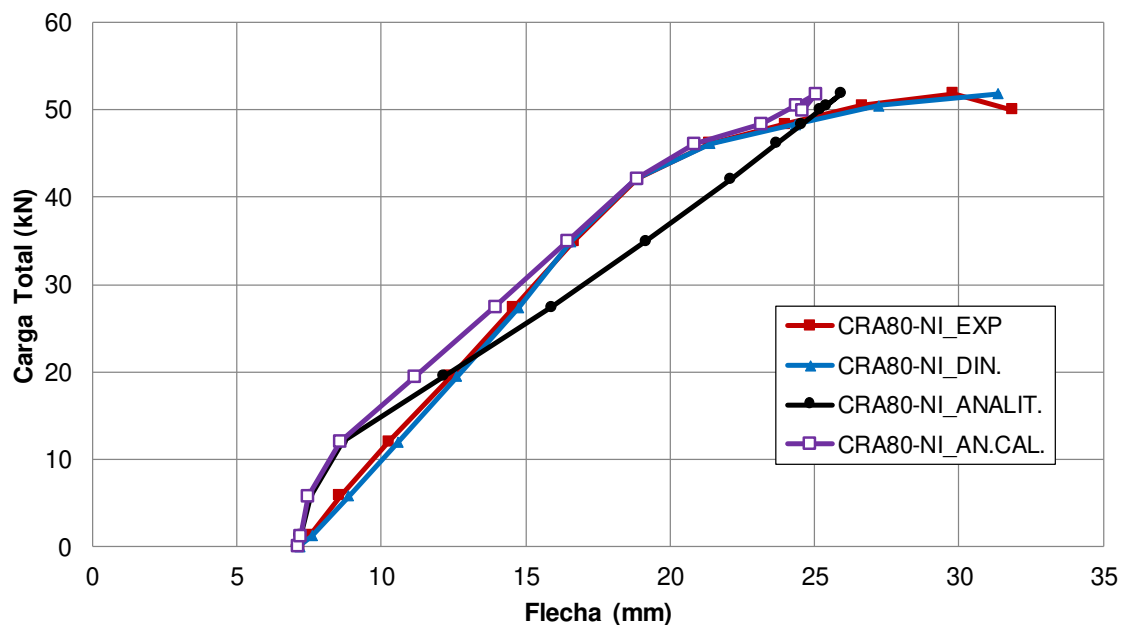


Figura 4.20 - Diagrama Carga-Flecha do modelo CRA80-IC.

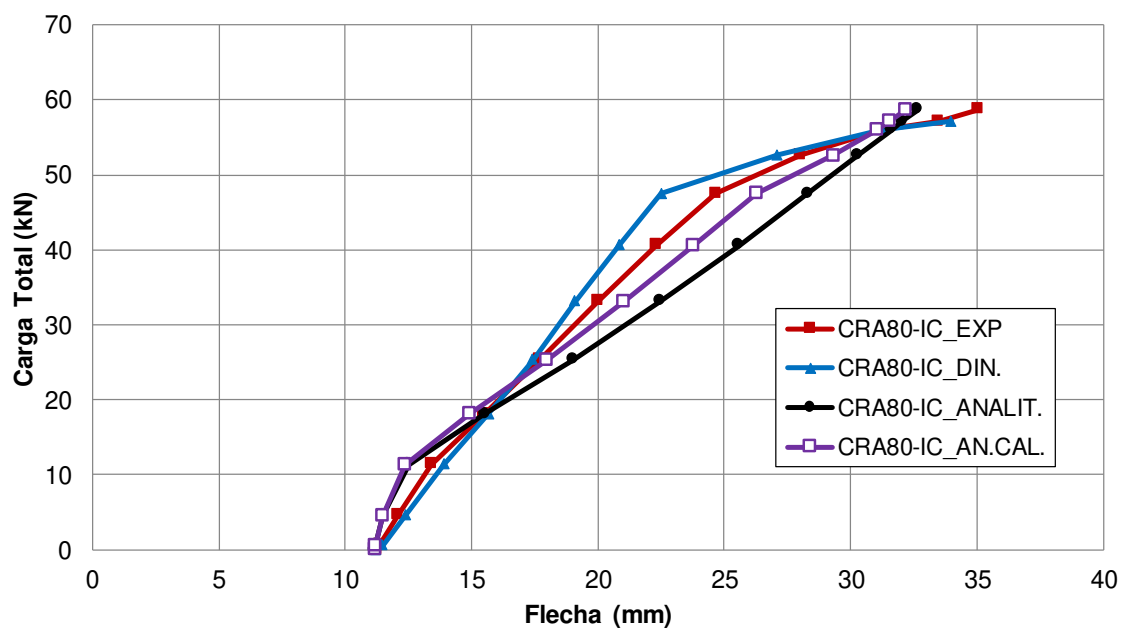
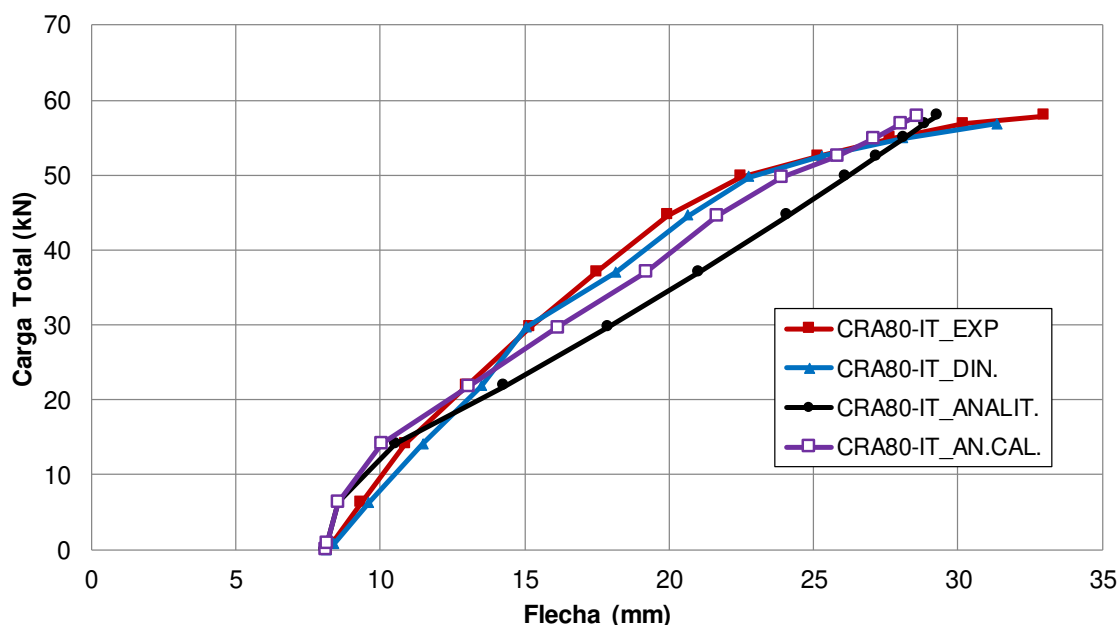


Figura 4.21 - Diagrama Carga-Flecha do modelo CRA80-IT.



#### 4.3.4. Discussão dos resultados

Com base nos resultados obtidos, é possível afirmar que as estimativas realizadas com base nas características dinâmicas e no modelo analítico de Branson foram muito próximas ao comportamento real dos modelos ensaiados à flexão. Observa-se, pelos diagramas Carga-Flecha apresentados no item anterior, que todas as curvas apresentam uma tendência similar, com uma diminuição na inclinação ao longo do carregamento, o que indica a degradação da rigidez que ocorre.

Verifica-se que os resultados baseados no modelo analítico proposto por Branson se aproximam bastante do comportamento real dos elementos. Nota-se uma boa representatividade do modelo, seja quando a posição da linha neutra é determinada pelas equações de equilíbrio da seção (“ANALIT.”) ou quando é calculada pelas deformações medidas da manta de CFRP e do concreto (“AN.CAL.”). Comparando essas curvas nos diagramas Carga-Flecha, é possível notar que, para os estágios iniciais de carregamento, as duas são praticamente coincidentes, se distanciando para carregamentos mais elevados. Esse distanciamento é pouco perceptível para os modelos CRA50, se torna um pouco mais claro para os modelos CRA63 e se evidencia, principalmente, nos diagramas dos modelos CRA80.

Fica claro que a curva que leva em conta a posição da linha neutra obtida com base nas deformações medidas se aproxima mais do comportamento real do que a curva analítica. Essa

diferença pode ser explicada pelo fato de as expressões 4.2 e 4.4, utilizadas para se obter a posição da linha neutra, considerarem um comportamento elástico-linear dos materiais que compõem a seção, o que não ocorre na realidade para níveis de tensão mais elevados. Em contrapartida, quando se faz a determinação da posição com base nos dados de deformação adquiridos experimentalmente, esse comportamento não-linear dos materiais acaba sendo levado em consideração, aproximando mais os resultados estimados dos resultados experimentais.

Outro ponto relevante que pode ser observado quando se comparam os resultados experimentais com os resultados estimados analiticamente é a maior rigidez inicial observada nos modelos analíticos. Esses modelos consideram que as peças estão íntegras no início do ensaio. Entretanto, conforme discutido no item 4.2, até mesmo as peças submetidas ao processo de injeção de fissuras com resinas epóxi não apresentam rigidez semelhante ao das peças íntegras. Sendo assim, pode-se inferir que a diferença observada nos diagramas Carga-Flecha para os estágios iniciais de carregamento se deve ao nível de degradação já existente em todos os elementos.

Pode-se observar pelos diagramas Carga-Flecha apresentados nos itens 4.3.1, 4.3.2 e 4.3.3 que os resultados que consideraram a estimativa da rigidez feita por meio dos ensaios dinâmicos se aproximam ainda mais do resultado experimental do que o modelo analítico de Branson. Mesmo existindo algumas divergências, como em trechos dos diagramas dos modelos CRA50-IC e CRA50-IT (Figuras 4.12 e 4.13), notou-se que o coeficiente de ajuste adotado fez com que as curvas ficassem muito próximas. Isso indica que a metodologia de estimativa de rigidez por meio da frequência natural de vibração é bastante adequada na avaliação estrutural, mesmo para elementos reforçados.

Observa-se ainda que, para os modelos CRA63 e CRA80, as curvas obtidas com base na rigidez estimada por meio de ensaios dinâmicos representam melhor o fenômeno de *Tension Stiffening* do que os modelos analíticos. Isso fica evidente pelo distanciamento existente entre essas curvas e as curvas experimentais no trecho que retrata o estágio II.

Para realizar uma avaliação do comportamento dos modelos em função do tipo de recuperação adotado são apresentados os diagramas Carga-Flecha obtidos para os elementos com mesma taxa de armadura e processo de recuperação estrutural distinto (Figuras 4.22, 4.23 e 4.24).

Ressalta-se que para melhor visualização comparativa dos resultados, as flechas residuais não foram consideradas.

Figura 4.22 - Diagrama Carga-Flecha obtido no ensaio de flexão dos modelos CRA50.

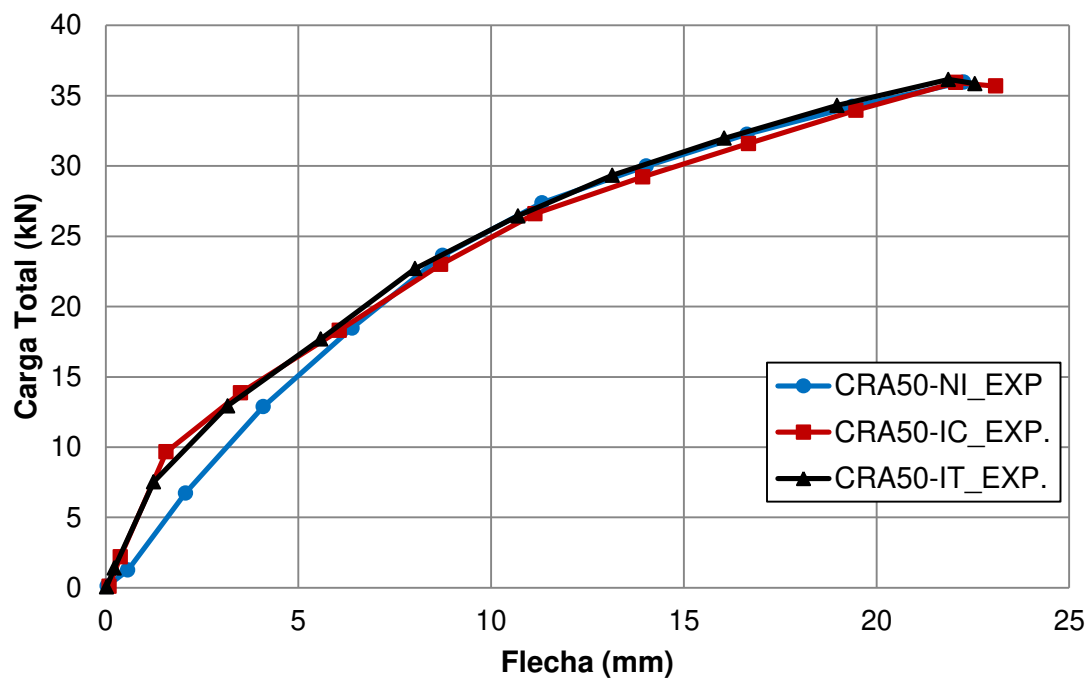


Figura 4.23 - Diagrama Carga-Flecha obtido no ensaio de flexão dos modelos CRA63.

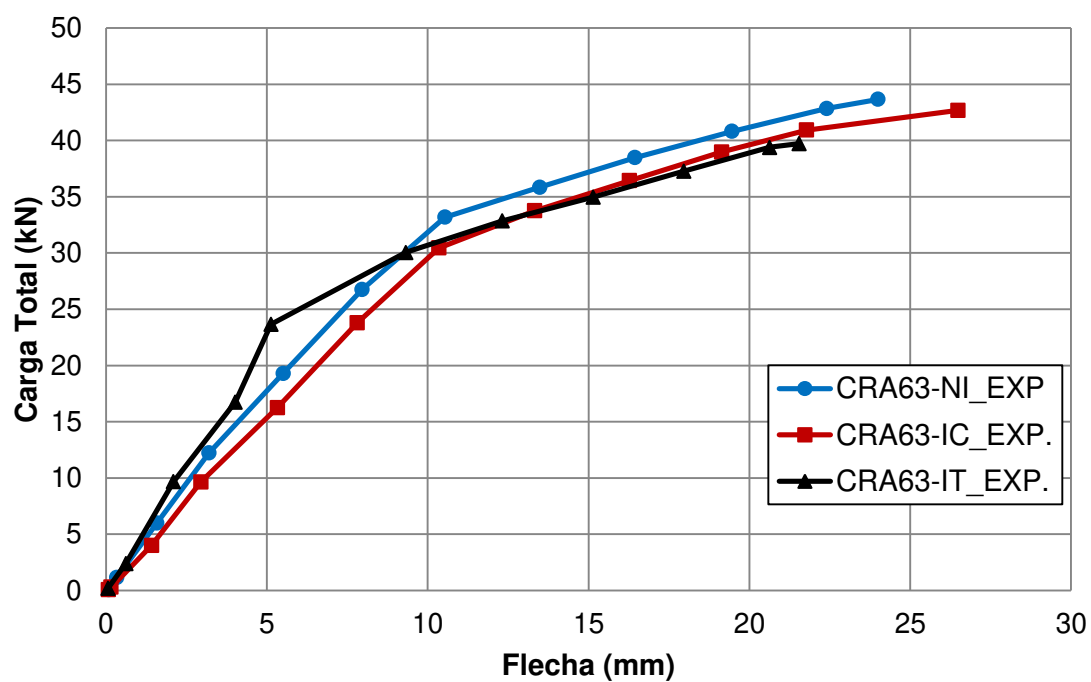
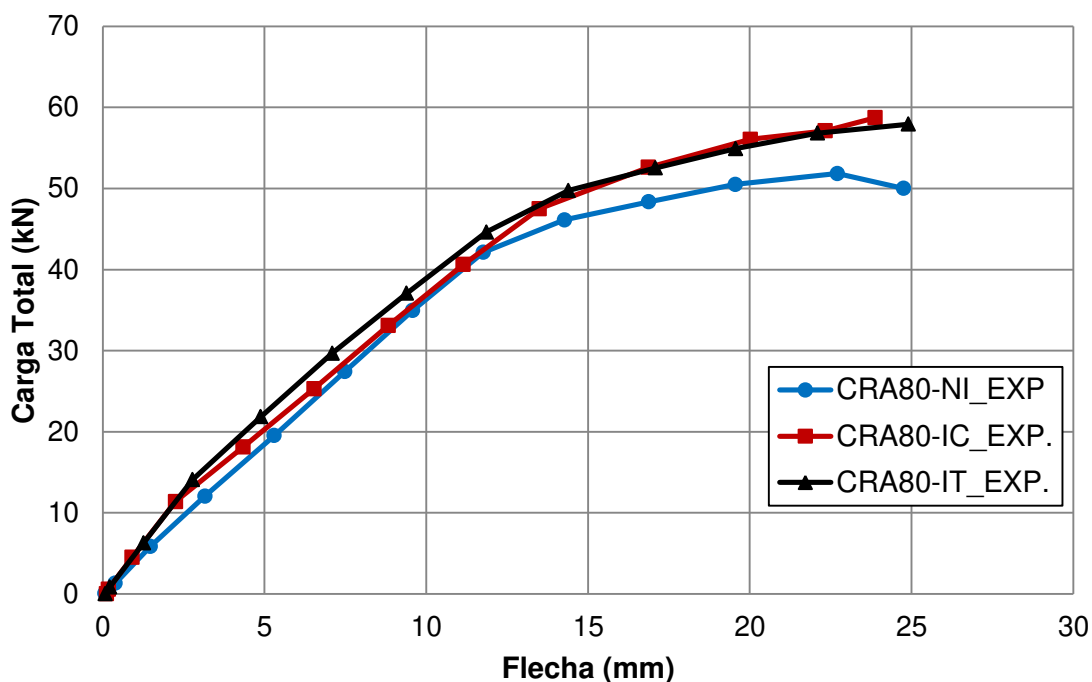


Figura 4.24 - Diagrama Carga-Flecha obtido no ensaio de flexão dos modelos CRA80.



Com base nos diagramas das figuras 4.22, 4.23 e 4.24, é possível observar que existe uma diferença na rigidez dos elementos nos estágios iniciais de carga, que fica menos pronunciada ao longo da aplicação do carregamento. Essa diferença é relacionada ao processo de recuperação estrutural adotado. Esperava-se que os elementos que não tiveram suas fissuras injetadas (“NI”) apresentassem uma rigidez menor e, portanto, uma inclinação menor da curva. Isso não ocorreu para os modelos CRA63. Observa-se que o elemento injetado com a resina MC-Injekt 1264 Compact, CRA63-IC, apresentou uma rigidez menor do que o modelo não injetado, CRA63-NI, nos estágios iniciais de carregamento, indo de encontro também aos resultados obtidos pelo ensaio dinâmico.

Quando se observa o comportamento dos modelos CRA50 e CRA80, nota-se que os elementos sem injeção apresentam um comportamento mais próximo do esperado, com uma rigidez inferior à dos modelos injetados. Em todos os casos fica evidente que o procedimento de injeção não influencia na carga última, sendo que o nível de degradação para todos os modelos tende a ser o mesmo em estágios mais elevados de carregamento. O diagrama dos modelos CRA50 deixa esse comportamento muito bem evidenciado. Na Figura 4.22 fica nítida a diferença na rigidez inicial dos modelos e a sobreposição das curvas a partir de certo estágio de carga. Ao final, observa-se ainda que a falha ocorre praticamente para o mesmo carregamento.

Outro ponto importante para a análise do comportamento dos modelos ensaiados é a comparação dos resultados obtidos após a recuperação estrutural, em comparação com aqueles observados quando o ensaio foi realizado nas peças íntegras. Para visualizar possíveis diferenças, apresentam-se nas Figuras 4.25, 4.26 e 4.27, além dos diagramas Carga-Flecha obtidos neste estudo, aqueles obtidos pelo estudo realizado por Lima (2017). Para cada grupo de modelos com mesma taxa de armadura é apresentada a curva média obtida por Lima (2017), que devido à baixa variação de resultados, é suficientemente representativa.

Figura 4.25 - Diagrama Carga-Flecha modelos CRA50 em comparação com Lima (2017).

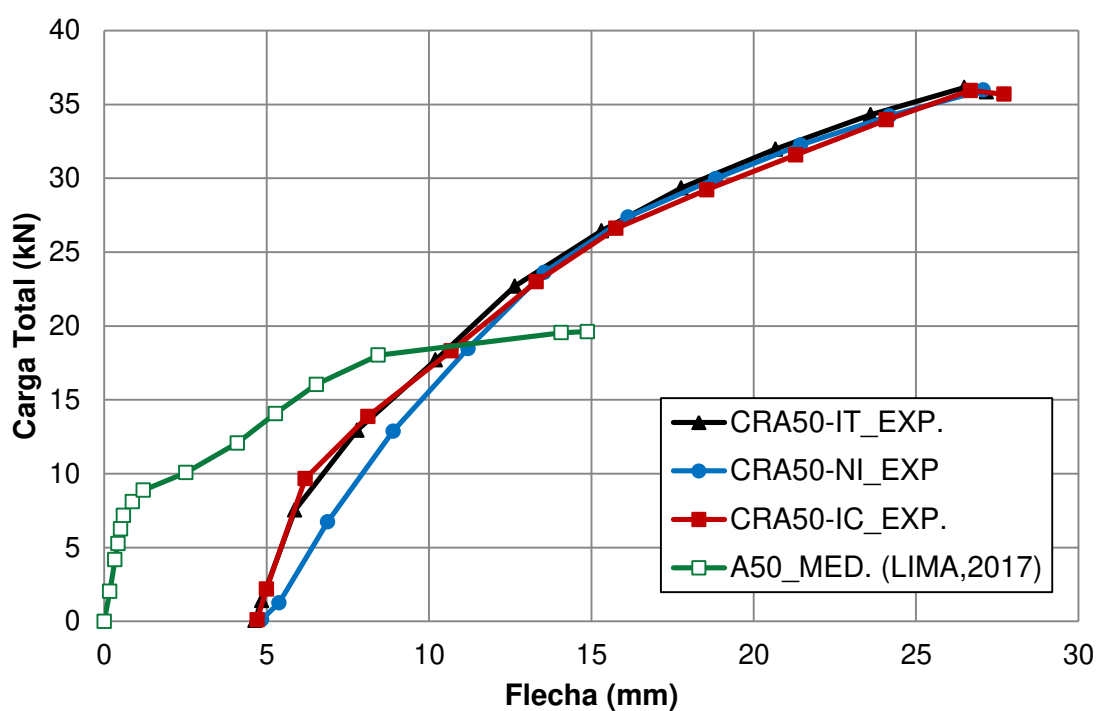


Figura 4.26 - Diagrama Carga-Flecha modelos CRA63 em comparação com Lima (2017).

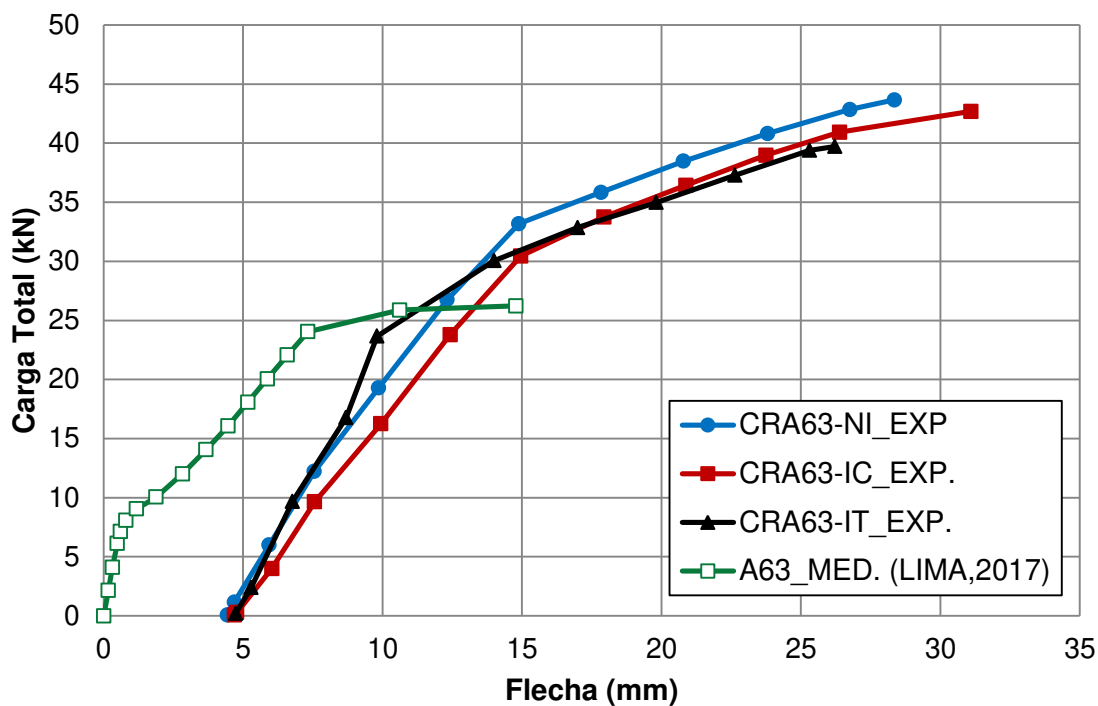
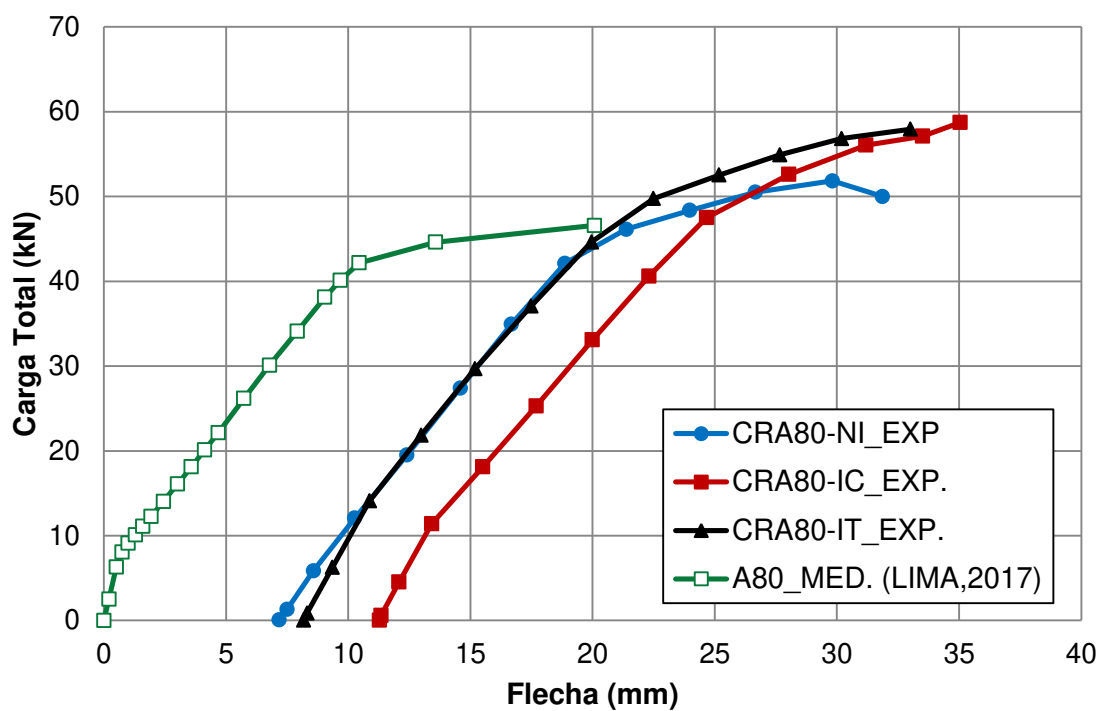


Figura 4.27 - Diagrama Carga-Flecha modelos CRA80 em comparação com Lima (2017).



Com base nos diagramas das figuras 4.25, 4.26 e 4.27, nota-se que os elementos não injetados têm uma rigidez próxima da fase correspondente ao Estádio II do modelo original. Por outro

lado, os modelos que passaram pelo procedimento de injeção apresentam um trecho inicial com rigidez menor que a correspondente ao Estádio I da viga original, mas superior à rigidez correspondente ao Estádio II. A partir da carga de fissuração nos modelos injetados, a rigidez passa a ficar muito próxima à do Estádio II do modelo original e à do modelo reforçado não injetado.

Fica clara a diferença da rigidez dos modelos íntegros em relação aos modelos recuperados. Com isso, pode-se confirmar que a recuperação estrutural não foi capaz de reestabelecer completamente a rigidez dos elementos. Em contrapartida, observa-se uma mudança de inclinação menos acentuada para as peças recuperadas quando o carregamento se aproxima do seu valor último. Isso indica que a perda de rigidez ocorre de maneira menos brusca para os modelos recuperados. Outro fato notório que pode ser observado nos diagramas é o aumento considerável da carga última, principalmente para os modelos CRA50, no qual esse valor praticamente dobra. Esse aspecto será discutido mais detalhadamente no item 4.4.

#### **4.4. Avaliação dos modos de falha dos modelos recuperados**

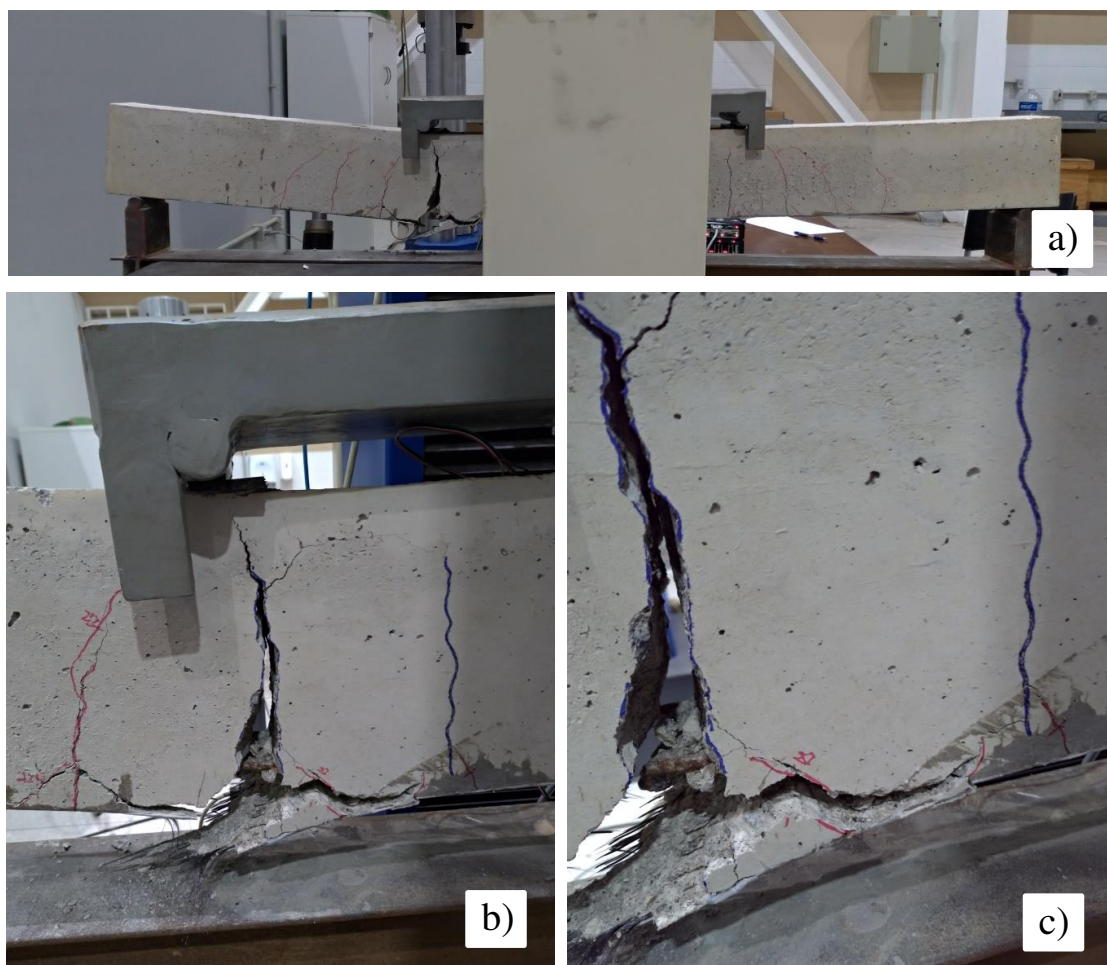
A seguir são expostos os modos de falha de cada modelo ao ser submetido ao ensaio de flexão. Em cada tópico são apresentados os valores máximos de carregamento, flecha e deformação medidos, além de imagens que buscam facilitar a compreensão do modo de falha observado e evidenciar a evolução da fissuração ao longo da aplicação do carregamento.

Esses resultados são organizados em função da taxa de armadura dos modelos, uma vez que houve certa similaridade dentro de um mesmo grupo. Apresentam-se os resultados dos modelos CRA50, CRA63 e CRA80, respectivamente. A organização da tabela contendo as leituras máximas dos ensaios é discutida no item 4.4.1 e o mesmo critério é válido para os demais casos. Ao final apresenta-se uma discussão sobre os modos de falha observados e de sua relação com a taxa de armadura e o processo de recuperação adotado.

##### **4.4.1. Modelos CRA50**

O modo de falha do modelo CRA50-NI é apresentado na Figura 4.28. Nela é possível observar que a falha se deu na parte tracionada do elemento, na região próxima ao ponto de aplicação do carregamento. Nota-se ainda que ocorreu ruptura da manta de CFRP e da armadura positiva da seção.

Figura 4.28 - a) Falha do modelo CRA50-NI. b) Detalhe do ponto onde ocorreu a falha do modelo. c) Detalhe do rompimento da manta de CFRP e da armadura positiva.



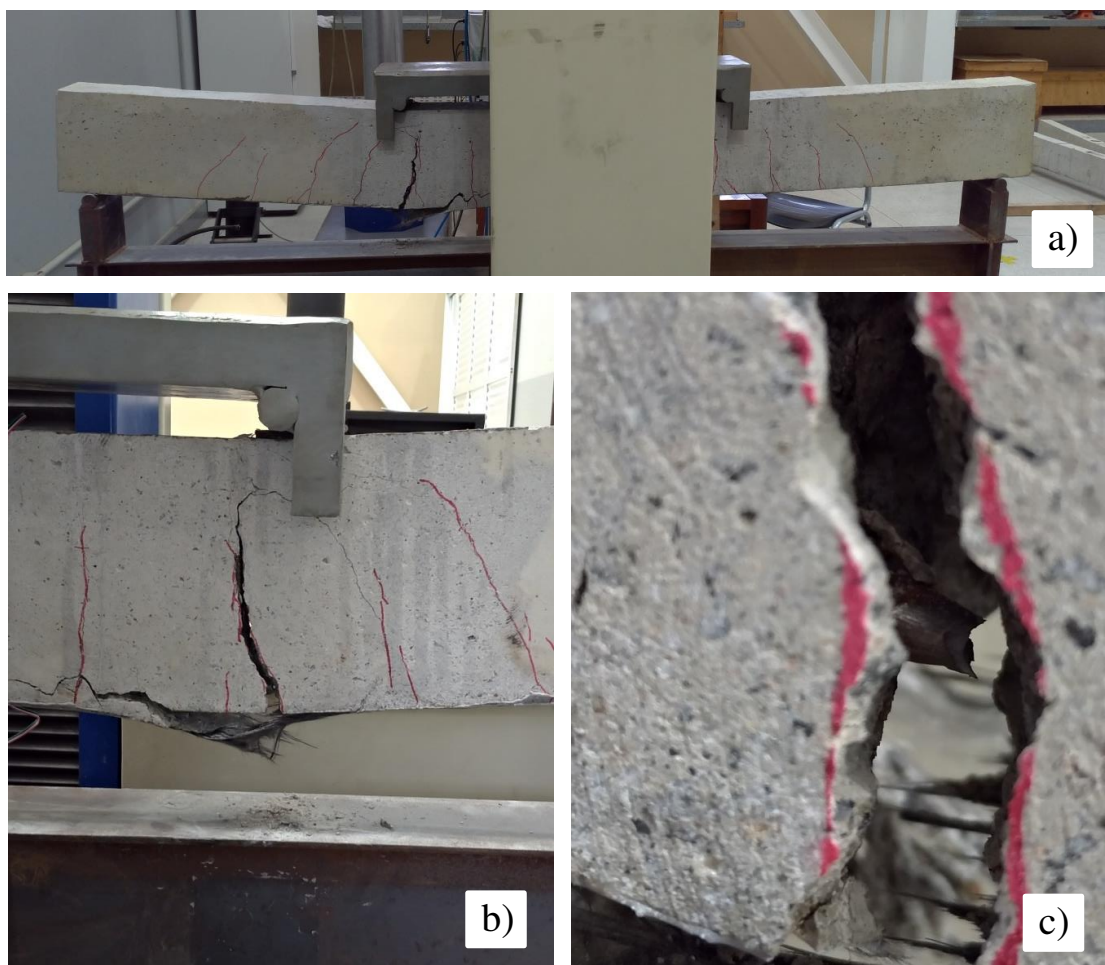
Na Figura 4.29 é apresentado o modo de falha do modelo CRA50-IC. Pode-se observar que a falha aconteceu próximo ao ponto de aplicação do carregamento, na região tracionada da peça. Nota-se ainda que houve ruptura da armadura tracionada e descolamento da manta de CFRP.

Figura 4.29 - a) Falha do modelo CRA50-IC. b) Detalhe do descolamento da manta de CFRP. c) Detalhe do rompimento da armadura positiva.



O modo de falha apresentado pelo modelo CRA50-IT pode ser visualizado na Figura 4.30. Observa-se que novamente a falha aconteceu na região tracionada da peça, próximo ao ponto de aplicação do carregamento. A falha se deu com a ocorrência de ruptura da manta de CFRP e da armadura positiva da seção.

Figura 4.30 - a) Falha do modelo CRA50-IT. b) Detalhe do ponto onde ocorreu a falha do modelo. c) Detalhe do rompimento da armadura positiva.



Durante todo o ensaio foram lidas as flechas, as deformações do concreto e da manta de CFRP e o valor do carregamento aplicado. Na Tabela 4.25 são apresentados os valores máximos obtidos para essas leituras durante os ensaios dos modelos CRA50.

Tabela 4.25 - Valores totais de carregamento, flecha e deformação para os modelos CRA50.

Modelo	Carga Total (kN)	Flecha Total (mm)	Def. CFRP (‰)	Def. Concreto (‰)	
				Medida	Total
CRA50-NI	<b>35,97</b>	<b>22,26</b>	<b>7,78</b>	-1,76	<b>-2,65</b>
CRA50-IC	<b>35,94</b>	<b>23,09</b>	<b>8,61</b>	-2,16	<b>-2,98</b>
CRA50-IT	<b>36,15</b>	<b>22,55</b>	<b>8,41</b>	-2,05	<b>-2,82</b>

Como as peças já possuíam uma flecha e uma deformação residual, na Tabela 4.25 apresenta-se seus valores totais. O valor da flecha total é obtido pela soma da flecha residual, medida antes do ensaio, com o valor lido durante o ensaio, conforme já explicitado no item 4.3.

A deformação máxima no concreto é igual ao valor lido somado à deformação residual já existente antes do início do ensaio.

A deformação residual do concreto é estimada em função da relação geométrica existente entre a flecha e as deformações. Ela pode ser calculada a partir da Expressão 4.5. Essa expressão, semelhante à Expressão 3.3, representa uma compatibilização da equação da flecha elástica para elementos submetidos à flexão de quatro pontos com a equação da deformação no centro do vão devido à flexão.

$$\varepsilon_{(y)} = \frac{24\delta_{máx}y}{(3L^2 - 4a^2)} \quad (4.5)$$

em que:

$\varepsilon_{(y)}$  é a deformação da fibra que dista  $y$  da linha neutra;

$\delta_{máx}$  é a flecha lida no centro do vão, antes do início do ensaio;

$L$  é o comprimento do vão;

$a$  é a distância da aplicação do carregamento até o apoio.

#### **4.4.2. Modelos CRA63**

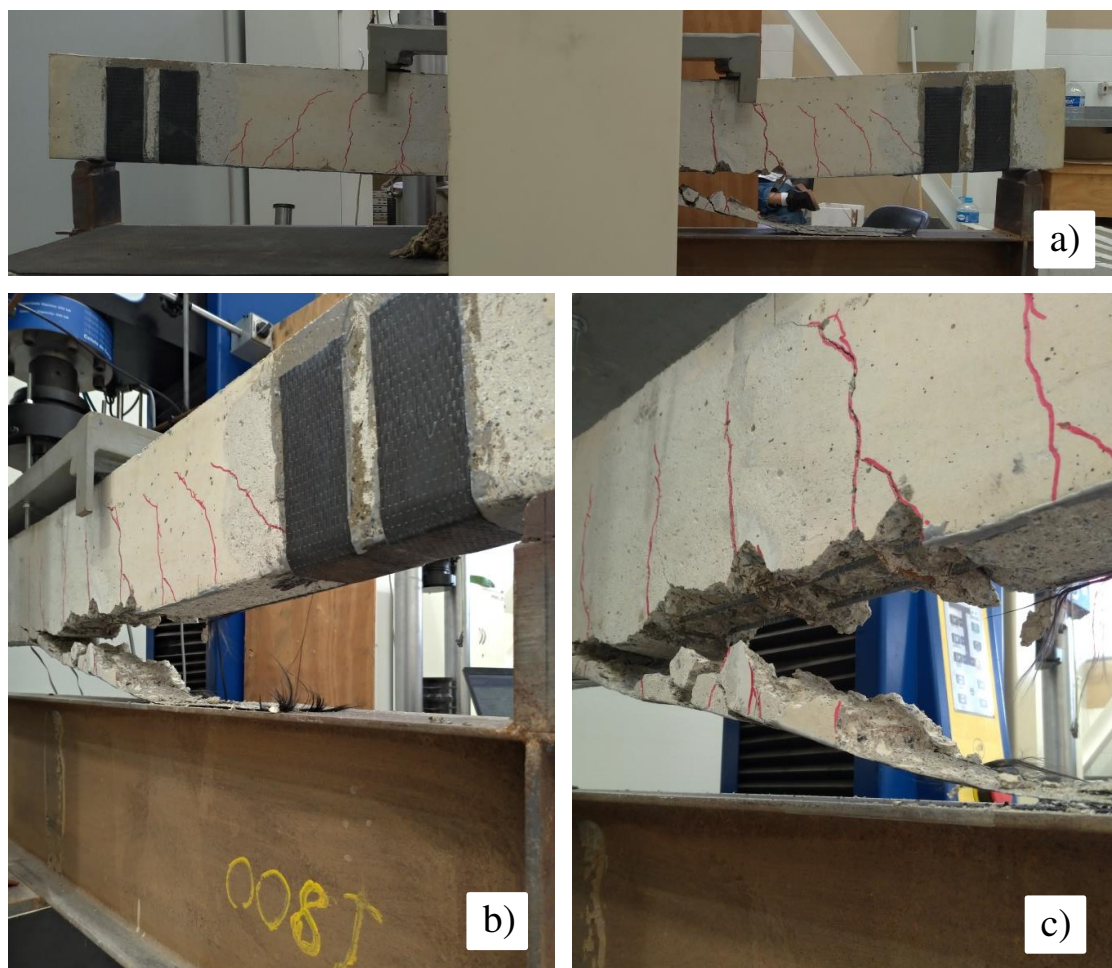
O modo de falha do modelo CRA63-NI é apresentado na Figura 4.31. Nela, é possível observar que a falha se deu na parte tracionada do elemento, na região próxima ao ponto de aplicação do carregamento. Verifica-se que ocorreu a ruptura da manta de CFRP associada ao seu descolamento. Houve ainda o desprendimento de fragmentos de concreto entre o reforço aderido e a armadura positiva na região de falha. Não ocorreu a ruptura da armadura positiva da seção.

Figura 4.31 - a) Falha do modelo CRA63-NI. b) Detalhe do rompimento e descolamento da manta de CFRP. c) Detalhe do não rompimento da armadura positiva.



O modo de falha apresentado pelo modelo CRA63-IC pode ser visualizado na Figura 4.32. A falha se deu pela ruptura da manta de CFRP, próximo à região de ancoragem da peça, e seu descolamento desde o ponto de ruptura da manta até o centro do vão. Houve ainda o desprendimento de fragmentos de concreto entre o reforço aderido e a armadura positiva na região de falha. Não ocorreu a ruptura da armadura positiva da seção.

Figura 4.32 - a) Falha do modelo CRA63-IC. b) Detalhe do rompimento e descolamento da manta de CFRP. c) Detalhe do não rompimento da armadura positiva e desprendimento de fragmentos de concreto.



Na Figura 4.33 é apresentado o modo de falha do modelo CRA63-IT. Pode-se observar que a falha aconteceu próximo ao centro do vão, na região tracionada da peça. Nota-se ainda que houve ruptura da manta de CFRP e o seu descolamento, com desprendimento de fragmentos de concreto localizados entre o reforço aderido e a armadura positiva. Não houve ruptura da armadura.

Figura 4.33 - a) Falha do modelo CRA63-IT. b) Detalhe do rompimento e descolamento da manta de CFRP. c) Detalhe do não rompimento da armadura positiva e despreendimento de fragmentos de concreto.



Na Tabela 4.26 são apresentados os valores máximos obtidos nos ensaios de flexão dos modelos CRA63.

Tabela 4.26 - Valores totais de carregamento, flecha e deformação para os modelos CRA63.

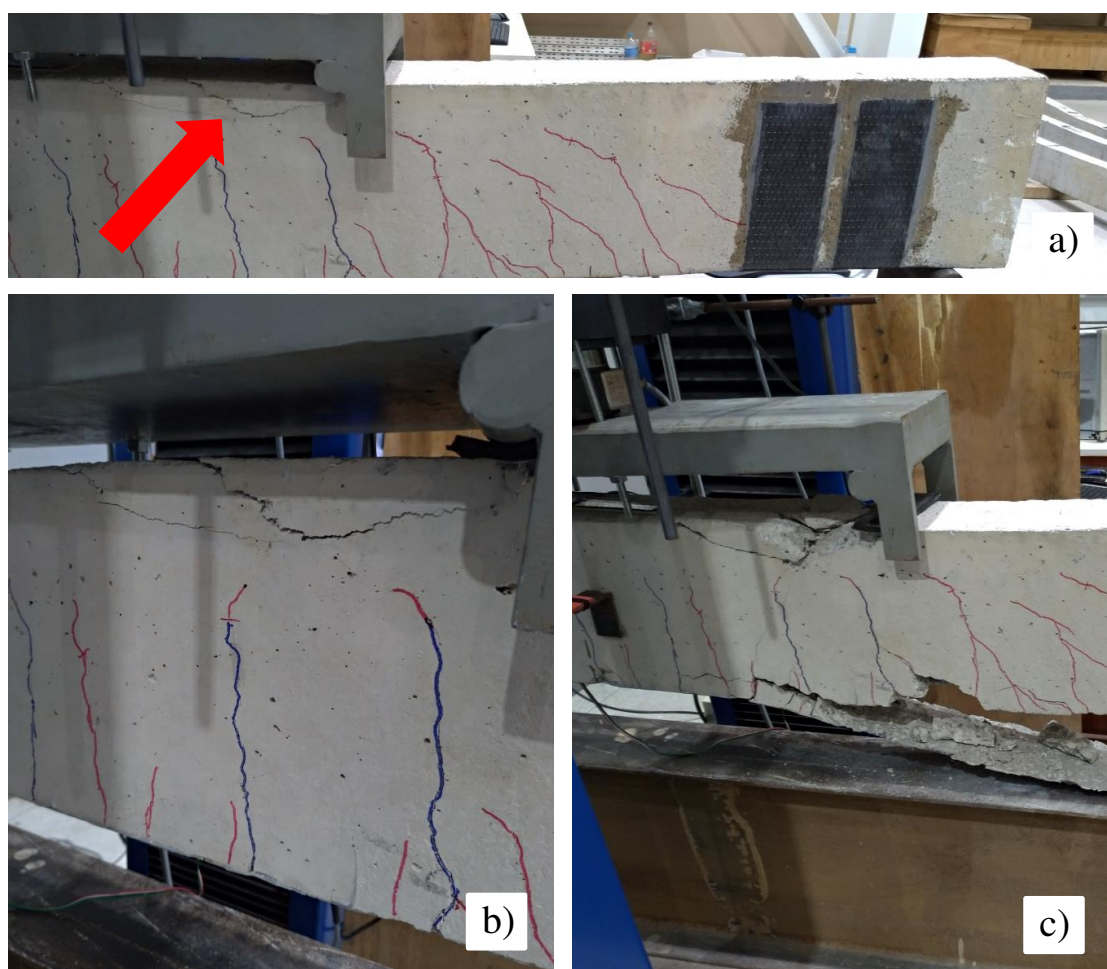
Modelo	Carga Total (kN)	Flecha Total (mm)	Def. CFRP (‰)	Def. Concreto (‰)	
				Medida	Total
CRA63-NI	<b>43,66</b>	<b>24,00</b>	<b>8,63</b>	-2,40	<b>-3,07</b>
CRA63-IC	<b>42,68</b>	<b>26,49</b>	<b>9,03</b>	-2,33	<b>-3,09</b>
CRA63-IT	<b>39,73</b>	<b>21,55</b>	<b>7,93</b>	-2,17	<b>-2,86</b>

#### 4.4.3. Modelos CRA80

O modo de falha apresentado pelo modelo CRA80-NI pode ser visualizado na Figura 4.34. A falha se deu pelo esmagamento do concreto, que ocorreu próximo a um dos pontos de aplicação do carregamento. Mesmo após a verificação do início do esmagamento, o carregamento não foi

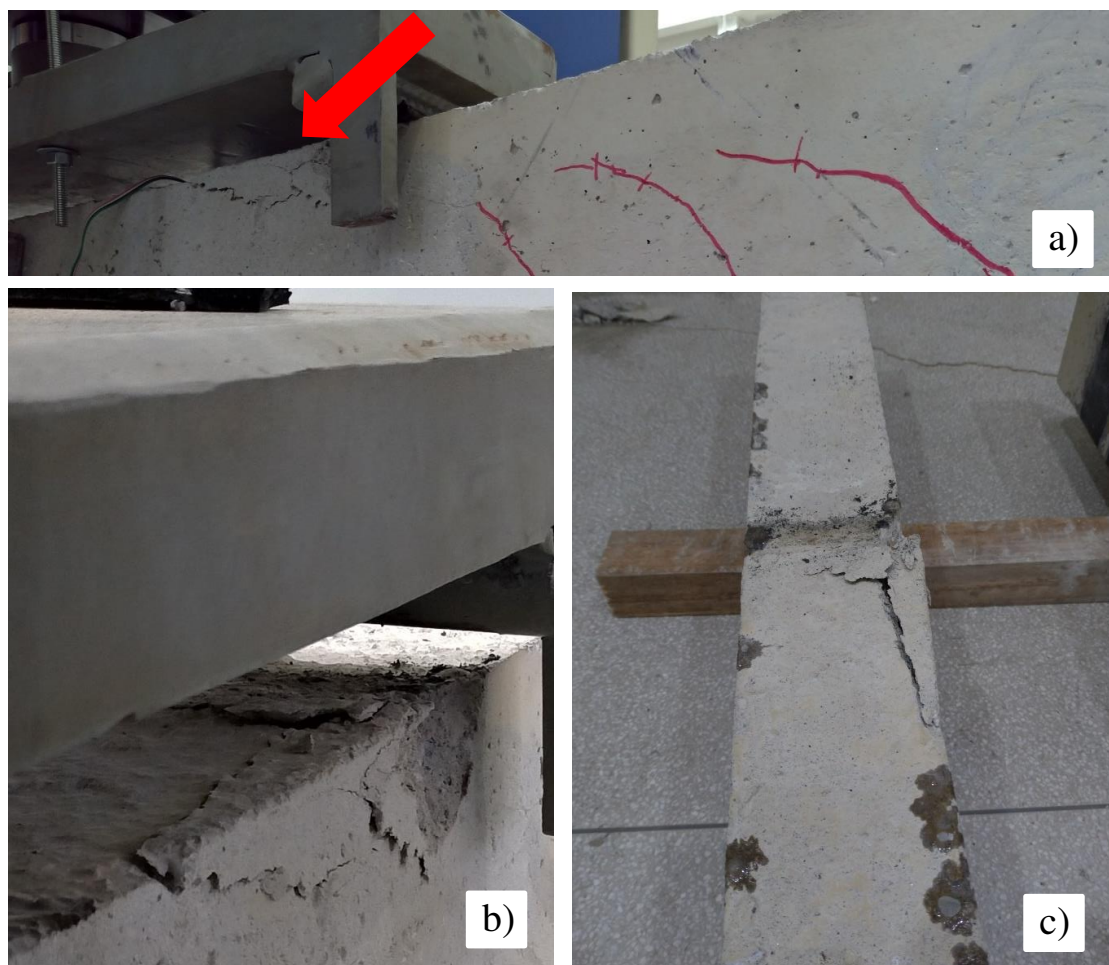
interrompido, gerando também o descolamento da manta de CFRP com desprendimento de fragmentos de concreto entre o reforço aderido e a armadura positiva na região de falha. Houve ruptura da manta de CFRP junto à ancoragem. Observou-se, porém, que após ocorrer o esmagamento do concreto, o carregamento lido pela célula de carga não atingiu novamente seu valor máximo.

Figura 4.34 - a) Falha do modelo CRA80-NI. b) Detalhe do esmagamento do concreto. c) Detalhe do descolamento da manta de CFRP após o esmagamento do concreto.



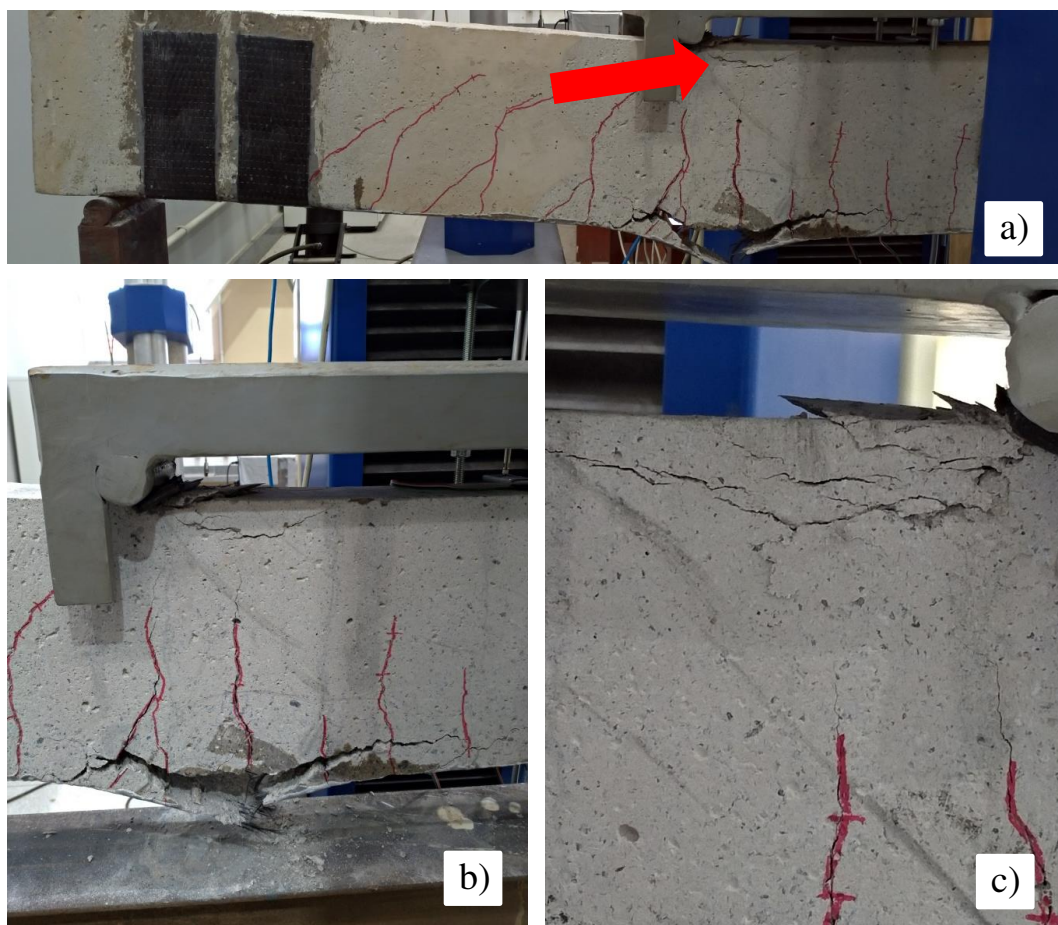
Na Figura 4.35 é apresentado o modo de falha do modelo CRA80-IC. Pode-se observar que a falha aconteceu próximo ao ponto de aplicação do carregamento, na região comprimida da peça. Nota-se que a falha se deu, portanto, pelo esmagamento do concreto. Diferentemente do caso anterior, a movimentação da máquina foi cessada ao se observar a queda brusca no valor de carregamento lido pela célula de carga.

Figura 4.35 - a) Falha do modelo CRA80-IC. b) Detalhe do esmagamento do concreto. c) Detalhe da cunha gerada na região do esmagamento.



O modo de falha do modelo CRA80-IT é apresentado na Figura 4.36. Nela, é possível observar que a falha se deu na região próxima ao ponto de aplicação do carregamento. Verifica-se que ocorreu o esmagamento do concreto, seguido pela ruptura da manta de CFRP. Não ocorreu a ruptura da armadura positiva da seção.

Figura 4.36 - a) Falha do modelo CRA80-IT. b) Detalhe do esmagamento do concreto e da ruptura da manta de CFRP. c) Detalhe do esmagamento do concreto.



Na Tabela 4.27 são apresentados os valores máximos obtidos no ensaio de flexão para os modelos CRA80.

Tabela 4.27 - Valores máximos de carregamento, flecha e deformação para os modelos CRA80.

Modelo	Carga Total (kN)	Flecha Total (mm)	Def. CFRP (‰)	Def. Concreto (‰)	
				Medida	Total
CRA80-NI	<b>51,84</b>	<b>24,76</b>	<b>7,06</b>	-2,44	<b>-3,62</b>
CRA80-IC	<b>58,72</b>	<b>23,88</b>	<b>7,97</b>	-2,59	<b>-4,27</b>
CRA80-IT	<b>57,94</b>	<b>24,91</b>	<b>8,10</b>	-2,76	<b>-4,44</b>

#### 4.4.4. Discussão dos resultados

Com base nos resultados obtidos, é possível verificar a similaridade dos modos de falha apresentados pelos modelos com mesma taxa de armadura. Isso permite concluir que, quando a peça se aproxima da sua capacidade última, a recuperação estrutural com injeção de fissuras com resinas epóxi não influencia no comportamento do elemento. Esse resultado vai ao

encontro daquilo observado no item 4.3, no qual as curvas dos diagramas Carga-Flecha para elementos de mesma taxa de armadura tendem a se sobrepor para níveis mais elevados de carregamento.

Para melhor visualização e análise das situações de falha dos modelos, na Tabela 4.28 é apresentado um resumo dos resultados obtidos. Nessa tabela podem ser observados os valores máximos de carregamento, flecha e deformação, além de um esquema que exemplifica o modo de falha de cada modelo. Ressalta-se que os resultados apresentados de flecha e deformação do concreto consideram os valores residuais já existentes antes do início do ensaio.

Tabela 4.28 – Situações de falha dos modelos.

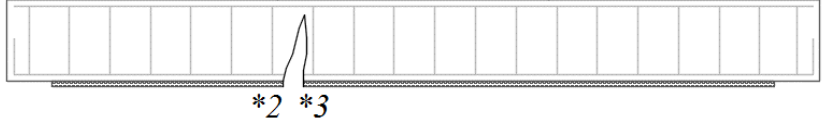
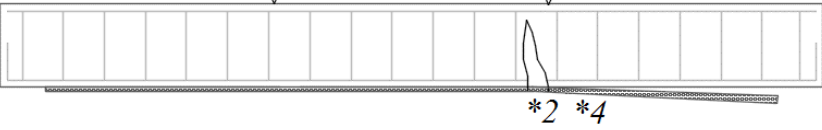
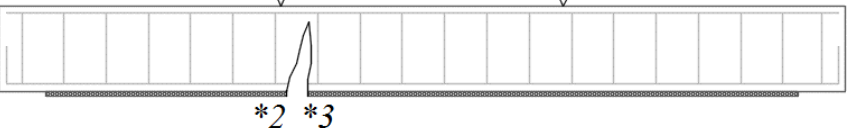
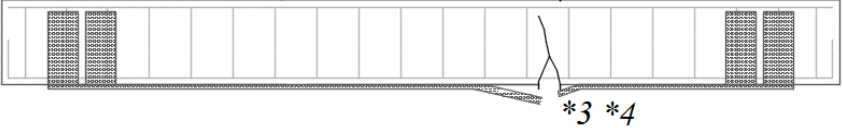
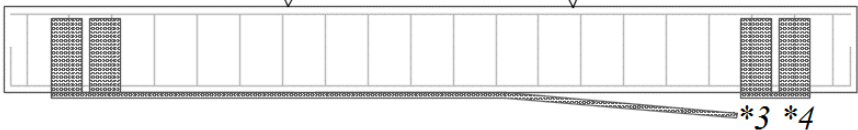
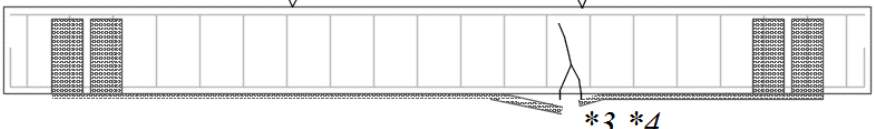
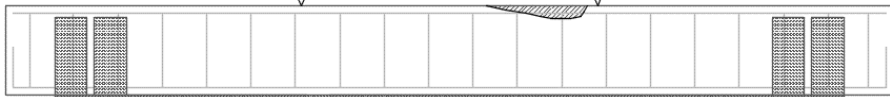
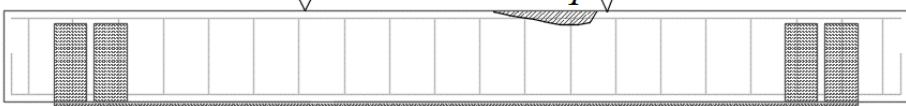
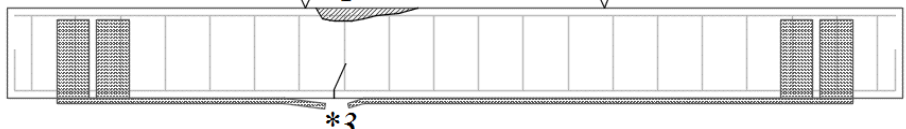
<b>Modo de Falha - CRA50-NI</b>			
			
Carga Total (kN)	Flecha (mm)	Def. CFRP (‰)	Def. Concreto (‰)
35,97	22,26	7,78	-2,65
<b>Modo de Falha - CRA50-IC</b>			
			
Carga Total (kN)	Flecha (mm)	Def. CFRP (‰)	Def. Concreto (‰)
35,94	23,09	8,61	-2,98
<b>Modo de Falha - CRA50-IT</b>			
			
Carga Total (kN)	Flecha (mm)	Def. CFRP (‰)	Def. Concreto (‰)
36,15	22,55	8,41	-2,82
<b>Modo de Falha - CRA63-NI</b>			
			
Carga Total (kN)	Flecha (mm)	Def. CFRP (‰)	Def. Concreto (‰)
43,66	24,00	8,63	-3,07
Nota: *1 – Esmagamento do concreto / *2 – Ruptura da armadura / *3 – Ruptura da manta de CFRP / *4 – Descolamento da manta de CFRP			

Tabela 4.28 – Situações de falha dos modelos (Continuação).

<b>Modo de Falha - CRA63-IC</b>			
			
Carga Total (kN)	Flecha (mm)	Def. CFRP (‰)	Def. Concreto (‰)
42,68	26,49	9,03	-3,09
<b>Modo de Falha - CRA63-IT</b>			
			
Carga Total (kN)	Flecha (mm)	Def. CFRP (‰)	Def. Concreto (‰)
39,73	21,55	7,93	-2,86
<b>Modo de Falha - CRA80-NI</b>			
			
Carga Total (kN)	Flecha (mm)	Def. CFRP (‰)	Def. Concreto (‰)
51,84	24,76	7,06	-3,62
<b>Modo de Falha - CRA80-IC</b>			
			
Carga Total (kN)	Flecha (mm)	Def. CFRP (‰)	Def. Concreto (‰)
58,72	23,88	7,97	-4,27
<b>Modo de Falha - CRA80-IT</b>			
			
Carga Total (kN)	Flecha (mm)	Def. CFRP (‰)	Def. Concreto (‰)
57,94	24,91	8,10	-4,44

Nota: \*1 – Esmagamento do concreto / \*2 – Ruptura da armadura / \*3 – Ruptura da manta de CFRP / \*4 – Descolamento da manta de CFRP

Com base nas informações da Tabela 4.28 observa-se que quase todos os elementos apresentaram falha na região próxima ao ponto de aplicação do carregamento. Isso pode estar associado ao fato de que nessa região ocorrem os maiores esforços cortante e de momento fletor.

Nota-se que os modelos CRA50 foram os únicos que apresentaram ruptura da armadura positiva. Essa ruptura foi sempre associada a algum outro modo de falha, seja a ruptura do CFRP nos modelos CRA50-NI e CRA50-IT ou o seu descolamento no caso do modelo CRA50-IC. Com isso, é possível pressupor que a armadura rompeu primeiro, fazendo com que todo o esforço de tração passasse a ser absorvido apenas pelo reforço de CFRP. Isso fez com que o reforço fosse levado ao colapso imediatamente.

No caso dos modelos CRA63 nota-se que a falha se deu sempre pela combinação da ruptura com o descolamento da manta de CFRP. Nessas situações ficou evidenciada uma superfície horizontal de falha e um elevado grau de fissuração, características da falha pelo destacamento do reforço devido às fissuras de cisalhamento (*sudden peel off*). Em todos os casos ocorreu o desprendimento do concreto aderido ao reforço de CFRP, o que indica uma boa aderência na região interlaminar. Além disso, é possível observar pelos valores de deformação da manta de CFRP, que a região tracionada dos modelos CRA63 estava sob uma tensão elevada, o que possivelmente levou à ruptura concomitante da manta de CFRP.

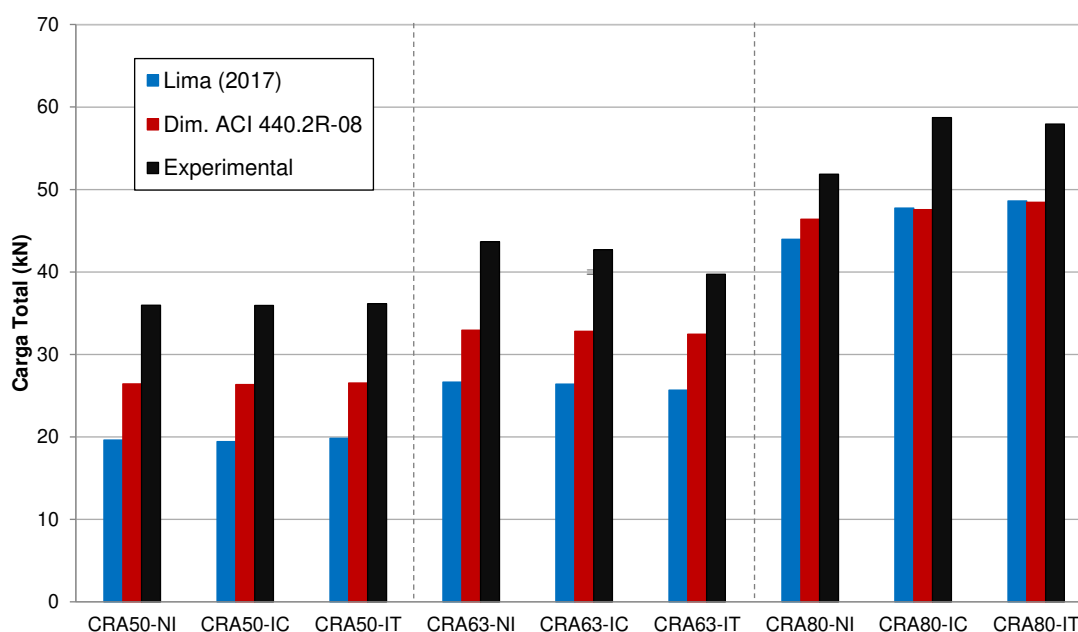
Todos os modelos CRA80 apresentaram falha pelo esmagamento do concreto. Observa-se ainda que em todos os casos a deformação do concreto foi superior a 3,5%, o que vai ao encontro do comportamento observado. Apenas o modelo CRA80-IT apresentou também a ruptura do reforço de maneira simultânea. Analisando a deformação do CFRP para esse caso, nota-se que realmente chegou-se ao maior valor dentro da série CRA80, sendo esse mais próximo aos valores encontrados para os modelos CRA50 e CRA63, que tiveram sua falha ocorrendo na região tracionada.

Em termos do carregamento máximo alcançado pelos modelos antes da falha, é possível realizar duas comparações. Uma delas é relacionada ao valor da carga última antes da recuperação estrutural, no âmbito da pesquisa de Lima (2017). A outra é referente à maior carga que se poderia alcançar de acordo com o dimensionamento de CFRP realizado conforme o ACI 440.2R-08, apresentado em detalhes no Apêndice A. Esses valores são apresentados na Tabela 4.29 e Figura 4.37.

Tabela 4.29 - Cargas últimas para os modelos.

Modelo	Carga Total (kN)	Lima (2017)		Dim. ACI 440.2R-08	
		Carga Total (kN)	Diferença (%)	Carga Total (kN)	Diferença (%)
CRA50-NI	35,97	19,61	183%	26,44	136%
CRA50-IC	35,94	19,43	185%	26,34	136%
CRA50-IT	36,15	19,82	182%	26,54	136%
CRA63-NI	43,66	26,64	164%	32,93	133%
CRA63-IC	42,68	26,40	162%	32,81	130%
CRA63-IT	39,73	25,66	155%	32,44	122%
CRA80-NI	51,84	43,96	118%	46,39	112%
CRA80-IC	58,72	47,75	123%	47,56	123%
CRA80-IT	57,94	48,60	119%	48,44	120%

Figura 4.37 - Cargas últimas obtidas por Lima (2017), por meio dimensionamento conforme o ACI 440.2R-08 e por meio do ensaio experimental.



Com base nos resultados da Tabela 4.29 e da Figura 4.37, pode-se observar que o valor da carga última encontrado foi, em média, 83% maior que o de Lima (2017) para os modelos CRA50, 60% maior para os modelos CRA63 e 20% maior para os modelos CRA80. Esses resultados representam um ganho considerável de resistência quando se utiliza a manta de CFRP. Observa-se que, como a falha dos modelos CRA80 se deu pelo esmagamento do concreto, a influência da presença de CFRP foi consideravelmente menor do que nos outros casos.

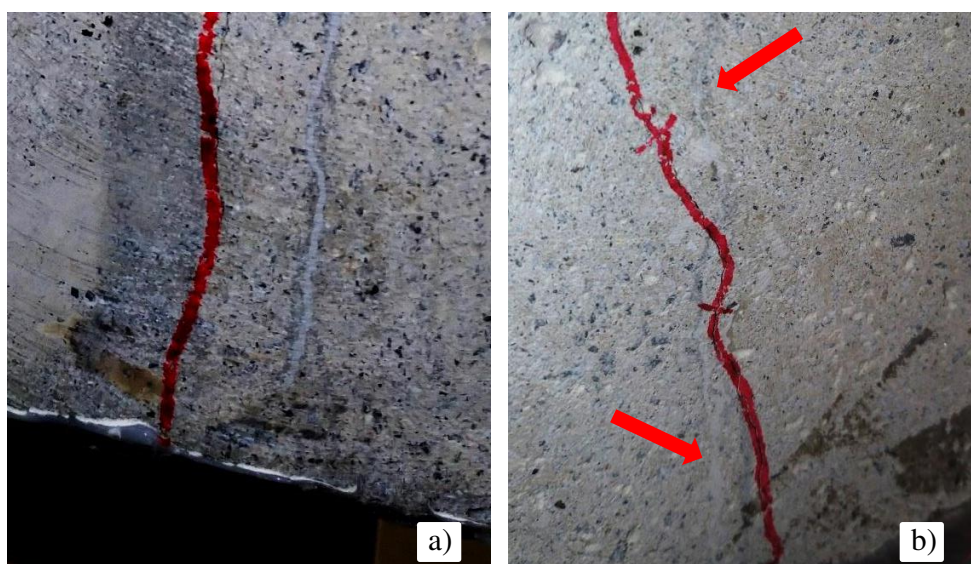
Comparando-se o valor de carga obtido com o valor previsto pelo dimensionamento do ACI 440.2R-08, é possível observar uma diferença que varia em torno de 30% para os modelos CRA50 e CRA63. Essa diferença cai para algo próximo de 20% no caso dos modelos CRA80.

Esse aspecto pode estar relacionado ao modo de falha, que ocorreu na região tracionada dos elementos CRA50 e CRA63 e na região comprimida dos elementos CRA80.

O fato de o carregamento real ter alcançado um valor superior ao estimado pelo dimensionamento, reforça a ideia de que não houve nenhum modo de falha prematuro. Em função disso, pode-se afirmar que o procedimento de reforço, incluindo execução da ancoragem conforme os critérios estabelecidos pelo ACI 440.2R-08, foi adequado e se alcançou o seu objetivo.

Por último, vale ressaltar um aspecto interessante sobre o processo de fissuração dos elementos até atingirem a falha. Os modelos sem injeção apresentaram um aumento das aberturas das fissuras já presentes e o surgimento de novas fissuras ao longo da peça. Já os modelos que passaram pelo processo de injeção com resina epóxi chegaram à falha com praticamente o mesmo grau de fissuração dos não injetados, mas com a diferença de contarem apenas com fissuras geradas durante o ensaio. As fissuras injetadas não foram reabertas, sendo que as novas surgiram nas adjacências daquelas que foram injetadas (Figura 4.38-a). Em alguns casos, as novas fissuras simplesmente cruzaram as injetadas (Figura 4.38-b), comprovando a qualidade da aderência do material injetado e a recuperação do monolitismo na região antes fissurada.

Figura 4.38 - a) Detalhe de nova fissura adjacente à fissura injetada. b) Detalhe de nova fissura se cruzando com fissura injetada.



# 5

---

## 5. CONCLUSÕES

### 5.1. Considerações finais

O presente trabalho foi desenvolvido no intuito de avaliar o comportamento de vigas de concreto armado reforçadas com CFRP, com e sem injeção de fissuras. Os modelos experimentais utilizados encontravam-se já fissurados. Esses modelos foram levados ao carregamento último e apresentaram falha configurada pelo escoamento da armadura positiva de flexão no âmbito da pesquisa de Lima (2017).

Foram selecionados nove modelos produzidos e ensaiados por Lima (2017) que possuíam um traço com relação água/cimento igual a 0,60. Esses modelos apresentavam variação na armadura positiva de flexão. Três deles possuíam armadura com duas barras de 5,0 mm (Modelos CRA50), outros três com duas barras de 6,3 mm (Modelos CRA63) e os demais com duas barras de 8,0 mm (Modelos CRA80).

Cada um dos três modelos com mesma taxa de armadura passou por um processo de recuperação estrutural diferente. Um dos modelos (NI) não teve suas fissuras injetadas. O segundo (IC) teve suas fissuras injetadas com a resina MC-Injekt 1264 Compact, que é recomendada para fissuras com aberturas superiores a 0,3 mm. O terceiro modelo (IT) teve sua injeção de fissuras realizada com a resina MC-Injekt 1264 TF-TR, que é recomendada para fissuras com aberturas superiores a 0,1 mm. Após o procedimento de injeção, para todos os modelos foi executado o reforço com a manta de fibra de carbono MC-DUR CF-Sheets.

Os modelos recuperados tiveram sua rigidez estimada por meio de ensaios dinâmicos. Com a viga na condição biapoada foi aplicado um golpe com martelo de borracha e estimada a frequência fundamental. A partir dessa frequência, foi estimada a rigidez do modelo. Essa rigidez foi comparada com os valores obtidos antes da recuperação estrutural.

Observou-se que todos os elementos tiveram aumento na sua frequência fundamental de vibração, e consequentemente em sua rigidez, após o processo de recuperação estrutural. A injeção de fissuras com resinas epóxi foi a grande responsável por esse aumento. Os elementos que tiveram fissuras injetadas apresentaram um aumento de rigidez de aproximadamente 78%, enquanto os elementos que não foram injetados apresentaram um aumento médio de 28%. Fazendo uma comparação com a rigidez inicial dos modelos, obtida por Lima (2017), é possível também notar essa diferença. Os modelos que passaram pelo processo de injeção de fissuras apresentaram uma rigidez próxima a 74% da rigidez dos modelos íntegros, enquanto os modelos não injetados apresentaram 55%. Foi possível concluir também que não houve diferença significativa no aumento da rigidez para as vigas injetadas com a resina MC-Injekt 1264 Compact e as injetadas com a resina MC-Injekt 1264 TF-TR.

Para avaliação do grau de degradação das vigas durante a aplicação de carga, os modelos recuperados foram submetidos a ciclos de carregamento em ensaios de flexão de quatro pontos. Durante a aplicação do carregamento foram medidas as flechas, as deformações na manta de CFRP e no concreto e o valor da carga aplicada. Ao final de cada estágio, o atuador da máquina universal de ensaios foi suspenso, os transdutores de deslocamento afastados e se realizou o ensaio dinâmico.

Para cada estágio de carregamento as flechas das vigas foram calculadas a partir da rigidez estimada por meio dos ensaios dinâmicos e a partir da rigidez proposta pelo modelo analítico de Branson. Observou-se que os valores encontrados se aproximaram muito dos resultados obtidos experimentalmente. No caso dos resultados estimados por meio dos ensaios dinâmicos foi adotado um coeficiente de ajuste igual a 0,64 que se mostrou constante para carregamentos superiores a 10% da carga última.

Em função dos resultados dos diagramas Carga-Flecha, nota-se que a curva obtida com base na estimativa analítica apresenta um trecho inicial com maior inclinação do que a curva obtida experimentalmente. O modelo proposto por Branson considera que as peças estão íntegras no início do ensaio. Em detrimento disso, o que ficou demonstrado é que até mesmo as peças submetidas ao processo de injeção de fissuras não apresentam rigidez igual à das peças íntegras. Sendo assim a diferença apresentada no trecho inicial das duas curvas se deve ao nível de degradação já existente em todos os elementos, o que não é considerado pelo modelo analítico de Branson.

Os diagramas Carga-Flecha obtidos com base na rigidez estimada por meio dos ensaios dinâmicos mostraram uma tendência muito parecida com o comportamento experimental dos modelos quando submetidos à flexão. Notou-se uma clara perda de rigidez ao longo da aplicação do carregamento. Esse comportamento permite concluir que a determinação da rigidez por meio de ensaios dinâmicos é uma boa alternativa de avaliação estrutural, mesmo para elementos reforçados com CFRP.

Os modelos recuperados apresentaram um ganho considerável de resistência, quando comparados com as cargas últimas obtidas nos modelos originais de Lima (2017). Ressalta-se que o processo de injeção das fissuras não influenciou na carga última atingida pelos modelos no ensaio de flexão. Por outro lado, em termos do comportamento, observou-se que os modelos não injetados têm uma rigidez muito próxima da fase correspondente ao Estádio II do modelo original. Já os modelos injetados apresentaram uma rigidez inicial intermediária entre a correspondente ao Estádio I e a correspondente ao Estádio II do modelo original. A partir da carga de fissuração, a rigidez dos modelos injetados se aproximou bastante à do Estádio II do modelo original e à do modelo não injetado.

Os modos de falha apresentados pelos modelos com mesma taxa de armadura foram similares. Todos os modelos CRA50 apresentaram ruptura da armadura associada à ruptura do reforço de CFRP ou seu descolamento. Os modelos CRA63 apresentaram falha devido à combinação da ruptura do CFRP com seu descolamento da superfície do concreto. Nesses casos foi observado ainda o desprendimento de partes do concreto aderido ao reforço. Os modelos CR80 apresentaram falha sempre decorrente do esmagamento do concreto comprimido. Ressalta-se que em todas as situações o valor da carga última alcançada foi superior ao valor estimado com base nas prescrições do ACI 440.2R-08. Com isso, é possível concluir que a execução do reforço foi adequada.

Em função do exposto, considera-se que os objetivos do trabalho foram atingidos. Pode-se concluir, portanto, que os métodos adotados e considerações realizadas tendem a contribuir na compreensão do comportamento de vigas de concreto armadas reforçadas com CFRP, quando essas passam pelo processo de injeção de fissuras ou não.

## 5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Durante o desenvolvimento deste trabalho diversas questões foram levantadas e discutidas. Nesse contexto, é possível apontar para alguns temas que ainda merecem ser abordados em trabalhos futuros, tais como:

- ✓ realizar um processo de recuperação estrutural similar ao adotado neste trabalho utilizando polímeros reforçados com fibra de vidro ao invés de fibra de Carbono e comparar os resultados obtidos e o comportamento apresentado;
- ✓ desenvolver um modelo numérico de elementos finitos que seja capaz de representar o comportamento dos modelos reforçados e comparar os resultados com os obtidos no presente trabalho;
- ✓ utilizar outros métodos para investigação da integridade de elementos de concreto armado e avaliar os resultados à luz daqueles obtidos pelo ensaio dinâmico.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

ALLAM, S. M. *et al.* Evaluation of tension stiffening effect on the crack width calculation of flexural RC members. **Alexandria Engineering Journal**. Alexandria, Egito, Vol.52, p. 163-173, Jan. 2013.

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-NU'MAN, B. S.; AL-SAHLANI, M. H.. Behavior of Repaired Reinforced Concrete Beams Failed in Shear. **Journal of Engineering and Development**, Vol. 10, No. 3, p. 115-134, Set. 2006.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-05) and Commentary (318R-05)**. Farmington Hills, 2005. 430p

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Guide for Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures: ACI 440-08**. Farmington Hills, 2008. 80p

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1991). **C215-02**: Standard test method for fundamental transverse, longitudinal and torsional frequencies of concrete specimens. Philadelphia.

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

\_\_\_\_\_. **NBR 8522:2008** – Concreto – Determinação do módulo de deformação estática e diagrama tensão-deformação. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. **NBR 15575-1:2013**. Edificações habitacionais – Desempenho. Rio de Janeiro.

ARAÚJO, C. M.. **Reforço de vigas de concreto à flexão e ao cisalhamento com tecidos de fibra de carbono**. 2002. 153 p. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

ARQUEZ, A. P.. **Aplicação de laminado de polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC) inserido em substrato de microconcreto com fibras de aço para reforçar à flexão de vigas de concreto armado.** 2010. 242 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

AZEVEDO D. M. M.. **Reforço de estruturas de betão com colagem de sistemas compósitos de CFRP – Recomendações para Dimensionamento.** 2008. 238 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto (Portugal), 2008.

BANK, L. C.. **Composites for Construction: Structural Design with FRP Materials.** New Jersey: John Wiley & Sons, 2006. 576 p.

BEBER, A. J.. **Comportamento Estrutural de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Compósitos de Fibras de Carbono.** 2003. 317 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

BEBER, A. J., CAMPOS FILHO, A., CAMPAGNOLO, J. L. **Estudo Teórico-Experimental de Vigas de Concreto Reforçadas com Tecidos de Fibra de Carbono.** In: SIMPÓSIO EPUSP SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO, IV, 2000, São Paulo, **Artigos...** São Paulo: [S.d], 2000.

CANDIAN, A. L.. **Metodologia para Avaliação de Estruturas de Concreto Armado Degradadas Utilizando Ensaios Dinâmicos.** 2017. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017.

CARVALHO, F. L.. **Procedimento Experimental para Avaliação do Fator de Amortecimento em Estruturas.** 2002. 141 f. Dissertação (Mestrado) – Área de Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002.

CUNHA, A., CAETANO, E.. Experimental modal analysis of civil engineering structures. *Sound and Vibration*, 12-20, jun. 2006.

DE PAULA, C. C.; JUNIOR, A. W.; SANTORO, C. E. M.; GIOVANETTI, J. N. G.. **Tratamento De Infiltrações E Selamento Estrutural De Fissuras Com Os Sistemas De**

**Injeção Em Estruturas De Concreto De Barragens E Usinas Hidrelétricas, XXX SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS.** Foz do Iguaçu, Paraná, 2015.

FAY, K. F. **Guide to Concrete Repair.** Washington: US Department of the Interior Building – Bureau of Reclamation, 2015. 390 p.

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.

GARAYGORDÓBIL, J. C. A.. **Dynamic assessment of structural building components.** 2003. 383 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia da Construção, Escola Técnica Superior D' Enginyers de Camins, Canals I Ports de Barcelona, Universitat Politècnica, Barcelona, 2003.

GILBERT, R. I.. Tension Stiffening in Lightly Reinforced Concrete Slabs. **Journal of Structural Engineering.** ASCE, p. 889-903. jun. 2017.

HELAL, J.; SOFI, M.; MENDIS, P.. Non-Destructive Testing of Concrete: A Review of Methods. **Electronic Journal of Structural Engineering.** Melbourne, p. 97-105. jan. 2015.

JAE LEE, B. *et al.*. Evaluating the Dynamic Elastic Modulus of Concrete Using Shear-Wave Velocity Measurements. **Advances in Materials Science and Engineering** (Hindawi). Vol. 2017, p. 1-13, Jul. 2017.

JUVANDES, L. F. P.. **Reforço e reabilitação de estruturas de betão usando materiais compósitos de “CFRP”.** 1999. 396 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 1999.

JUVANDES, L. F. P., FIGUEIRAS, J. A. Conceitos de Dimensionamento e Segurança para Projectos de Reforço com Sistemas Compósitos de FRP. In: **Betão Estrutural 2000**, FEUP, Porto, p. 1-10.

KARAYANNIS, C. G.; SIRKELIS, G. M.. Strengthening and rehabilitation of RC beam–column joints using carbon-FRP jacketing and epoxy resin injection. **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, Vol. 37, p. 769-790, Fev. 2008.

LEISSA, A. W.; QATU, M. S. **Vibrations of Continuous Systems.** New York: Mc Graw Hill, 2011. 507 p.

LEONHARDT, F.; MÖNNING, E.. **Construções de Concreto: Princípios Básicos do Dimensionamento de Estruturas de Concreto Armado**. Rio de Janeiro: Interciência, 1977. V.1, 308 p.

LIMA, G. E. S. - **Avaliação Dinâmica Do Comportamento Estrutural De Elementos De Concreto Submetidos À Degradação Progressiva**. 2015. 169 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017.

LIMA, S. S.; SANTOS, S. H. C. **Análise Dinâmica das Estruturas**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2008.

MACHADO, A. P. **Manual de Reforço das Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono**. Viapol. 2010. 120f.

MAGLIETTA, P. C.; GRASSELLI, G.; EVAN, C. B.; Finite/discrete element model of tension stiffening in GFRP reinforced concrete. **Engineering Structures**. Toronto, Canadá, Vol. 111, p. 494-504, Jan. 2016.

MARUKHA, V. I. Improvement of the Serviceability of Damaged Concrete and Reinforced-Concrete Structures by Sealing Hardening Injections. **Materials Science**. Lviv, Ucrânia, Vol. 49, n.1, p. 1-12, Jul. 2013.

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

NÓBREGA, P. B.. **Análise dinâmica de estruturas de concreto: estudo experimental e numérico das condições de contorno de estruturas pré-moldadas**. 2004. 285 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

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

SALAWU, O. S. (1997). Detection of structural damage through changes in frequency: a review. *Engineering Structures*, v.19, n.9, p. 718-723.

REIS, A. P. A.. **Reforço de vigas de concreto armado por meio de barras de aço adicionais ou chapas de aço e argamassa de alto desempenho**. 1998. 239 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

SALGADO, R.; AYALA, G.; RANGEL, J. G. **Avaliação estrutural de vigas de betão armado reforçadas com lâminas CFRP por sua resposta dinâmica.** XII Congresso Internacional sobre Patologia e Reabilitação de Estruturas. Porto. 2016.

SHULL, P. J.. **Nondestructive Evaluation:** Theory, Techniques, and Applications. New York: Marcel Dekker, 2002.

SOUZA, Regina Helena F. de; APPLETON, Júlio. **Estudo Experimental sobre o Reforço de Vigas de Concreto Armado com Tecido Compósito de Fibras de Carbono.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - COMPETITIVIDADE E EXCELÊNCIA EM CONCRETO, 45., 2003, Vitória. Artigo. Vitória: Instituto Brasileiro do Concreto, 2003. v. 1, p. 31 - 45.

SOUZA, V. C.; RIPPER, T.. **Patologia, recuperação e reforço estrutural de concreto.** São Paulo: Pini, 1998. 262 p.

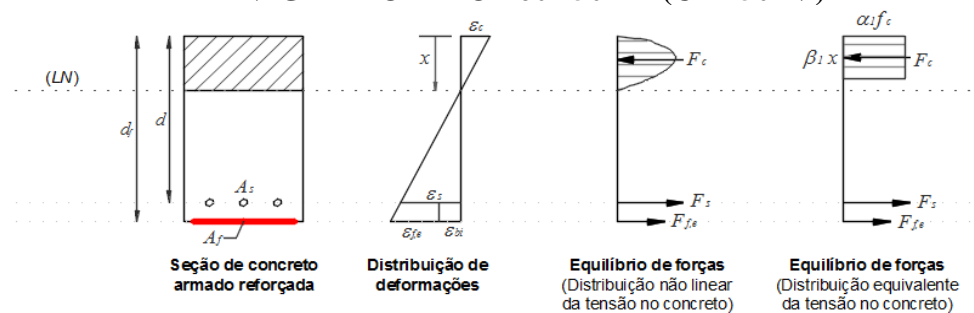
# APÊNDICE **A**

---

## **DIMENSIONAMENTO DO REFORÇO DE CFRP**

Neste Apêndice são apresentadas as marchas de cálculo utilizadas para realizar o dimensionamento do reforço com a manta de CFRP, segundo o ACI 440.2R-08. Apresentam-se todos os passos sugeridos pelo código e a verificação para o número pré-estabelecido de camadas do reforço.

### DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO COM CFRP VIGA - MODELO T60A50-R1 (CRA50-NI)



	Dados de entrada
	Dados calculados pela planilha

#### Passo 1- Determinação do modelo e das características geométricas e dos materiais

##### CARREGAMENTO

Valor da carga máxima	19,61 kN		
Valor da força P	9,81 kN	Momento solicitante	5,39275 kN.m

##### PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS

Vão da viga ( $L$ )	170,0 cm	Reforço de CFRP	
Largura da Viga ( $b$ )	9,0 cm	Espessura de cada lâmina/manta	0,0166 cm
Altura total da Viga ( $h$ )	18,0 cm	Largura de cada lâmina/manta	7,5 cm
Inércia total do elemento ( $I_c$ )	4374 cm <sup>4</sup>	Número de Lâminas	1
Cobrimento Adotado ( $c$ )	1,5 cm	Altura efetiva do reforço ( $d_f$ )	18,0083 cm
Diâmetro da barra tracionada ( $\varnothing$ )	5,0 mm		
Número de barras	2		
Área de aço total ( $A_s$ )	0,3927 cm <sup>2</sup>		
Diâmetro da barra do estribo ( $\varnothing_t$ )	4,2 mm		
Altura efetiva da Viga ( $d$ )	15,83 cm		

##### PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

###### Concreto

Resistência à compressão característica ( $f_c$ )	50,2 MPa
Resistência à tração média ( $f_{cm}$ )	3,6 MPa
Módulo de elasticidade inicial ( $E_c$ )	26880,0 MPa
Deformação última ( $\varepsilon_{cu}$ )	0,0035 mm/mm

###### Aço CA-50

Resistência de escoamento a tração característica ( $f_y$ )	500 MPa
Módulo de elasticidade ( $E_s$ )	210000 MPa
Deformação última ( $\varepsilon_s$ )	0,0100 mm/mm
Deformação de escoamento ( $\varepsilon_{s,y}$ )	0,00238 mm/mm

###### CFRP

Para a fibra de carbono utiliza-se, segundo o ACI 440.2R-08 um fator de redução	CE	0,95
Resistência à tração característica ( $f_{f,k}$ )	3600 MPa	
Resistência à tração de cálculo ( $f_{f,u}$ )	3420 MPa	
Módulo de elasticidade ( $E_f$ )	230000 MPa	
Deformação última característica ( $\varepsilon_{f,k}$ )	0,021 mm/mm	
Deformação última ( $\varepsilon_{f,u}$ )	0,01995 mm/mm	

**Passo 2- Determinação do estado de tensão existente devido ao carregamento permanente**

$\delta_{máx}$	0,481 cm	$\varepsilon_{b,i}$	0,001894	$LN =$	12,24 cm
		$\varepsilon_{conc,resid.}$	0,000891		

**Passo 3- Determinação da deformação de cálculo no reforço**

$$\varepsilon_{f,d} = 0,41 \sqrt{\frac{f_c}{nE_f t_f}} \leq 0,9 \varepsilon_{f,u}$$

$\varepsilon_{f,d}$	0,014867
---------------------	----------

Com  $t_f$  dado em mm**Passo 4- Estimativa da posição da linha neutra e determinação do módulo de elasticidade residual do concreto**

Posição da Linha Neutra	$x =$	2,356 cm
-------------------------	-------	----------

**Passo 5- Determinação do nível efetivo de tensão no reforço de CFRP**

$$\varepsilon_{f,e} = \varepsilon_{c,u} \left( \frac{d_f - x}{x} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{f,d}$$

$\varepsilon_{f,e}$	0,014867
---------------------	----------

**Passo 6- Determinação da deformação no concreto**

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{f,e} + \varepsilon_{bi}) \left( \frac{x}{d_f - x} \right)$$

$\varepsilon_c$	0,002523
-----------------	----------

**Passo 7- Determinação da deformação no aço da armadura positiva**

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{f,e} + \varepsilon_{bi}) \left( \frac{d - x}{d_f - x} \right)$$

$\varepsilon_s$	0,014428
-----------------	----------

**Passo 8- Cálculo do nível de tensão no aço e no reforço de CFRP**

$$f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y$$

$f_{s,calc}$	3029,95 MPa	$f_s$	500,00 MPa
$f_{s,máx}$	500,00 MPa		

$$f_{f,e} = E_{f,e} \varepsilon_{f,e}$$

$f_{f,e,calc}$	3419,37 MPa	$f_{f,e}$	3419,37 MPa
$f_{f,e,máx}$	3420,00 MPa		

**Passo 9- Cálculo das resultantes internas**

$$\varepsilon_{c,0} = \frac{1,7 f_c}{E_{c,s}}$$

$\varepsilon_{c,0}$  é uma deformação calculada com base nas propriedades mecânicas do concreto

$\varepsilon_{c,0}$	0,003175
---------------------	----------

$$\beta_1 = \frac{4\varepsilon_{c,0} - \varepsilon_c}{6\varepsilon_{c,0} - 2\varepsilon_c}$$

$\beta_1$	0,72672
-----------	---------

$$\alpha_1 = \frac{3\varepsilon_{c,0}\varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3\beta_1\varepsilon_{c,0}^2}$$

$\alpha_1$	0,803825
------------	----------

**Passo 10- Verificação do equilíbrio por conferência da posição da linha neutra**

$$x = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\alpha_1 f_c \beta_1 b}$$

$x_{calc}$	2,356989
------------	----------

**Passo 11- Determinação da resistência à flexão do aço e do reforço de FRP**

$$M_{R,s} = A_s f_s \left( d - \frac{\beta_1 x}{2} \right)$$

$M_{R,s}$	2,940052 kN.m
-----------	---------------

$$M_{R,f} = A_f f_{f,e} \left( d_f - \frac{\beta_1 x}{2} \right)$$

$M_{R,f}$	7,301738 kN.m
-----------	---------------

**Passo 12- Verificação da capacidade total da seção à flexão**

$$M_S \leq \phi M_R$$

$\phi$	1
--------	---

$$\phi \begin{cases} 0,90 \Rightarrow \varepsilon_s \geq 0,005 \\ 0,65 + \frac{0,25(\varepsilon_s - \varepsilon_{s,y})}{0,005 - \varepsilon_{s,y}} \Rightarrow \varepsilon_{s,y} \leq \varepsilon_s \leq 0,005 \\ 0,65 \Rightarrow \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s,y} \end{cases}$$

$M_S$	5,39275 kN.m
-------	--------------

$M_R$	9,14653 kN.m
-------	--------------

Taxa	59%
------	-----

**OK!**

$$M_S \leq \phi [M_{R,s} + \psi_f M_{R,f}]$$

Em que é atribuído uma minoração  $\psi_f$  à contribuição de resistência do reforço, conforme já elucidado anteriormente. O ACI 440.2R-08 sugere que esse valor seja tomado igual a 0,85 para reforços à flexão.

### Passo 13- Determinação do maior comprimento de ancoragem

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

$$\alpha = 1,5$$

Momento de fissuração

$$M_r = 2,62 \text{ kN.m}$$

Ponto de momento igual ao momento de fissuração (a partir do apoio)

$$l = 26,77 \text{ cm}$$

Determinação do comprimento de ancor.

$$l_{df} = \sqrt{\frac{n E_f t_f}{\sqrt{f_c'}}$$

$$l_{df} = 7,34 \text{ cm} \quad (\text{ACI 440.2R-08})$$

$$l_{df} = 15 \text{ cm} \quad (\text{ACI 440.2R-02})$$

Verificação

OK

### Passo 14- Verificação do reforço transversal

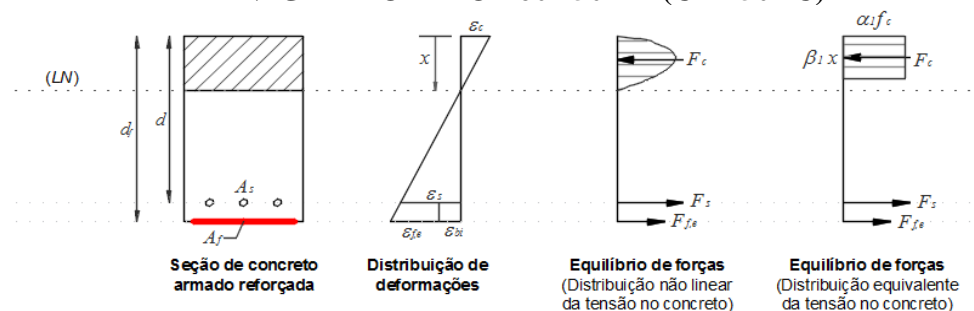
$$V_c = 2 \sqrt{f_c} b_w d$$

$$V_c = 16,76 \text{ kN}$$

Verificação

NÃO PRECISA DE ANCORAGEM COM REFORÇO TRANSVERSAL

**DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO COM CFRP**  
**VIGA - MODELO T60A50-R2 (CRA50-IC)**



	Dados de entrada
	Dados calculados pela planilha

**Passo 1- Determinação do modelo e das características geométricas e dos materiais**

**CARREGAMENTO**

Valor da carga máxima	19,43 kN		
Valor da força P	9,72 kN	Momento solicitante	5,34325 kN.m

**PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS**

Vão da viga (L)	170,0 cm	<b>Reforço de CFRP</b>	
Largura da Viga (b)	9,0 cm	Espessura de cada lâmina/manta	0,0166 cm
Altura total da Viga (h)	18,0 cm	Largura de cada lâmina/manta	7,5 cm
Inércia total do elemento (I <sub>c</sub> )	4374 cm <sup>4</sup>	Número de Lâminas	1
Cobrimento Adotado (c)	1,5 cm	Altura efetiva do reforço (d <sub>f</sub> )	18,0083 cm
Diâmetro da barra tracionada (Ø)	5,0 mm		
Número de barras	2		
Área de aço total (A <sub>s</sub> )	0,3927 cm <sup>2</sup>		
Diâmetro da barra do estribo (Ø <sub>t</sub> )	4,2 mm		
Altura efetiva da Viga (d)	15,83 cm		

**PROPRIEDADES DOS MATERIAIS**

**Concreto**

Resistência à compressão característica (f <sub>c</sub> )	50,2 MPa
Resistência à tração média (f <sub>cm</sub> )	3,6 MPa
Módulo de elasticidade inicial (E <sub>c</sub> )	26880,0 MPa
Deformação última (ε <sub>cu</sub> )	0,0035 mm/mm

**Aço CA-50**

Resistência de escoamento a tração característica (f <sub>y</sub> )	500 MPa
Módulo de elasticidade (E <sub>s</sub> )	210000 MPa
Deformação última (ε <sub>s</sub> )	0,0100 mm/mm
Deformação de escoamento (ε <sub>s,y</sub> )	0,00238 mm/mm

**CFRP**

Para a fibra de carbono utiliza-se, segundo o ACI 440.2R-08 um fator de redução	CE	0,95
Resistência à tração característica (f <sub>f,k</sub> )	3600 MPa	
Resistência à tração de cálculo (f <sub>f,u</sub> )	3420 MPa	
Módulo de elasticidade (E <sub>f</sub> )	230000 MPa	
Deformação última característica (ε <sub>f,k</sub> )	0,021 mm/mm	
Deformação última (ε <sub>f,u</sub> )	0,01995 mm/mm	

**Passo 2- Determinação do estado de tensão existente devido ao carregamento permanente**

$\delta_{máx}$	0,462 cm	$\varepsilon_{b,i}$	0,001858	$LN =$	12,50 cm
		$\varepsilon_{conc,resid.}$	0,000817		

**Passo 3- Determinação da deformação de cálculo no reforço**

$$\varepsilon_{f,d} = 0,41 \sqrt{\frac{f_c}{nE_f t_f}} \leq 0,9 \varepsilon_{f,u}$$

$\varepsilon_{f,d}$	0,014867
---------------------	----------

Com  $t_f$  dado em mm**Passo 4- Estimativa da posição da linha neutra e determinação do módulo de elasticidade residual do concreto**

Posição da Linha Neutra	$x =$	2,358 cm
-------------------------	-------	----------

**Passo 5- Determinação do nível efetivo de tensão no reforço de CFRP**

$$\varepsilon_{f,e} = \varepsilon_{c,u} \left( \frac{d_f - x}{x} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{f,d}$$

$\varepsilon_{f,e}$	0,014867
---------------------	----------

**Passo 6- Determinação da deformação no concreto**

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{f,e} + \varepsilon_{bi}) \left( \frac{x}{d_f - x} \right)$$

$\varepsilon_c$	0,00252
-----------------	---------

**Passo 7- Determinação da deformação no aço da armadura positiva**

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{f,e} + \varepsilon_{bi}) \left( \frac{d - x}{d_f - x} \right)$$

$\varepsilon_s$	0,014397
-----------------	----------

**Passo 8- Cálculo do nível de tensão no aço e no reforço de CFRP**

$$f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y$$

$f_{s,calc}$	3023,34 MPa	$f_s$	500,00 MPa
$f_{s,máx}$	500,00 MPa		

$$f_{f,e} = E_{f,e} \varepsilon_{f,e}$$

$f_{f,e,calc}$	3419,37 MPa	$f_{f,e}$	3419,37 MPa
$f_{f,e,máx}$	3420,00 MPa		

**Passo 9- Cálculo das resultantes internas**

$$\varepsilon_{c,0} = \frac{1,7 f_c}{E_{c,s}}$$

$\varepsilon_{c,0}$  é uma deformação calculada com base nas propriedades mecânicas do concreto

$\varepsilon_{c,0}$	0,003175
---------------------	----------

$$\beta_1 = \frac{4\varepsilon_{c,0} - \varepsilon_c}{6\varepsilon_{c,0} - 2\varepsilon_c}$$

$\beta_1$	0,726624
-----------	----------

$$\alpha_1 = \frac{3\varepsilon_{c,0}\varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3\beta_1\varepsilon_{c,0}^2}$$

$\alpha_1$	0,803323
------------	----------

**Passo 10- Verificação do equilíbrio por conferência da posição da linha neutra**

$$x = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\alpha_1 f_c \beta_1 b}$$

$x_{calc}$	2,358776
------------	----------

**Passo 11- Determinação da resistência à flexão do aço e do reforço de FRP**

$$M_{R,s} = A_s f_s \left( d - \frac{\beta_1 x}{2} \right)$$

$M_{R,s}$	2,939947 kN.m
-----------	---------------

$$M_{R,f} = A_f f_{f,e} \left( d_f - \frac{\beta_1 x}{2} \right)$$

$M_{R,f}$	7,30151 kN.m
-----------	--------------

**Passo 12- Verificação da capacidade total da seção à flexão**

$$M_S \leq \phi M_R$$

$\phi$	1
--------	---

$$\left\{ \begin{array}{l} 0,90 \Rightarrow \varepsilon_s \geq 0,005 \\ \phi \left( 0,65 + \frac{0,25(\varepsilon_s - \varepsilon_{s,y})}{0,005 - \varepsilon_{s,y}} \right) \Rightarrow \varepsilon_{s,y} \leq \varepsilon_s \leq 0,005 \\ 0,65 \Rightarrow \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s,y} \end{array} \right.$$

$M_S$	5,34325 kN.m
-------	--------------

$M_R$	9,14623 kN.m
-------	--------------

Taxa	58%
------	-----

**OK!**

$$M_S \leq \phi \left[ M_{R,s} + \psi_f M_{R,f} \right]$$

Em que é atribuído uma minoração  $\psi_f$  à contribuição de resistência do reforço, conforme já elucidado anteriormente. O ACI 440.2R-08 sugere que esse valor seja tomado igual a 0,85 para reforços à flexão.

### Passo 13- Determinação do maior comprimento de ancoragem

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

$$\alpha = 1,5$$

Momento de fissuração

$$M_r = 2,62 \text{ kN.m}$$

Ponto de momento igual ao momento de fissuração (a partir do apoio)

$$l = 27,01 \text{ cm}$$

Determinação do comprimento de ancor.

$$l_{df} = \sqrt{\frac{n E_f t_f}{f_c}}$$

$$l_{df} = 7,34 \text{ cm} \quad (\text{ACI 440.2R-08})$$

$$l_{df} = 15 \text{ cm} \quad (\text{ACI 440.2R-02})$$

Verificação

OK

### Passo 14- Verificação do reforço transversal

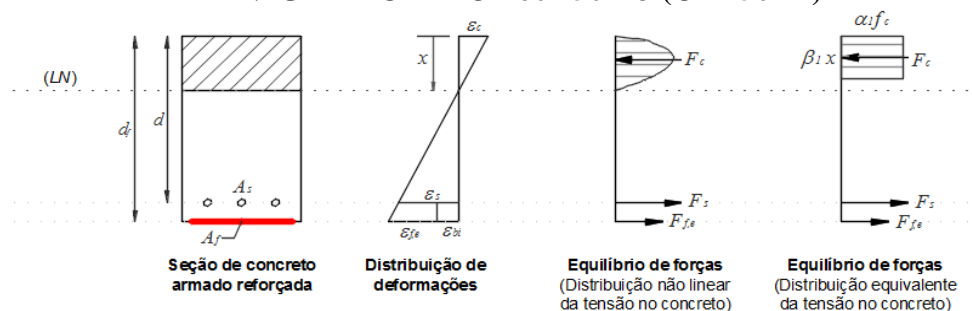
$$V_c = 2 \sqrt{f_c} b_w d$$

$$V_c = 16,76 \text{ kN}$$

Verificação

NÃO PRECISA DE ANCORAGEM COM REFORÇO TRANSVERSAL

**DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO COM CFRP**  
**VIGA - MODELO T60A50-R3 (CRA50-IT)**



	Dados de entrada
	Dados calculados pela planilha

**Passo 1- Determinação do modelo e das características geométricas e dos materiais**

**CARREGAMENTO**

Valor da carga máxima	19,82 kN		
Valor da força P	9,91 kN	Momento solicitante	5,4505 kN.m

**PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS**

Vão da viga ( $L$ )	170,0 cm	<b>Reforço de CFRP</b>	
Largura da Viga ( $b$ )	9,0 cm	Espessura de cada lâmina/manta	0,0166 cm
Altura total da Viga ( $h$ )	18,0 cm	Largura de cada lâmina/manta	7,5 cm
Inércia total do elemento ( $I_c$ )	4374 cm <sup>4</sup>	Número de Lâminas	1
Cobrimento Adotado ( $c$ )	1,5 cm	Altura efetiva do reforço ( $d_f$ )	18,0083 cm
Diâmetro da barra tracionada ( $\varnothing$ )	5,0 mm		
Número de barras	2		
Área de aço total ( $A_s$ )	0,3927 cm <sup>2</sup>		
Diâmetro da barra do estribo ( $\varnothing_t$ )	4,2 mm		
Altura efetiva da Viga ( $d$ )	15,83 cm		

**PROPRIEDADES DOS MATERIAIS**

**Concreto**

Resistência à compressão característica ( $f_c$ )	50,2 MPa
Resistência à tração média ( $f_{cm}$ )	3,6 MPa
Módulo de elasticidade inicial ( $E_c$ )	26880,0 MPa
Deformação última ( $\varepsilon_{cu}$ )	0,0035 mm/mm

**Aço CA-50**

Resistência de escoamento a tração característica ( $f_y$ )	500 MPa
Módulo de elasticidade ( $E_s$ )	210000 MPa
Deformação última ( $\varepsilon_s$ )	0,0100 mm/mm
Deformação de escoamento ( $\varepsilon_{s,y}$ )	0,00238 mm/mm

**CFRP**

Para a fibra de carbono utiliza-se, segundo o ACI 440.2R-08 um fator de redução	CE	0,95
Resistência à tração característica ( $f_{f,k}$ )	3600 MPa	
Resistência à tração de cálculo ( $f_{f,u}$ )	3420 MPa	
Módulo de elasticidade ( $E_f$ )	230000 MPa	
Deformação última característica ( $\varepsilon_{f,k}$ )	0,021 mm/mm	
Deformação última ( $\varepsilon_{f,u}$ )	0,01995 mm/mm	

**Passo 2- Determinação do estado de tensão existente devido ao carregamento permanente**

$\delta_{máx}$	0,462 cm	$\varepsilon_{b,i}$	0,001913	$LN =$	12,87 cm
		$\varepsilon_{conc,resid.}$	0,000762		

**Passo 3- Determinação da deformação de cálculo no reforço**

$$\varepsilon_{f,d} = 0,41 \sqrt{\frac{f_c}{nE_f t_f}} \leq 0,9 \varepsilon_{f,u}$$

$\varepsilon_{f,d}$	0,014867
---------------------	----------

Com  $t_f$  dado em mm**Passo 4- Estimativa da posição da linha neutra e determinação do módulo de elasticidade residual do concreto**

Posição da Linha Neutra	$x =$	2,356 cm
-------------------------	-------	----------

**Passo 5- Determinação do nível efetivo de tensão no reforço de CFRP**

$$\varepsilon_{f,e} = \varepsilon_{c,u} \left( \frac{d_f - x}{x} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{f,d}$$

$\varepsilon_{f,e}$	0,014867
---------------------	----------

**Passo 6- Determinação da deformação no concreto**

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{f,e} + \varepsilon_{bi}) \left( \frac{x}{d_f - x} \right)$$

$\varepsilon_c$	0,002526
-----------------	----------

**Passo 7- Determinação da deformação no aço da armadura positiva**

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{f,e} + \varepsilon_{bi}) \left( \frac{d - x}{d_f - x} \right)$$

$\varepsilon_s$	0,014445
-----------------	----------

**Passo 8- Cálculo do nível de tensão no aço e no reforço de CFRP**

$$f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y$$

$f_{s,calc}$	3033,35 MPa	$f_s$	500,00 MPa
$f_{s,máx}$	500,00 MPa		

$$f_{f,e} = E_{f,e} \varepsilon_{f,e}$$

$f_{f,e,calc}$	3419,37 MPa	$f_{f,e}$	3419,37 MPa
$f_{f,e,máx}$	3420,00 MPa		

**Passo 9- Cálculo das resultantes internas**

$$\varepsilon_{c,0} = \frac{1,7 f_c}{E_{c,s}}$$

$\varepsilon_{c,0}$  é uma deformação calculada com base nas propriedades mecânicas do concreto

$\varepsilon_{c,0}$	0,003175
---------------------	----------

$$\beta_1 = \frac{4\varepsilon_{c,0} - \varepsilon_c}{6\varepsilon_{c,0} - 2\varepsilon_c}$$

$\beta_1$	0,726812
-----------	----------

$$\alpha_1 = \frac{3\varepsilon_{c,0}\varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3\beta_1\varepsilon_{c,0}^2}$$

$\alpha_1$	0,804301
------------	----------

**Passo 10- Verificação do equilíbrio por conferência da posição da linha neutra**

$$x = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\alpha_1 f_c \beta_1 b}$$

$x_{calc}$	2,355298
------------	----------

**Passo 11- Determinação da resistência à flexão do aço e do reforço de FRP**

$$M_{R,s} = A_s f_s \left( d - \frac{\beta_1 x}{2} \right)$$

$M_{R,s}$	2,940152 kN.m
-----------	---------------

$$M_{R,f} = A_f f_{f,e} \left( d_f - \frac{\beta_1 x}{2} \right)$$

$M_{R,f}$	7,301954 kN.m
-----------	---------------

**Passo 12- Verificação da capacidade total da seção à flexão**

$$M_S \leq \phi M_R$$

$\phi$	1
--------	---

$$\phi \begin{cases} 0,90 \Rightarrow \varepsilon_s \geq 0,005 \\ 0,65 + \frac{0,25(\varepsilon_s - \varepsilon_{s,y})}{0,005 - \varepsilon_{s,y}} \Rightarrow \varepsilon_{s,y} \leq \varepsilon_s \leq 0,005 \\ 0,65 \Rightarrow \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s,y} \end{cases}$$

$M_S$	5,4505 kN.m
-------	-------------

$M_R$	9,14681 kN.m
-------	--------------

Taxa	60%
------	-----

**OK!**

$$M_S \leq \phi \left[ M_{R,s} + \psi_f M_{R,f} \right]$$

Em que é atribuído uma minoração  $\psi_f$  à contribuição de resistência do reforço, conforme já elucidado anteriormente. O ACI 440.2R-08 sugere que esse valor seja tomado igual a 0,85 para reforços à flexão.

**Passo 13- Determinação do maior comprimento de ancoragem**

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

$$\alpha = 1,5$$

Momento de fissuração

$$M_r = 2,62 \text{ kN.m}$$

Ponto de momento igual ao momento de fissuração (a partir do apoio)

$$l = 26,48 \text{ cm}$$

Determinação do comprimento de ancor.

$$l_{df} = \sqrt{\frac{n E_f t_f}{f_c}}$$

$$l_{df} = 7,34 \text{ cm} \quad (\text{ACI 440.2R-08})$$

$$l_{df} = 15 \text{ cm} \quad (\text{ACI 440.2R-02})$$

Verificação

OK

**Passo 14- Verificação do reforço transversal**

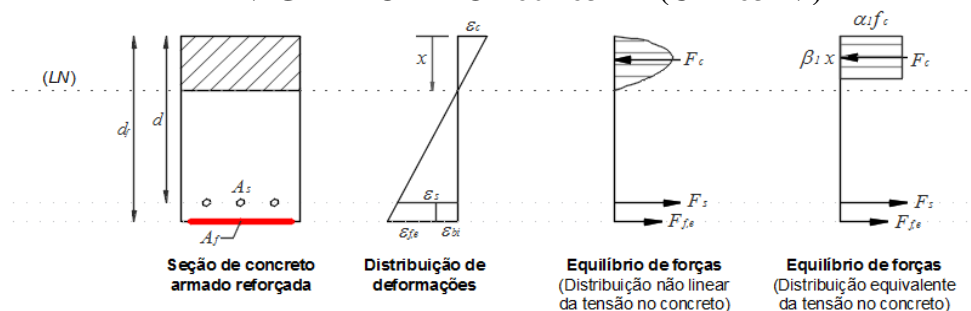
$$V_c = 2 \sqrt{f_c} b_w d$$

$$V_c = 16,76 \text{ kN}$$

Verificação

NÃO PRECISA DE ANCORAGEM COM REFORÇO TRANSVERSAL

**DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO COM CFRP**  
**VIGA - MODELO T60A63-R1 (CRA63-NI)**



	Dados de entrada
	Dados calculados pela planilha

**Passo 1- Determinação do modelo e das características geométricas e dos materiais**

**CARREGAMENTO**

Valor da carga máxima	26,64 kN		
Valor da força P	13,32 kN	Momento solicitante	7,326 kN.m

**PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS**

Vão da viga ( $L$ )	170,0 cm	<b>Reforço de CFRP</b>	
Largura da Viga ( $b$ )	9,0 cm	Espessura de cada lâmina/manta	0,0166 cm
Altura total da Viga ( $h$ )	18,0 cm	Largura de cada lâmina/manta	7,5 cm
Inércia total do elemento ( $I_c$ )	4374 cm <sup>4</sup>	Número de Lâminas	1
Cobrimento Adotado ( $c$ )	1,5 cm	Altura efetiva do reforço ( $d_f$ )	18,0083 cm
Diâmetro da barra tracionada ( $\varnothing$ )	6,3 mm		
Número de barras	2		
Área de aço total ( $A_s$ )	0,62345 cm <sup>2</sup>		
Diâmetro da barra do estribo ( $\varnothing_t$ )	4,2 mm		
Altura efetiva da Viga ( $d$ )	15,765 cm		

**PROPRIEDADES DOS MATERIAIS**

**Concreto**

Resistência à compressão característica ( $f_c$ )	50,2 MPa
Resistência à tração média ( $f_{cm}$ )	3,6 MPa
Módulo de elasticidade inicial ( $E_c$ )	26880,0 MPa
Deformação última ( $\varepsilon_{cu}$ )	0,0035 mm/mm

**Aço CA-50**

Resistência de escoamento a tração característica ( $f_y$ )	500 MPa
Módulo de elasticidade ( $E_s$ )	210000 MPa
Deformação última ( $\varepsilon_s$ )	0,0100 mm/mm
Deformação de escoamento ( $\varepsilon_{s,y}$ )	0,00238 mm/mm

**CFRP**

Para a fibra de carbono utiliza-se, segundo o ACI 440.2R-08 um fator de redução	CE	0,95
Resistência à tração característica ( $f_{f,k}$ )	3600 MPa	
Resistência à tração de cálculo ( $f_{f,u}$ )	3420 MPa	
Módulo de elasticidade ( $E_f$ )	230000 MPa	
Deformação última característica ( $\varepsilon_{f,k}$ )	0,021 mm/mm	
Deformação última ( $\varepsilon_{f,u}$ )	0,01995 mm/mm	

**Passo 2- Determinação do estado de tensão existente devido ao carregamento permanente**

$\delta_{máx}$	0,435 cm	$\varepsilon_{b,i}$	0,001849	$LN =$	13,21 cm
		$\varepsilon_{conc,resid.}$	0,00067		

**Passo 3- Determinação da deformação de cálculo no reforço**

$$\varepsilon_{f,d} = 0,41 \sqrt{\frac{f_c}{nE_f t_f}} \leq 0,9\varepsilon_{f,u}$$

$\varepsilon_{f,d}$	0,014867
---------------------	----------

Com  $t_f$  dado em mm**Passo 4- Estimativa da posição da linha neutra e determinação do módulo de elasticidade residual do concreto**

Posição da Linha Neutra	$x =$	2,606 cm
-------------------------	-------	----------

**Passo 5- Determinação do nível efetivo de tensão no reforço de CFRP**

$$\varepsilon_{f,e} = \varepsilon_{c,u} \left( \frac{d_f - x}{x} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{f,d}$$

$\varepsilon_{f,e}$	0,014867
---------------------	----------

**Passo 6- Determinação da deformação no concreto**

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{f,e} + \varepsilon_{bi}) \left( \frac{x}{d_f - x} \right)$$

$\varepsilon_c$	0,002828
-----------------	----------

**Passo 7- Determinação da deformação no aço da armadura positiva**

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{f,e} + \varepsilon_{bi}) \left( \frac{d - x}{d_f - x} \right)$$

$\varepsilon_s$	0,014281
-----------------	----------

**Passo 8- Cálculo do nível de tensão no aço e no reforço de CFRP**

$$f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y$$

$f_{s,calc}$	2999,00 MPa	$f_s$	500,00 MPa
$f_{s,máx}$	500,00 MPa		

$$f_{f,e} = E_{f,e} \varepsilon_{f,e}$$

$f_{f,e,calc}$	3419,37 MPa	$f_{f,e}$	3419,37 MPa
$f_{f,e,máx}$	3420,00 MPa		

**Passo 9- Cálculo das resultantes internas**

$$\varepsilon_{c,0} = \frac{1,7 f_c}{E_{c,s}}$$

$\varepsilon_{c,0}$  é uma deformação calculada com base nas propriedades mecânicas do concreto

$\varepsilon_{c,0}$	0,003175
---------------------	----------

$$\beta_1 = \frac{4\varepsilon_{c,0} - \varepsilon_c}{6\varepsilon_{c,0} - 2\varepsilon_c}$$

$\beta_1$	0,737058
-----------	----------

$$\alpha_1 = \frac{3\varepsilon_{c,0}\varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3\beta_1\varepsilon_{c,0}^2}$$

$\alpha_1$	0,849724
------------	----------

**Passo 10- Verificação do equilíbrio por conferência da posição da linha neutra**

$$x = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\alpha_1 f_c \beta_1 b}$$

$x_{calc}$	2,606144
------------	----------

**Passo 11- Determinação da resistência à flexão do aço e do reforço de FRP**

$$M_{R,s} = A_s f_s \left( d - \frac{\beta_1 x}{2} \right)$$

$M_{R,s}$	4,614945 kN.m
-----------	---------------

$$M_{R,f} = A_f f_{f,e} \left( d_f - \frac{\beta_1 x}{2} \right)$$

$M_{R,f}$	7,257463 kN.m
-----------	---------------

**Passo 12- Verificação da capacidade total da seção à flexão**

$$M_S \leq \phi M_R$$

$\phi$	1
--------	---

$$\phi \begin{cases} 0,90 \Rightarrow \varepsilon_s \geq 0,005 \\ 0,65 + \frac{0,25(\varepsilon_s - \varepsilon_{s,y})}{0,005 - \varepsilon_{s,y}} \Rightarrow \varepsilon_{s,y} \leq \varepsilon_s \leq 0,005 \\ 0,65 \Rightarrow \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s,y} \end{cases}$$

$M_S$	7,326 kN.m
-------	------------

$M_R$	10,7838 kN.m
-------	--------------

Taxa	68%
------	-----

**OK!**

$$M_S \leq \phi \left[ M_{R,s} + \psi_f M_{R,f} \right]$$

Em que é atribuído uma minoração  $\psi_f$  à contribuição de resistência do reforço, conforme já elucidado anteriormente. O ACI 440.2R-08 sugere que esse valor seja tomado igual a 0,85 para reforços à flexão.

### Passo 13- Determinação do maior comprimento de ancoragem

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

$$\alpha = 1,5$$

Momento de fissuração

$$M_r = 2,62 \text{ kN.m}$$

Ponto de momento igual ao momento de fissuração (a partir do apoio)

$$l = 19,70 \text{ cm}$$

Determinação do comprimento de ancor.

$$l_{df} = \sqrt{\frac{n E_f t_f}{\sqrt{f'_c}}}$$

$$l_{df} = 7,34 \text{ cm} \quad (\text{ACI 440.2R-08})$$

$$l_{df} = 15 \text{ cm} \quad (\text{ACI 440.2R-02})$$

Verificação

OK

### Passo 14- Verificação do reforço transversal

$$V_c = 2\sqrt{f'_c} b_w d$$

$$V_c = 16,69 \text{ kN}$$

Verificação

NECESSÁRIA ANCORAGEM COM REFORÇO TRANSVERSAL

$$k_1 = \left( \frac{f'_c}{27} \right)^{2/3}$$

$$k_1 = 1,51$$

$$L_e = \left( \frac{23300}{(n_f t_f E_f)^{0,58}} \right)$$

$$L_e = 51,27 \text{ mm}$$

$$k_2 = \left( \frac{d_{fv} - L_e}{d_{fv}} \right)$$

$$k_2 = 0,67$$

$$K_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11900 \varepsilon_{fu}} \leq 0,75$$

$$K_v = 0,22$$

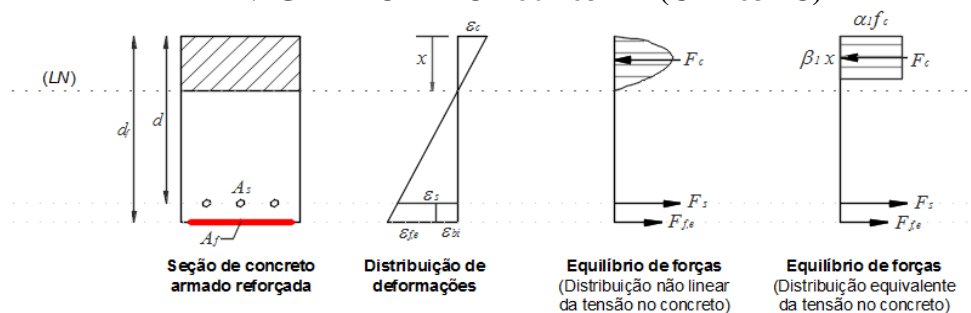
$$A_{f,anchor} = \frac{(A_f f_{fu})_{longitud}}{(E_f K_v \varepsilon_{fu})_{anchor}}$$

$$A_{f,anchor} = 42,46 \text{ mm}^2$$

Largura total da ancoragem (em cada lado)

$$L_{f,anchor} = 127,90 \text{ mm}$$

**DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO COM CFRP**  
**VIGA - MODELO T60A63-R2 (CRA63-IC)**



	Dados de entrada
	Dados calculados pela planilha

**Passo 1 - Determinação do modelo e das características geométricas e dos materiais**

**CARREGAMENTO**

Valor da carga máxima	26,40 kN		
Valor da força P	13,20 kN	Momento solicitante	7,26 kN.m

**PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS**

Vão da viga ( $L$ )	170,0 cm	<b>Reforço de CFRP</b>	
Largura da Viga ( $b$ )	9,0 cm	Espessura de cada lâmina/manta	0,0166 cm
Altura total da Viga ( $h$ )	18,0 cm	Largura de cada lâmina/manta	7,5 cm
Inércia total do elemento ( $I_c$ )	4374 cm <sup>4</sup>	Número de Lâminas	1
Cobrimento Adotado ( $c$ )	1,5 cm	Altura efetiva do reforço ( $d_f$ )	18,0083 cm
Diâmetro da barra tracionada ( $\varnothing$ )	6,3 mm		
Número de barras	2		
Área de aço total ( $A_s$ )	0,62345 cm <sup>2</sup>		
Diâmetro da barra do estribo ( $\varnothing_t$ )	4,2 mm		
Altura efetiva da Viga ( $d$ )	15,765 cm		

**PROPRIEDADES DOS MATERIAIS**

**Concreto**

Resistência à compressão característica ( $f_c$ )	50,2 MPa
Resistência à tração média ( $f_{cm}$ )	3,6 MPa
Módulo de elasticidade inicial ( $E_c$ )	26880,0 MPa
Deformação última ( $\varepsilon_{cu}$ )	0,0035 mm/mm

**Aço CA-50**

Resistência de escoamento a tração característica ( $f_y$ )	500 MPa
Módulo de elasticidade ( $E_s$ )	210000 MPa
Deformação última ( $\varepsilon_s$ )	0,0100 mm/mm
Deformação de escoamento ( $\varepsilon_{s,y}$ )	0,00238 mm/mm

**CFRP**

Para a fibra de carbono utiliza-se, segundo o ACI 440.2R-08 um fator de redução	CE	0,95
Resistência à tração característica ( $f_{f,k}$ )	3600 MPa	
Resistência à tração de cálculo ( $f_{f,u}$ )	3420 MPa	
Módulo de elasticidade ( $E_f$ )	230000 MPa	
Deformação última característica ( $\varepsilon_{f,k}$ )	0,021 mm/mm	
Deformação última ( $\varepsilon_{f,u}$ )	0,01995 mm/mm	

### Passo 2- Determinação do estado de tensão existente devido ao carregamento permanente

$\delta_{máx}$	0,461 cm	$\varepsilon_{b,i}$	0,001918	$LN =$	12,93 cm
		$\varepsilon_{conc,resid.}$	0,000752		

### Passo 3- Determinação da deformação de cálculo no reforço

$$\varepsilon_{f,d} = 0,41 \sqrt{\frac{f_c}{nE_f t_f}} \leq 0,9\varepsilon_{f,u}$$

$\varepsilon_{f,d}$	0,014867
---------------------	----------

Com  $t_f$  dado em mm

### Passo 4- Estimativa da posição da linha neutra e determinação do módulo de elasticidade residual do concreto

Posição da Linha Neutra	$x =$	2,602 cm
-------------------------	-------	----------

### Passo 5- Determinação do nível efetivo de tensão no reforço de CFRP

$$\varepsilon_{f,e} = \varepsilon_{c,u} \left( \frac{d_f - x}{x} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{f,d}$$

$\varepsilon_{f,e}$	0,014867
---------------------	----------

### Passo 6- Determinação da deformação no concreto

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{f,e} + \varepsilon_{bi}) \left( \frac{x}{d_f - x} \right)$$

$\varepsilon_c$	0,002835
-----------------	----------

### Passo 7- Determinação da deformação no aço da armadura positiva

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{f,e} + \varepsilon_{bi}) \left( \frac{d - x}{d_f - x} \right)$$

$\varepsilon_s$	0,01434
-----------------	---------

### Passo 8- Cálculo do nível de tensão no aço e no reforço de CFRP

$$f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y$$

$f_{s,calc}$	3011,50 MPa	$f_s$	500,00 MPa
$f_{s,máx}$	500,00 MPa		

$$f_{f,e} = E_f \varepsilon_{f,e}$$

$f_{f,e,calc}$	3419,37 MPa	$f_{f,e}$	3419,37 MPa
$f_{f,e,máx}$	3420,00 MPa		

**Passo 9- Cálculo das resultantes internas**

$$\varepsilon_{c,0} = \frac{1,7 f_c}{E_{c,s}}$$

$\varepsilon_{c,0}$  é uma deformação calculada com base nas propriedades mecânicas do concreto

$\varepsilon_{c,0}$	0,003175
---------------------	----------

$$\beta_1 = \frac{4\varepsilon_{c,0} - \varepsilon_c}{6\varepsilon_{c,0} - 2\varepsilon_c}$$

$\beta_1$	0,737291
-----------	----------

$$\alpha_1 = \frac{3\varepsilon_{c,0}\varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3\beta_1\varepsilon_{c,0}^2}$$

$\alpha_1$	0,850594
------------	----------

**Passo 10- Verificação do equilíbrio por conferência da posição da linha neutra**

$$x = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\alpha_1 f_c \beta_1 b}$$

$x_{calc}$	2,602656
------------	----------

**Passo 11- Determinação da resistência à flexão do aço e do reforço de FRP**

$$M_{R,s} = A_s f_s \left( d - \frac{\beta_1 x}{2} \right)$$

$M_{R,s}$	4,615251 kN.m
-----------	---------------

$$M_{R,f} = A_f f_{f,e} \left( d_f - \frac{\beta_1 x}{2} \right)$$

$M_{R,f}$	7,257881 kN.m
-----------	---------------

**Passo 12- Verificação da capacidade total da seção à flexão**

$$M_S \leq \phi M_R$$

$\phi$	1
--------	---

$$\phi \left\{ \begin{array}{l} 0,90 \Rightarrow \varepsilon_s \geq 0,005 \\ 0,65 + \frac{0,25(\varepsilon_s - \varepsilon_{s,y})}{0,005 - \varepsilon_{s,y}} \Rightarrow \varepsilon_{s,y} \leq \varepsilon_s \leq 0,005 \\ 0,65 \Rightarrow \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s,y} \end{array} \right.$$

$M_S$	7,26 kN.m
-------	-----------

$M_R$	10,7844 kN.m
-------	--------------

Taxa	67%
------	-----

**OK!**

$$M_S \leq \phi \left[ M_{R,s} + \psi_f M_{R,f} \right]$$

Em que é atribuído uma minoração  $\psi_f$  à contribuição de resistência do reforço, conforme já elucidado anteriormente. O ACI 440.2R-08 sugere que esse valor seja tomado igual a 0,85 para reforços à flexão.

### Passo 13- Determinação do maior comprimento de ancoragem

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

$$\alpha = 1,5$$

Momento de fissuração

$$M_r = 2,62 \text{ kN.m}$$

Ponto de momento igual ao momento de fissuração (a partir do apoio)

$$l = 19,88 \text{ cm}$$

Determinação do comprimento de ancor.

$$l_{df} = \sqrt{\frac{n E_f t_f}{\sqrt{f_c'}}$$

$$l_{df} = 7,34 \text{ cm} \quad (\text{ACI 440.2R-08})$$

$$l_{df} = 15 \text{ cm} \quad (\text{ACI 440.2R-02})$$

Verificação

OK

### Passo 14- Verificação do reforço transversal

$$V_c = 2\sqrt{f_c} b_w d$$

$$V_c = 16,69 \text{ kN}$$

Verificação

NECESSÁRIA ANCORAGEM COM REFORÇO TRANSVERSAL

$$k_1 = \left( \frac{f_c'}{27} \right)^{2/3}$$

$$k_1 = 1,51$$

$$L_e = \left( \frac{23300}{(n_f t_f E_f)^{0,58}} \right)$$

$$L_e = 51,27 \text{ mm}$$

$$k_2 = \left( \frac{d_{fv} - L_e}{d_{fv}} \right)$$

$$k_2 = 0,67$$

$$k_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11900 \varepsilon_{fu}} \leq 0,75$$

$$k_v = 0,22$$

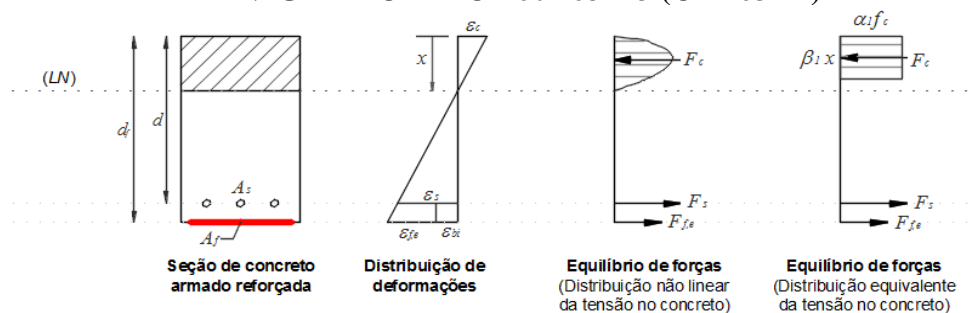
$$A_{f,anchor} = \frac{(A_f f_{fu})_{longitud}}{(E_f k_v \varepsilon_{fu})_{anchor}}$$

$$A_{f,anchor} = 42,46 \text{ mm}^2$$

Largura total da ancoragem (em cada lado)

$$L_{f,anchor} = 127,90 \text{ mm}$$

**DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO COM CFRP**  
**VIGA - MODELO T60A63-R3 (CRA63-IT)**



	Dados de entrada
	Dados calculados pela planilha

**Passo 1 - Determinação do modelo e das características geométricas e dos materiais**

**CARREGAMENTO**

Valor da carga máxima	25,66 kN		
Valor da força P	12,83 kN	Momento solicitante	7,0565 kN.m

**PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS**

Vão da viga ( $L$ )	170,0 cm	<b>Reforço de CFRP</b>	
Largura da Viga ( $b$ )	9,0 cm	Espessura de cada lâmina/manta	0,0166 cm
Altura total da Viga ( $h$ )	18,0 cm	Largura de cada lâmina/manta	7,5 cm
Inércia total do elemento ( $I_c$ )	4374 cm <sup>4</sup>	Número de Lâminas	1
Cobrimento Adotado ( $c$ )	1,5 cm	Altura efetiva do reforço ( $d_f$ )	18,0083 cm
Diâmetro da barra tracionada ( $\emptyset$ )	6,3 mm		
Número de barras	2		
Área de aço total ( $A_s$ )	0,62345 cm <sup>2</sup>		
Diâmetro da barra do estribo ( $\emptyset_t$ )	4,2 mm		
Altura efetiva da Viga ( $d$ )	15,765 cm		

**PROPRIEDADES DOS MATERIAIS**

**Concreto**

Resistência à compressão característica ( $f_c$ )	50,2 MPa
Resistência à tração média ( $f_{cm}$ )	3,6 MPa
Módulo de elasticidade inicial ( $E_c$ )	26880,0 MPa
Deformação última ( $\epsilon_{cu}$ )	0,0035 mm/mm

**Aço CA-50**

Resistência de escoamento a tração característica ( $f_y$ )	500 MPa
Módulo de elasticidade ( $E_s$ )	210000 MPa
Deformação última ( $\epsilon_s$ )	0,0100 mm/mm
Deformação de escoamento ( $\epsilon_{s,y}$ )	0,00238 mm/mm

**CFRP**

Para a fibra de carbono utiliza-se, segundo o ACI 440.2R-08 um fator de redução	CE	0,95
Resistência à tração característica ( $f_{f,k}$ )	3600 MPa	
Resistência à tração de cálculo ( $f_{f,u}$ )	3420 MPa	
Módulo de elasticidade ( $E_f$ )	230000 MPa	
Deformação última característica ( $\epsilon_{f,k}$ )	0,021 mm/mm	
Deformação última ( $\epsilon_{f,u}$ )	0,01995 mm/mm	

**Passo 2- Determinação do estado de tensão existente devido ao carregamento permanente**

$\delta_{m\acute{a}x}$	0,467 cm	$\varepsilon_{b,i}$	0,002015	$LN =$	13,41 cm
		$\varepsilon_{conc,resid.}$	0,00069		

**Passo 3- Determinação da deformação de cálculo no reforço**

$$\varepsilon_{f,d} = 0,41 \sqrt{\frac{f_c}{nE_f t_f}} \leq 0,9\varepsilon_{f,u}$$

$\varepsilon_{f,d}$	0,014867
---------------------	----------

Com  $t_f$  dado em mm**Passo 4- Estimativa da posição da linha neutra e determinação do módulo de elasticidade residual do concreto**

Posição da Linha Neutra	$x =$	2,597 cm
-------------------------	-------	----------

**Passo 5- Determinação do nível efetivo de tensão no reforço de CFRP**

$$\varepsilon_{f,e} = \varepsilon_{c,u} \left( \frac{d_f - x}{x} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{f,d}$$

$\varepsilon_{f,e}$	0,014867
---------------------	----------

**Passo 6- Determinação da deformação no concreto**

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{f,e} + \varepsilon_{bi}) \left( \frac{x}{d_f - x} \right)$$

$\varepsilon_c$	0,002845
-----------------	----------

**Passo 7- Determinação da deformação no aço da armadura positiva**

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{f,e} + \varepsilon_{bi}) \left( \frac{d - x}{d_f - x} \right)$$

$\varepsilon_s$	0,014424
-----------------	----------

**Passo 8- Cálculo do nível de tensão no aço e no reforço de CFRP**

$$f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y$$

$f_{s,calc}$	3029,09 MPa	$f_s$	500,00 MPa
$f_{s,m\acute{a}x}$	500,00 MPa		

$$f_{f,e} = E_{f,e} \varepsilon_{f,e}$$

$f_{f,e,calc}$	3419,37 MPa	$f_{f,e}$	3419,37 MPa
$f_{f,e,m\acute{a}x}$	3420,00 MPa		

**Passo 9- Cálculo das resultantes internas**

$$\varepsilon_{c,0} = \frac{1,7 f_c}{E_{c,s}}$$

$\varepsilon_{c,0}$  é uma deformação calculada com base nas propriedades mecânicas do concreto

$\varepsilon_{c,0}$	0,003175
---------------------	----------

$$\beta_1 = \frac{4\varepsilon_{c,0} - \varepsilon_c}{6\varepsilon_{c,0} - 2\varepsilon_c}$$

$\beta_1$	0,737646
-----------	----------

$$\alpha_1 = \frac{3\varepsilon_{c,0}\varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3\beta_1\varepsilon_{c,0}^2}$$

$\alpha_1$	0,851907
------------	----------

**Passo 10- Verificação do equilíbrio por conferência da posição da linha neutra**

$$x = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\alpha_1 f_c \beta_1 b}$$

$x_{calc}$	2,597393
------------	----------

**Passo 11- Determinação da resistência à flexão do aço e do reforço de FRP**

$$M_{R,s} = A_s f_s \left( d - \frac{\beta_1 x}{2} \right)$$

$M_{R,s}$	4,615712 kN.m
-----------	---------------

$$M_{R,f} = A_f f_{f,e} \left( d_f - \frac{\beta_1 x}{2} \right)$$

$M_{R,f}$	7,258511 kN.m
-----------	---------------

**Passo 12- Verificação da capacidade total da seção à flexão**

$$M_S \leq \phi M_R$$

$\phi$	1
--------	---

$$\phi \left\{ \begin{array}{l} 0,90 \Rightarrow \varepsilon_s \geq 0,005 \\ 0,65 + \frac{0,25(\varepsilon_s - \varepsilon_{s,y})}{0,005 - \varepsilon_{s,y}} \Rightarrow \varepsilon_{s,y} \leq \varepsilon_s \leq 0,005 \\ 0,65 \Rightarrow \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s,y} \end{array} \right.$$

$M_S$	7,0565 kN.m
-------	-------------

$M_R$	10,7854 kN.m
-------	--------------

Taxa	65%
------	-----

**OK!**

$$M_S \leq \phi \left[ M_{R,s} + \psi_f M_{R,f} \right]$$

Em que é atribuído uma minoração  $\psi_f$  à contribuição de resistência do reforço, conforme já elucidado anteriormente. O ACI 440.2R-08 sugere que esse valor seja tomado igual a 0,85 para reforços à flexão.

**Passo 13- Determinação do maior comprimento de ancoragem**

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

$$\alpha = 1,5$$

Momento de fissuração

$$M_r = 2,62 \text{ kN.m}$$

Ponto de momento igual ao momento de fissuração (a partir do apoio)

$$l = 20,46 \text{ cm}$$

Determinação do comprimento de ancor.

$$l_{df} = \sqrt{\frac{n E_f t_f}{\sqrt{f'_c}}}$$

$$l_{df} = 7,34 \text{ cm} \quad (\text{ACI 440.2R-08})$$

$$l_{df} = 15 \text{ cm} \quad (\text{ACI 440.2R-02})$$

Verificação

OK

**Passo 14- Verificação do reforço transversal**

$$V_c = 2 \sqrt{f'_c} b_w d$$

$$V_c = 16,69 \text{ kN}$$

Verificação

NECESSÁRIA ANCORAGEM COM REFORÇO TRANSVERSAL

$$k_1 = \left( \frac{f'_c}{27} \right)^{2/3}$$

$$k_1 = 1,51$$

$$L_e = \left( \frac{23300}{(n_f t_f E_f)^{0,58}} \right)$$

$$L_e = 51,27 \text{ mm}$$

$$k_2 = \left( \frac{d_{fv} - L_e}{d_{fv}} \right)$$

$$k_2 = 0,67$$

$$K_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11900 \varepsilon_{fu}} \leq 0,75$$

$$K_v = 0,22$$

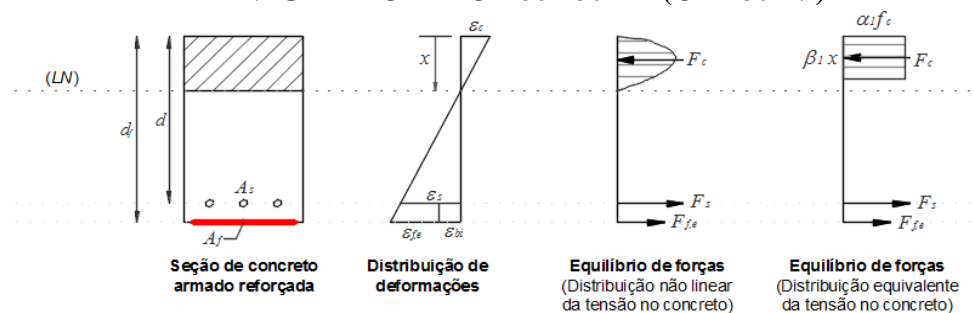
$$A_{f,anchor} = \frac{(A_f f_{fu})_{longitud}}{(E_f K_v \varepsilon_{fu})_{anchor}}$$

$$A_{f,anchor} = 42,46 \text{ mm}^2$$

Largura total da ancoragem (em cada lado)

$$L_{r,anchor} = 127,90 \text{ mm}$$

**DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO COM CFRP**  
**VIGA - MODELO T60A80-R1 (CRA80-NI)**



	Dados de entrada
	Dados calculados pela planilha

**Passo 1 - Determinação do modelo e das características geométricas e dos materiais**

CARREGAMENTO			
Valor da carga máxima	43,96 kN		
Valor da força P	21,98 kN	Momento solicitante	12,089 kN.m
PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS			
Vão da viga ( $L$ )	170,0 cm	Reforço de CFRP	
Largura da Viga ( $b$ )	9,0 cm	Espessura de cada lâmina/manta	0,0166 cm
Altura total da Viga ( $h$ )	18,0 cm	Largura de cada lâmina/manta	7,5 cm
Inércia total do elemento ( $I_c$ )	4374 cm <sup>4</sup>	Número de Lâminas	1
Cobrimento Adotado ( $c$ )	1,5 cm	Altura efetiva do reforço ( $d_f$ )	18,0083 cm
Diâmetro da barra tracionada ( $\varnothing$ )	8,0 mm		
Número de barras	2		
Área de aço total ( $A_s$ )	1,00531 cm <sup>2</sup>		
Diâmetro da barra do estribo ( $\varnothing_t$ )	4,2 mm		
Altura efetiva da Viga ( $d$ )	15,68 cm		
PROPRIEDADES DOS MATERIAIS			
Concreto			
Resistência à compressão característica ( $f_c$ )		50,2 MPa	
Resistência à tração média ( $f_{cm}$ )		3,6 MPa	
Módulo de elasticidade inicial ( $E_c$ )		26880,0 MPa	
Deformação última ( $\varepsilon_{cu}$ )		0,0035 mm/mm	
Aço CA-50			
Resistência de escoamento a tração característica ( $f_y$ )		500 MPa	
Módulo de elasticidade ( $E_s$ )		210000 MPa	
Deformação última ( $\varepsilon_s$ )		0,0100 mm/mm	
Deformação de escoamento ( $\varepsilon_{s,y}$ )		0,00238 mm/mm	
CFRP			
Para a fibra de carbono utiliza-se, segundo o ACI 440.2R-08 um fator de redução		CE	0,95
Resistência à tração característica ( $f_{f,k}$ )		3600 MPa	
Resistência à tração de cálculo ( $f_{f,u}$ )		3420 MPa	
Módulo de elasticidade ( $E_f$ )		230000 MPa	
Deformação última característica ( $\varepsilon_{f,k}$ )		0,021 mm/mm	
Deformação última ( $\varepsilon_{f,u}$ )		0,01995 mm/mm	

**Passo 2- Determinação do estado de tensão existente devido ao carregamento permanente**

$\delta_{m\acute{a}x}$	0,711 cm	$\varepsilon_{b,i}$	0,002942	$LN =$	12,86 cm
		$\varepsilon_{conc,resid.}$	0,001176		

**Passo 3- Determinação da deformação de cálculo no reforço**

$$\varepsilon_{f,d} = 0,41 \sqrt{\frac{f_c}{nE_f t_f}} \leq 0,9\varepsilon_{f,u}$$

$\varepsilon_{f,d}$	0,014867
---------------------	----------

Com  $t_f$  dado em mm**Passo 4- Estimativa da posição da linha neutra e determinação do módulo de elasticidade residual do concreto**

Posição da Linha Neutra	$x =$	2,95 cm
-------------------------	-------	---------

**Passo 5- Determinação do nível efetivo de tensão no reforço de CFRP**

$$\varepsilon_{f,e} = \varepsilon_{c,u} \left( \frac{d_f - x}{x} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{f,d}$$

$\varepsilon_{f,e}$	0,014867
---------------------	----------

**Passo 6- Determinação da deformação no concreto**

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{f,e} + \varepsilon_{bi}) \left( \frac{x}{d_f - x} \right)$$

$\varepsilon_c$	0,003489
-----------------	----------

**Passo 7- Determinação da deformação no aço da armadura positiva**

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{f,e} + \varepsilon_{bi}) \left( \frac{d - x}{d_f - x} \right)$$

$\varepsilon_s$	0,015055
-----------------	----------

**Passo 8- Cálculo do nível de tensão no aço e no reforço de CFRP**

$$f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y$$

$f_{s,calc}$	3161,53 MPa	$f_s$	500,00 MPa
$f_{s,m\acute{a}x}$	500,00 MPa		

$$f_{f,e} = E_{f,e} \varepsilon_{f,e}$$

$f_{f,e,calc}$	3419,37 MPa	$f_{f,e}$	3419,37 MPa
$f_{f,e,m\acute{a}x}$	3420,00 MPa		

**Passo 9- Cálculo das resultantes internas**

$$\varepsilon_{c,0} = \frac{1,7 f_c}{E_{c,s}}$$

$\varepsilon_{c,0}$  é uma deformação calculada com base nas propriedades mecânicas do concreto

$\varepsilon_{c,0}$	0,003175
---------------------	----------

$$\beta_1 = \frac{4\varepsilon_{c,0} - \varepsilon_c}{6\varepsilon_{c,0} - 2\varepsilon_c}$$

$\beta_1$	0,763002
-----------	----------

$$\alpha_1 = \frac{3\varepsilon_{c,0}\varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3\beta_1\varepsilon_{c,0}^2}$$

$\alpha_1$	0,912666
------------	----------

**Passo 10- Verificação do equilíbrio por conferência da posição da linha neutra**

$$x = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\alpha_1 f_c \beta_1 b}$$

$x_{calc}$	2,950771
------------	----------

**Passo 11- Determinação da resistência à flexão do aço e do reforço de FRP**

$$M_{R,s} = A_s f_s \left( d - \frac{\beta_1 x}{2} \right)$$

$M_{R,s}$	7,315778 kN.m
-----------	---------------

$$M_{R,f} = A_f f_{f,e} \left( d_f - \frac{\beta_1 x}{2} \right)$$

$M_{R,f}$	7,1871 kN.m
-----------	-------------

**Passo 12- Verificação da capacidade total da seção à flexão**

$$M_S \leq \phi M_R$$

$\phi$	1
--------	---

$$\phi \left\{ \begin{array}{l} 0,90 \Rightarrow \varepsilon_s \geq 0,005 \\ 0,65 + \frac{0,25(\varepsilon_s - \varepsilon_{s,y})}{0,005 - \varepsilon_{s,y}} \Rightarrow \varepsilon_{s,y} \leq \varepsilon_s \leq 0,005 \\ 0,65 \Rightarrow \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s,y} \end{array} \right.$$

$M_S$	12,089 kN.m
-------	-------------

$M_R$	13,4248 kN.m
-------	--------------

Taxa	90%
------	-----

**OK!**

$$M_S \leq \phi \left[ M_{R,s} + \psi_f M_{R,f} \right]$$

Em que é atribuído uma minoração  $\psi_f$  à contribuição de resistência do reforço, conforme já elucidado anteriormente. O ACI 440.2R-08 sugere que esse valor seja tomado igual a 0,85 para reforços à flexão.

**Passo 13- Determinação do maior comprimento de ancoragem**

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

$$\alpha = 1,5$$

Momento de fissuração

$$M_r = 2,62 \text{ kN.m}$$

Ponto de momento igual ao momento de fissuração (a partir do apoio)

$$l = 11,94 \text{ cm}$$

Determinação do comprimento de ancor.

$$l_{df} = \sqrt{\frac{n E_f t_f}{f_c'}}$$

$$l_{df} = 7,34 \text{ cm} \quad (\text{ACI 440.2R-08})$$

$$l_{df} = 15 \text{ cm} \quad (\text{ACI 440.2R-02})$$

Verificação

ANCORAGEM PASSA DO APOIO

**Passo 14- Verificação do reforço transversal**

$$V_c = 2\sqrt{f_c} b_w d$$

$$V_c = 16,60 \text{ kN}$$

Verificação

NECESSÁRIA ANCORAGEM COM REFORÇO TRANSVERSAL

$$k_1 = \left( \frac{f_c'}{27} \right)^{2/3}$$

$$k_1 = 1,51$$

$$L_e = \left( \frac{23300}{(n_f t_f E_f)^{0,58}} \right)$$

$$L_e = 51,27 \text{ mm}$$

$$k_2 = \left( \frac{d_{fv} - L_e}{d_{fv}} \right)$$

$$k_2 = 0,67$$

$$\kappa_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11900 \varepsilon_{fu}} \leq 0,75$$

$$\kappa_v = 0,22$$

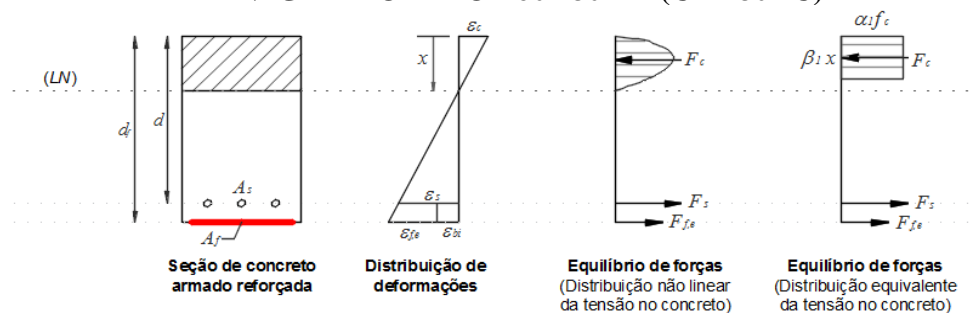
$$A_{f,anchor} = \frac{(A_f f_{fu})_{longitud}}{(E_f \kappa_v \varepsilon_{fu})_{anchor}}$$

$$A_{f,anchor} = 42,46 \text{ mm}^2$$

Largura total da ancoragem (em cada lado)

$$L_{f,anchor} = 127,90 \text{ mm}$$

**DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO COM CFRP**  
**VIGA - MODELO T60A80-R2 (CRA80-IC)**



	Dados de entrada
	Dados calculados pela planilha

**Passo 1 - Determinação do modelo e das características geométricas e dos materiais**

CARREGAMENTO			
Valor da carga máxima	47,75 kN		
Valor da força P	23,88 kN	Momento solicitante	13,13125 kN.m
PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS			
Vão da viga (L)	170,0 cm	Reforço de CFRP	
Largura da Viga (b)	9,0 cm	Espessura de cada lâmina/manta	0,0166 cm
Altura total da Viga (h)	18,0 cm	Largura de cada lâmina/manta	7,5 cm
Inércia total do elemento (I <sub>c</sub> )	4374 cm <sup>4</sup>	Número de Lâminas	1
Cobrimento Adotado (c)	1,5 cm	Altura efetiva do reforço (d <sub>f</sub> )	18,0083 cm
Diâmetro da barra tracionada (Ø)	8,0 mm		
Número de barras	2		
Área de aço total (A <sub>s</sub> )	1,00531 cm <sup>2</sup>		
Diâmetro da barra do estribo (Ø <sub>t</sub> )	4,2 mm		
Altura efetiva da Viga (d)	15,68 cm		
PROPRIEDADES DOS MATERIAIS			
Concreto			
Resistência à compressão característica (f <sub>c</sub> )		50,2 MPa	
Resistência à tração média (f <sub>cm</sub> )		3,6 MPa	
Módulo de elasticidade inicial (E <sub>c</sub> )		26880,0 MPa	
Deformação última (ε <sub>cu</sub> )		0,0035 mm/mm	
Aço CA-50			
Resistência de escoamento a tração característica (f <sub>y</sub> )		500 MPa	
Módulo de elasticidade (E <sub>s</sub> )		210000 MPa	
Deformação última (ε <sub>s</sub> )		0,0100 mm/mm	
Deformação de escoamento (ε <sub>s,y</sub> )		0,00238 mm/mm	
CFRP			
Para a fibra de carbono utiliza-se, segundo o ACI 440.2R-08 um fator de redução		CE	0,95
Resistência à tração característica (f <sub>f,k</sub> )		3600 MPa	
Resistência à tração de cálculo (f <sub>f,u</sub> )		3420 MPa	
Módulo de elasticidade (E <sub>f</sub> )		230000 MPa	
Deformação última característica (ε <sub>f,k</sub> )		0,021 mm/mm	
Deformação última (ε <sub>f,u</sub> )		0,01995 mm/mm	

**Passo 2- Determinação do estado de tensão existente devido ao carregamento permanente**

$\delta_{máx}$	1,117 cm	$\varepsilon_{b,i}$	0,00479	$LN =$	13,33 cm
		$\varepsilon_{conc,resid.}$	0,001678		

**Passo 3- Determinação da deformação de cálculo no reforço**

$$\varepsilon_{f,d} = 0,41 \sqrt{\frac{f_c}{nE_f t_f}} \leq 0,9 \varepsilon_{f,u}$$

$\varepsilon_{f,d}$	0,014867
---------------------	----------

Com  $t_f$  dado em mm**Passo 4- Estimativa da posição da linha neutra e determinação do módulo de elasticidade residual do concreto**

Posição da Linha Neutra	$x =$	2,851 cm
-------------------------	-------	----------

**Passo 5- Determinação do nível efetivo de tensão no reforço de CFRP**

$$\varepsilon_{f,e} = \varepsilon_{c,u} \left( \frac{d_f - x}{x} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{f,d}$$

$\varepsilon_{f,e}$	0,013817
---------------------	----------

**Passo 6- Determinação da deformação no concreto**

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{f,e} + \varepsilon_{bi}) \left( \frac{x}{d_f - x} \right)$$

$\varepsilon_c$	0,0035
-----------------	--------

**Passo 7- Determinação da deformação no aço da armadura positiva**

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{f,e} + \varepsilon_{bi}) \left( \frac{d - x}{d_f - x} \right)$$

$\varepsilon_s$	0,015749
-----------------	----------

**Passo 8- Cálculo do nível de tensão no aço e no reforço de CFRP**

$$f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y$$

$f_{s,calc}$	3307,37 MPa	$f_s$	500,00 MPa
$f_{s,máx}$	500,00 MPa		

$$f_{f,e} = E_{f,e} \varepsilon_{f,e}$$

$f_{f,e,calc}$	3178,02 MPa	$f_{f,e}$	3178,02 MPa
$f_{f,e,máx}$	3420,00 MPa		

### Passo 9- Cálculo das resultantes internas

$$\varepsilon_{c,0} = \frac{1,7 f_c}{E_{c,s}}$$

$\varepsilon_{c,0}$  é uma deformação calculada com base nas propriedades mecânicas do concreto

$\varepsilon_{c,0}$	0,003175
---------------------	----------

$$\beta_1 = \frac{4\varepsilon_{c,0} - \varepsilon_c}{6\varepsilon_{c,0} - 2\varepsilon_c}$$

$\beta_1$	0,763493
-----------	----------

$$\alpha_1 = \frac{3\varepsilon_{c,0}\varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3\beta_1\varepsilon_{c,0}^2}$$

$\alpha_1$	0,913314
------------	----------

### Passo 10- Verificação do equilíbrio por conferência da posição da linha neutra

$$x = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\alpha_1 f_c \beta_1 b}$$

$x_{calc}$	2,851406
------------	----------

### Passo 11- Determinação da resistência à flexão do aço e do reforço de FRP

$$M_{R,s} = A_s f_s \left( d - \frac{\beta_1 x}{2} \right)$$

$M_{R,s}$	7,334481 kN.m
-----------	---------------

$$M_{R,f} = A_f f_{f,e} \left( d_f - \frac{\beta_1 x}{2} \right)$$

$M_{R,f}$	6,694541 kN.m
-----------	---------------

### Passo 12- Verificação da capacidade total da seção à flexão

$$M_S \leq \phi M_R$$

$\phi$	1
--------	---

$$\phi \left\{ \begin{array}{l} 0,90 \Rightarrow \varepsilon_s \geq 0,005 \\ 0,65 + \frac{0,25(\varepsilon_s - \varepsilon_{s,y})}{0,005 - \varepsilon_{s,y}} \Rightarrow \varepsilon_{s,y} \leq \varepsilon_s \leq 0,005 \\ 0,65 \Rightarrow \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s,y} \end{array} \right.$$

$M_S$	13,1313 kN.m
-------	--------------

$M_R$	13,0248 kN.m
-------	--------------

Taxa	101%
------	------

**NÃO OK!**

$$M_S \leq \phi \left[ M_{R,s} + \psi_f M_{R,f} \right]$$

Em que é atribuído uma minoração  $\psi_f$  à contribuição de resistência do reforço, conforme já elucidado anteriormente. O ACI 440.2R-08 sugere que esse valor seja tomado igual a 0,85 para reforços à flexão.

### Passo 13- Determinação do maior comprimento de ancoragem

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

$$\alpha = 1,5$$

Momento de fissuração

$$M_r = 2,62 \text{ kN.m}$$

Ponto de momento igual ao momento de fissuração (a partir do apoio)

$$l = 10,99 \text{ cm}$$

Determinação do comprimento de ancor.

$$l_{df} = \sqrt{\frac{n E_f t_f}{\sqrt{f'_c}}}$$

$$l_{df} = 7,34 \text{ cm} \quad (\text{ACI 440.2R-08})$$

$$l_{df} = 15 \text{ cm} \quad (\text{ACI 440.2R-02})$$

Verificação

ANCORAGEM PASSA DO APOIO

### Passo 14- Verificação do reforço transversal

$$V_c = 2\sqrt{f'_c} b_w d$$

$$V_c = 16,60 \text{ kN}$$

Verificação

NECESSÁRIA ANCORAGEM COM REFORÇO TRANSVERSAL

$$k_1 = \left( \frac{f'_c}{27} \right)^{2/3}$$

$$k_1 = 1,51$$

$$L_e = \left( \frac{23300}{(n_f t_f E_f)^{0,58}} \right)$$

$$L_e = 51,27 \text{ mm}$$

$$k_2 = \left( \frac{d_{fv} - L_e}{d_{fv}} \right)$$

$$k_2 = 0,67$$

$$\kappa_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11900 \varepsilon_{fu}} \leq 0,75$$

$$\kappa_v = 0,22$$

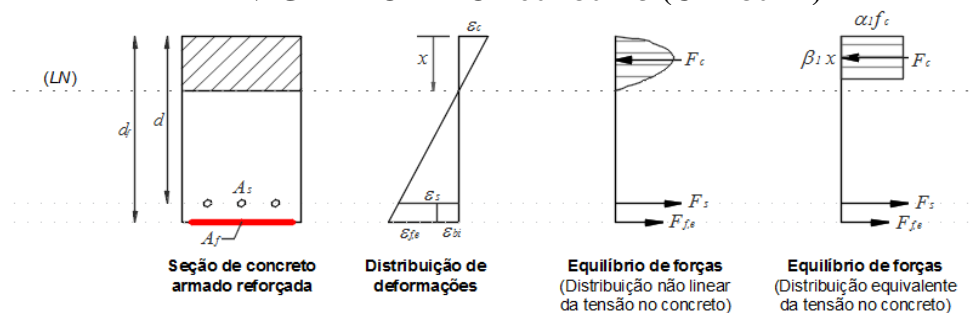
$$A_{f,anchor} = \frac{(A_f f_{fu})_{longitud}}{(E_f \kappa_v \varepsilon_{fu})_{anchor}}$$

$$A_{f,anchor} = 42,46 \text{ mm}^2$$

Largura total da ancoragem (em cada lado)

$$L_{f,anchor} = 127,90 \text{ mm}$$

**DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO COM CFRP**  
**VIGA - MODELO T60A80-R3 (CRA80-IT)**



	Dados de entrada
	Dados calculados pela planilha

**Passo 1 - Determinação do modelo e das características geométricas e dos materiais**

**CARREGAMENTO**

Valor da carga máxima	48,06 kN		
Valor da força P	24,03 kN	Momento solicitante	13,2165 kN.m

**PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS**

Vão da viga ( $L$ )	170,0 cm	<b>Reforço de CFRP</b>	
Largura da Viga ( $b$ )	9,0 cm	Espessura de cada lâmina/manta	0,0166 cm
Altura total da Viga ( $h$ )	18,0 cm	Largura de cada lâmina/manta	7,5 cm
Inércia total do elemento ( $I_c$ )	4374 cm <sup>4</sup>	Número de Lâminas	1
Cobrimento Adotado ( $c$ )	1,5 cm	Altura efetiva do reforço ( $d_f$ )	18,0083 cm
Diâmetro da barra tracionada ( $\emptyset$ )	8,0 mm		
Número de barras	2		
Área de aço total ( $A_s$ )	1,00531 cm <sup>2</sup>		
Diâmetro da barra do estribo ( $\emptyset_t$ )	4,2 mm		
Altura efetiva da Viga ( $d$ )	15,68 cm		

**PROPRIEDADES DOS MATERIAIS**

**Concreto**

Resistência à compressão característica ( $f_c$ )	50,2 MPa
Resistência à tração média ( $f_{cm}$ )	3,6 MPa
Módulo de elasticidade inicial ( $E_c$ )	26880,0 MPa
Deformação última ( $\epsilon_{cu}$ )	0,0035 mm/mm

**Aço CA-50**

Resistência de escoamento a tração característica ( $f_y$ )	500 MPa
Módulo de elasticidade ( $E_s$ )	210000 MPa
Deformação última ( $\epsilon_s$ )	0,0100 mm/mm
Deformação de escoamento ( $\epsilon_{s,y}$ )	0,00238 mm/mm

**CFRP**

Para a fibra de carbono utiliza-se, segundo o ACI 440.2R-08 um fator de redução	CE	0,95
Resistência à tração característica ( $f_{f,k}$ )	3600 MPa	
Resistência à tração de cálculo ( $f_{f,u}$ )	3420 MPa	
Módulo de elasticidade ( $E_f$ )	230000 MPa	
Deformação última característica ( $\epsilon_{f,k}$ )	0,021 mm/mm	
Deformação última ( $\epsilon_{f,u}$ )	0,01995 mm/mm	

**Passo 2- Determinação do estado de tensão existente devido ao carregamento permanente**

$\delta_{máx}$	0,81 cm	$\varepsilon_{b,i}$	0,003007	$LN =$	11,54 cm
		$\varepsilon_{conc,resid.}$	0,001683		

**Passo 3- Determinação da deformação de cálculo no reforço**

$$\varepsilon_{f,d} = 0,41 \sqrt{\frac{f_c}{nE_f t_f}} \leq 0,9\varepsilon_{f,u}$$

$\varepsilon_{f,d}$	0,014867
---------------------	----------

Com  $t_f$  dado em mm**Passo 4- Estimativa da posição da linha neutra e determinação do módulo de elasticidade residual do concreto**

Posição da Linha Neutra	$x =$	2,947 cm
-------------------------	-------	----------

**Passo 5- Determinação do nível efetivo de tensão no reforço de CFRP**

$$\varepsilon_{f,e} = \varepsilon_{c,u} \left( \frac{d_f - x}{x} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{f,d}$$

$\varepsilon_{f,e}$	0,014867
---------------------	----------

**Passo 6- Determinação da deformação no concreto**

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{f,e} + \varepsilon_{bi}) \left( \frac{x}{d_f - x} \right)$$

$\varepsilon_c$	0,003497
-----------------	----------

**Passo 7- Determinação da deformação no aço da armadura positiva**

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{f,e} + \varepsilon_{bi}) \left( \frac{d - x}{d_f - x} \right)$$

$\varepsilon_s$	0,015111
-----------------	----------

**Passo 8- Cálculo do nível de tensão no aço e no reforço de CFRP**

$$f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y$$

$f_{s,calc}$	3173,29 MPa	$f_s$	500,00 MPa
$f_{s,máx}$	500,00 MPa		

$$f_{f,e} = E_f \varepsilon_{f,e}$$

$f_{f,e,calc}$	3419,37 MPa	$f_{f,e}$	3419,37 MPa
$f_{f,e,máx}$	3420,00 MPa		

**Passo 9- Cálculo das resultantes internas**

$$\varepsilon_{c,0} = \frac{1,7 f_c}{E_{c,s}}$$

$\varepsilon_{c,0}$  é uma deformação calculada com base nas propriedades mecânicas do concreto

$\varepsilon_{c,0}$	0,003175
---------------------	----------

$$\beta_1 = \frac{4\varepsilon_{c,0} - \varepsilon_c}{6\varepsilon_{c,0} - 2\varepsilon_c}$$

$\beta_1$	0,763377
-----------	----------

$$\alpha_1 = \frac{3\varepsilon_{c,0}\varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3\beta_1\varepsilon_{c,0}^2}$$

$\alpha_1$	0,913163
------------	----------

**Passo 10- Verificação do equilíbrio por conferência da posição da linha neutra**

$$x = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\alpha_1 f_c \beta_1 b}$$

$x_{calc}$	2,947716
------------	----------

**Passo 11- Determinação da resistência à flexão do aço e do reforço de FRP**

$$M_{R,s} = A_s f_s \left( d - \frac{\beta_1 x}{2} \right)$$

$M_{R,s}$	7,316086 kN.m
-----------	---------------

$$M_{R,f} = A_f f_{f,e} \left( d_f - \frac{\beta_1 x}{2} \right)$$

$M_{R,f}$	7,187361 kN.m
-----------	---------------

**Passo 12- Verificação da capacidade total da seção à flexão**

$$M_S \leq \phi M_R$$

$\phi$	1
--------	---

$$\phi \left\{ \begin{array}{l} 0,90 \Rightarrow \varepsilon_s \geq 0,005 \\ 0,65 + \frac{0,25(\varepsilon_s - \varepsilon_{s,y})}{0,005 - \varepsilon_{s,y}} \Rightarrow \varepsilon_{s,y} \leq \varepsilon_s \leq 0,005 \\ 0,65 \Rightarrow \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s,y} \end{array} \right.$$

$M_S$	13,2165 kN.m
-------	--------------

$M_R$	13,4253 kN.m
-------	--------------

Taxa	98%
------	-----

**OK!**

$$M_S \leq \phi \left[ M_{R,s} + \psi_f M_{R,f} \right]$$

Em que é atribuído uma minoração  $\psi_f$  à contribuição de resistência do reforço, conforme já elucidado anteriormente. O ACI 440.2R-08 sugere que esse valor seja tomado igual a 0,85 para reforços à flexão.

### Passo 13- Determinação do maior comprimento de ancoragem

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

$$\alpha = 1,5$$

Momento de fissuração

$$M_r = 2,62 \text{ kN.m}$$

Ponto de momento igual ao momento de fissuração (a partir do apoio)

$$l = 10,92 \text{ cm}$$

Determinação do comprimento de ancor.

$$l_{df} = \sqrt{\frac{n E_f t_f}{\sqrt{f_c}}}$$

$$l_{df} = 7,34 \text{ cm} \quad (\text{ACI 440.2R-08})$$

$$l_{df} = 15 \text{ cm} \quad (\text{ACI 440.2R-02})$$

Verificação

ANCORAGEM PASSA DO APOIO

### Passo 14- Verificação do reforço transversal

$$V_c = 2\sqrt{f_c} b_w d$$

$$V_c = 16,60 \text{ kN}$$

Verificação

NECESSÁRIA ANCORAGEM COM REFORÇO TRANSVERSAL

$$k_1 = \left( \frac{f_c'}{27} \right)^{2/3}$$

$$k_1 = 1,51$$

$$L_e = \left( \frac{23300}{(n_f t_f E_f)^{0,58}} \right)$$

$$L_e = 51,27 \text{ mm}$$

$$k_2 = \left( \frac{d_{fv} - L_e}{d_{fv}} \right)$$

$$k_2 = 0,67$$

$$\kappa_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11900 \varepsilon_{fu}} \leq 0,75$$

$$\kappa_v = 0,22$$

$$A_{f,anchor} = \frac{(A_f f_{fu})_{longitud}}{(E_f \kappa_v \varepsilon_{fu})_{anchor}}$$

$$A_{f,anchor} = 42,46 \text{ mm}^2$$

Largura total da ancoragem (em cada lado)

$$L_{f,anchor} = 127,90 \text{ mm}$$

# APÊNDICE **B**

---

## **CARACTERÍSTICAS DAS FISSURAS DOS MODELOS DANIFICADOS**

Neste Apêndice são apresentadas as características de fissuração obtidas a partir da inspeção dos modelos danificados. É apresentada a posição de cada fissura, medida a partir da extremidade da viga, a abertura dessa fissura e sua extensão nas duas laterais do elemento.

Tabela B.1 - Características das fissuras dos modelos danificados.

<b>T60A50</b>	<b>EXEMPLAR</b>	<b>T60A50-R1</b>				<b>T60A50-R2</b>				<b>T60A50-R3</b>			
	Fissura <b>1</b>	1	2	3	Média	1	2	3	Média	1	2	3	Média
	Posição (cm)	61,9	61,2	62,0	61,7	61,8	62,5	62,3	62,2	62,2	62,5	62,3	62,3
	Abertura (mm)	0,4	0,3	0,3	0,33	0,3	0,3	0,3	0,30	0,2	0,3	0,3	0,27
	Extensão (cm)	Lado 1		Lado 2		Lado 1		Lado 2		Lado 1		Lado 2	
		12,0		12,5		11,0		12,2		12,1		12,3	
	Fissura <b>2</b>	1	2	3	Média	1	2	3	Média	1	2	3	Média
	Posição (cm)	72,0	71,3	71,6	71,6	73,0	73,7	73,7	73,5	74,1	74,1	73,9	74,0
	Abertura (mm)	0,3	0,3	0,3	0,30	0,9	0,8	0,8	0,83	0,2	0,2	0,2	0,20
	Extensão (cm)	Lado 1		Lado 2		Lado 1		Lado 2		Lado 1		Lado 2	
		13,8		12,8		13,9		14,3		12,0		11,5	
	Fissura <b>3</b>	1	2	3	Média	1	2	3	Média	1	2	3	Média
	Posição (cm)	80,9	81,0	81,5	81,1	85,9	85,9	86,0	85,9	84,7	85,6	85,8	85,4
	Abertura (mm)	0,6	0,7	0,8	0,70	0,4	0,4	0,3	0,37	0,4	0,5	0,4	0,43
	Extensão (cm)	Lado 1		Lado 2		Lado 1		Lado 2		Lado 1		Lado 2	
		14,1		14,2		14,0		12,9		14,0		13,0	
	Fissura <b>4</b>	1	2	3	Média	1	2	3	Média	1	2	3	Média
	Posição (cm)	96,0	95,0	95,9	95,6	100,5	100,8	100,1	100,5	94,7	94,6	94,4	94,6
	Abertura (mm)	0,3	0,2	0,4	0,30	0,2	0,3	0,5	0,33	0,4	0,5	0,6	0,50
	Extensão (cm)	Lado 1		Lado 2		Lado 1		Lado 2		Lado 1		Lado 2	
		12,6		13,0		13,5		13,0		13,4		12,5	
	Fissura <b>5</b>	1	2	3	Média	1	2	3	Média	1	2	3	Média
	Posição (cm)	109,0	109,7	109,9	109,5	110,3	110,8	109,7	110,3	109,7	109,5	109,5	109,6
	Abertura (mm)	0,4	0,2	0,2	0,27	0,3	0,3	0,3	0,30	0,8	0,8	0,7	0,77
Extensão (cm)	Lado 1		Lado 2		Lado 1		Lado 2		Lado 1		Lado 2		
	9,2		10,1		13,0		12,4		14,9		14,0		
Fissura <b>6</b>	1	2	3	Média	1	2	3	Média	1	2	3	Média	
Posição (cm)	117,0	117,5	117,7	117,4	119,6	119,7	120,0	119,8	119,0	119,0	119,4	119,1	
Abertura (mm)	0,3	0,2	0,2	0,23	0,2	0,2	0,2	0,20	0,3	0,4	0,3	0,33	
Extensão (cm)	Lado 1		Lado 2		Lado 1		Lado 2		Lado 1		Lado 2		
	10,0		12,6		9,8		10,0		12,4		12,3		
<b>T60A63</b>	<b>EXEMPLAR</b>	<b>T60A63-R1</b>				<b>T60A63-R2</b>				<b>T60A63-R3</b>			
	Fissura <b>1</b>	1	2	3	Média	1	2	3	Média	1	2	3	Média
	Posição (cm)	68,5	68,9	69,0	68,8	70,7	70,4	71,1	70,7	61,9	61,9	62,1	62,0
	Abertura (mm)	0,9	0,9	0,9	0,90	0,5	0,5	0,5	0,50	0,3	0,3	0,3	0,30
	Extensão (cm)	Lado 1		Lado 2		Lado 1		Lado 2		Lado 1		Lado 2	
		14,3		13,3		13,6		13,2		12,2		12,0	
	Fissura <b>2</b>	1	2	3	Média	1	2	3	Média	1	2	3	Média
	Posição (cm)	80,9	82,3	82,3	81,8	84,5	83,7	83,9	84,0	81,7	80,9	80,4	81,0
	Abertura (mm)	0,2	0,2	0,2	0,20	0,4	0,4	0,4	0,40	1	0,4	0,7	0,70
	Extensão (cm)	Lado 1		Lado 2		Lado 1		Lado 2		Lado 1		Lado 2	
		13,2		11,7		12,0		11,9		14,8		14,9	
	Fissura <b>3</b>	1	2	3	Média	1	2	3	Média	1	2	3	Média
	Posição (cm)	107,7	107,6	107,1	107,5	108,2	107,6	107,9	107,9	88,9	88,8	89,0	88,9
	Abertura (mm)	0,6	0,6	0,5	0,57	0,5	0,4	0,4	0,43	0,3	0,3	0,3	0,30
	Extensão (cm)	Lado 1		Lado 2		Lado 1		Lado 2		Lado 1		Lado 2	
		14,5		14,3		13,0		12,7		13,5		12,7	
	Fissura <b>4</b>	1	2	3	Média	1	2	3	Média	1	2	3	Média
	Posição (cm)	116,6	116,6	116,4	116,5	117,3	118,2	118,8	118,1	108,5	108,5	100,7	105,9
	Abertura (mm)	0,4	0,4	0,3	0,37	0,7	0,6	0,5	0,60	0,3	0,4	0,2	0,30
	Extensão (cm)	Lado 1		Lado 2		Lado 1		Lado 2		Lado 1		Lado 2	
		12,6		11,8		13,9		13,1		14,1		13,5	
	Fissura <b>5</b>									1	2	3	Média
	Posição (cm)									118,4	118,7	118,9	118,7
	Abertura (mm)									0,3	0,4	0,3	0,33
Extensão (cm)									Lado 1		Lado 2		
									13,9		12,5		

Tabela B.1 – Características das fissuras dos modelos danificados (Continuação).

EXEMPLAR	T60A80-R1				T60A80-R2				T60A80-R3				
	1	2	3	Média	1	2	3	Média	1	2	3	Média	
Fissura <b>1</b>	Posição (cm)	62,0	62,5	63,2	62,6	58,2	58,5	58,0	58,2	57,6	58,0	57,7	57,8
	Abertura (mm)	0,4	0,5	0,4	0,43	0,4	0,5	0,4	0,43	0,1	0,2	0,1	0,13
	Extensão (cm)	Lado 1		Lado 2		Lado 1		Lado 2		Lado 1		Lado 2	
		13,0		13,9		13,0		13,7		8,3		9,2	
Fissura <b>2</b>	Posição (cm)	70,5	70,3	70,8	70,5	68,3	67,8	68,1	68,1	61,4	61,0	60,9	61,1
	Abertura (mm)	0,6	0,4	0,5	0,50	0,7	0,7	0,7	0,70	0,3	0,3	0,2	0,27
	Extensão (cm)	Lado 1		Lado 2		Lado 1		Lado 2		Lado 1		Lado 2	
		13,0		12,8		12,5		15,1		12,3		11,4	
Fissura <b>3</b>	Posição (cm)	84,5	84,2	84,1	84,3	78,0	77,7	76,7	77,5	70,7	70,7	70,8	70,7
	Abertura (mm)	0,6	0,6	0,7	0,63	0,5	0,4	0,4	0,43	0,5	0,4	0,4	0,43
	Extensão (cm)	Lado 1		Lado 2		Lado 1		Lado 2		Lado 1		Lado 2	
		13,4		12,9		13,0		12,4		12,8		13,2	
Fissura <b>4</b>	Posição (cm)	94,1	94,3	93,9	94,1	83,1	83,1	83,2	83,1	80,2	80,4	80,9	80,5
	Abertura (mm)	0,3	0,4	0,4	0,37	0,4	0,4	0,4	0,40	0,5	0,7	0,4	0,53
	Extensão (cm)	Lado 1		Lado 2		Lado 1		Lado 2		Lado 1		Lado 2	
		12,7		12,4		12,3		12,7		12,4		13,5	
Fissura <b>5</b>	Posição (cm)	98,8	98,5	99,6	99,0	91,2	91,5	91,8	91,5	90,4	90,3	90,0	90,2
	Abertura (mm)	0,3	0,3	0,3	0,30	0,5	0,5	0,6	0,53	0,3	0,3	0,2	0,27
	Extensão (cm)	Lado 1		Lado 2		Lado 1		Lado 2		Lado 1		Lado 2	
		11,5		12,3		12,6		13,2		11,6		10,4	
Fissura <b>6</b>	Posição (cm)	107,7	108,5	108,0	108,1	97,1	97,7	97,9	97,6	96,6	97,0	96,6	96,7
	Abertura (mm)	0,7	0,5	0,4	0,53	0,4	0,4	0,5	0,43	0,5	0,5	0,5	0,50
	Extensão (cm)	Lado 1		Lado 2		Lado 1		Lado 2		Lado 1		Lado 2	
		13,3		13,1		12,7		12,2		12,0		12,8	
Fissura <b>7</b>	Posição (cm)					106,7	107,0	108,3	107,3	107,7	107,0	106,3	107,0
	Abertura (mm)					0,5	0,4	0,5	0,47	0,2	0,4	0,4	0,33
	Extensão (cm)					Lado 1		Lado 2		Lado 1		Lado 2	
						13,2		15,6		10,3		11,2	
Fissura <b>8</b>	Posição (cm)					117,1	117,8	116,5	117,1	119,2	119,2	119,1	119,2
	Abertura (mm)					0,7	0,7	0,5	0,63	0,2	0,2	0,1	0,17
	Extensão (cm)					Lado 1		Lado 2		Lado 1		Lado 2	
						15,1		14,0		10,4		12,9	
Fissura dupla na face inferior da viga													