

Universidade Federal de Alagoas
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Paulo Chagas do Carmo

**Detecção de danos em Elementos de Concreto por
meio de Correlação de Imagens Digitais**

Maceió
2020

PAULO CHAGAS DO CARMO

**DETECÇÃO DE DANOS EM ELEMENTOS DE CONCRETO
POR MEIO DE CORRELAÇÃO DE IMAGENS DIGITAIS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Maceió
2020

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

C287 Carmo, Paulo Chagas do.

Detecção de danos em elementos de concreto por meio de correlação de imagens digitais / Paulo Chagas do Carmo. - 2020.
173 f. : il.

Orientadora: Aline da Silva Ramos Barboza.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2020.

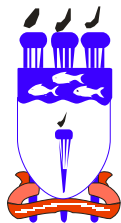
Bibliografia: f. 105-111.

Apêndices: f. 112-166.

Anexos: f. 167-173.

1. Danos (Estruturas). 2. Imagens digitais - Correlação. 3. Concreto reforçado com fibras. 4. Flexão (Engenharia civil). I. Título.

CDU:624



**DETECÇÃO DE DANOS EM ELEMENTOS DE CONCRETO POR MEIO DE
CORRELAÇÃO DE IMAGENS DIGITAIS**

PAULO CHAGAS DO CARMO

Dissertação submetida à banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas e aprovada no dia 18 do mês de setembro do ano de 2020.

Banca Examinadora:

Prof.ª Dr.ª Aline da Silva Ramos Barboza
(Orientadora – PPGEC/UFAL)

Prof.ª Dr.ª Karoline Alves de Melo Moraes
(Avaliadora Externa - CTEC/UFAL)

Prof. Dr. Isaac Galobardes Reyes
(Avaliador Externo – UM6P)

*Dedico este trabalho aos meus pais,
Paulo e Givaneide,
meus melhores orientadores na vida.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me dar saúde e perseverança em todas as etapas da minha vida.

Aos meus pais, Paulo e Givaneide que acreditaram em mim e com muita luta deram oportunidade, apoio e investiram em minha educação. Agradeço também aos meus irmãos e demais familiares, em especial ao meu sobrinho-afilhado que, em meio a esta pandemia, chegou para nos dar alegria, enchendo-nos de esperança em dias melhores. Obrigado por estarem comigo, amo vocês.

À minha orientadora, Profa. Dra. Aline Ramos, pelos importantes ensinamentos e direcionamentos nesse caminhar. Grato pela oportunidade concedida e pelos conselhos dados não só para o desenvolvimento deste trabalho, mas para a vida. Espero ter atendido às expectativas. Gratidão.

Agradeço aos meus colegas de turma pelo companheirismo e apoio mostrado nesta experiência, saibam que agora são meus amigos e que guardo todos com imenso carinho em meu coração, contem sempre comigo. Obrigado, Andressa, Anne, Gustavo, Iva, João Marcos, João P. Correia, João P. Lessa, Samara e Teófanés.

Falando em amigos, não poderia deixar de mencionar vocês: Eliedson Carvalho, Francisco Binas, Gabriel Domingos, Lucas Pena, Marcelo Luna, Mariana Marques, Wallison Venâncio, e em especial a vocês, Alan Barbosa e Jéssica Beatriz, pelos importantes apontamentos e discussões durante o desenvolvimento deste trabalho. Alguns novos, outros nem tanto, mas todos pessoas iluminadas.

A todos que compõem o PPGEC, em especial aos professores, pela amizade e por todo conhecimento transmitido durante este período.

À Universidade Federal de Alagoas – UFAL, especialmente aos responsáveis pelo Laboratório de Estruturas e Materiais (LEMA), por toda atenção dada durante o procedimento experimental. Agradeço também ao *Fiber Team*, em especial a Gabriela Dias, Kaio Oliveira, Danilo Freitas e Wanderson Bruno, pelo auxílio no desenvolvimento dessa pesquisa.

Ao Grupo de Pesquisa em Mecânica das Estruturas e Materiais Avançados do CNPq, na pessoa do M.Sc. Christiano Várady, por todo o suporte dado durante análise no ITOM.

Aos membros da banca de qualificação, Prof. Dr. Christian Kohler e a Profa. Dra. Karoline Moraes pelas avaliações e sugestões durante o exame, contribuindo fortemente na evolução deste trabalho.

À CAPES pelo apoio financeiro concedido durante o desenvolvimento dessa pesquisa.

Por fim, a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

CARMO, P. C. **Detecção de danos em Elementos de Concreto por meio de Correlação de Imagens Digitais**. 2020. 174p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Maceió.

A análise de danos em estruturas é um tema de pesquisa muito importante para diversos campos da engenharia, capaz de fornecer informações relevantes frente à integridade estrutural, norteando as decisões relacionadas às ações de intervenção. Diante da necessidade e importância do tema, diversos estudos vêm sendo desenvolvidos com o intuito de conceber técnicas, para auxiliar na quantificação do dano por meio de procedimentos que envolvam atividades laboratoriais. É exatamente nesse aspecto que o presente trabalho se insere. Nesta pesquisa, é estudada a aplicação de uma técnica óptica-numérica, a Correlação de Imagens Digitais (CID), como suporte à aquisição de informações para análise quantitativa de danos, na qual se buscará analisar a integridade estrutural de elementos de concreto por meio da perda de rigidez à flexão. Para a quantificação do dano, as informações obtidas pela CID, por meio de um *software* de código aberto, o *ITOM*, são comparadas com métodos tradicionais de aquisição "*in loco*", como LVDT's (Transdutores de Deslocamento Linear). Para avaliação da perda de rigidez, foram analisadas oito vigas, através do ensaio de flexão, fornecendo assim um ambiente controlado para o emprego desse ensaio não destrutivo. Diante dos resultados obtidos, foi possível verificar o potencial da CID, por meio do *ITOM*, que, mesmo em fase de desenvolvimento e aprimoramento, mostrou-se capaz de quantificar aberturas de fissuras diretamente em imagens e representar campos cinemáticos por meio de mapas de cores gerados a partir de valores nodais, dando suporte para análises de estruturas em Estado Limite Último (ELU) e de Serviço (ELS), apresentando valores de deslocamento com aproximação de até 91,4% entre as técnicas de análise. Além disso, esse estudo chama atenção para importância da definição de um procedimento experimental para o bom funcionamento da CID, uma vez que impactam diretamente nos resultados.

Palavras-chave: *Análise de danos. Correlação de imagens digitais. Concreto reforçado com fibras. Flexão.*

ABSTRACT

CARMO, P. C. **Damage Analysis through Digital Image Correlation in Concrete Elements.** 2020. 174p. Thesis (Master in Civil Engineering) – Civil Engineering Graduate Program, Federal University of Alagoas, Maceió.

Damage structural analysis is an important research topic for several fields of engineering, capable of providing relevant information regarding structural integrity, and of guiding decisions related to intervention actions. Due to the theme's necessity and importance, several studies have been developed to conceive techniques to assist in the quantification of technical testing procedures. The present work is inserted in this aspect. In this research, the application of an optical-numerical technique, the Digital Image Correlation (DIC), is studied to support the acquisition of information for damage analysis, in which, through a static method (the variation of deflection), it seeks to analyze the structural integrity of concrete elements through loss of bending stiffness. The idea is to compare the information obtained by the DIC, using an open source software, *ITOM*, with a traditional acquisition method, LVDT (Linear Displacement Transducers). To evaluate the stiffness loss, eight beams were analyzed through the bending test, providing a controlled environment for the use of this non-destructive test. Considering the results obtained, it was possible to verify the potential of DIC, which was able to quantify crack openings directly in images and to represent kinematic fields through color maps, even in the development and improvement phase. The technique also shows itself useful in providing support for analysis of structures in ultimate limit state (ELU) and service (ELS), presenting displacement values with an approximation of up to 91.4% between the analysis techniques. In addition, this study draws attention to the importance of defining an experimental procedure for proper functioning of DIC, since it directly impacts the results.

Keywords: *Damage analysis. Digital image correlation. Fiber reinforced concrete. Bending.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Estrutura de concreto com uma série de fissuras	18
Figura 1.2 – Número de publicações com o termo restrito “Digital Image Correlation” por ano	21
Figura 1.3 – Fluxograma da pesquisa	23
Figura 2.1 – Métodos não destrutivos para diagnosticar estruturas e componentes de construção	26
Figura 2.2 – Meios para análise visual (Abordagem qualitativa)	26
Figura 2.3 – Inspeção visual com auxílio de drones	27
Figura 2.4 – Diagrama de operação do esclerômetro de reflexão	28
Figura 2.5 – Avaliação de estrutura de concreto com pacômetro	29
Figura 2.6 – Princípio de funcionamento do ultrassom	30
Figura 2.7 – Método ultrassônico convencional	31
Figura 2.8 – Modos de arranjo dos transdutores para ensaio de ultrassom	32
Figura 2.9 – Técnica geral de ensaio radiográfico na indústria	33
Figura 2.10–Ponte Rio-Niterói (à esquerda) e Ponte JK (à direita)	34
Figura 2.11–Aplicação de CID em ensaio de compressão	36
Figura 2.12–Efeito da amostragem e quantização em comparação a imagem contínua captada pelos sensores	39
Figura 2.13–Matriz quadrada de pixels com alvos quadrados	40
Figura 2.14–Condição inicial da matriz quadrada 10 x 10 de pixels com alvos em +	40
Figura 2.15–Condição final da matriz quadrada 10 x 10 de pixels com alvos em +	41
Figura 2.16–Bloco de 6x6 pixels que circunda a região central do sinal de + definindo um padrão de intensidade nas imagens	41
Figura 2.17–Exemplo de discretização das posições e das intensidades dos pixels para rastreamento	43
Figura 3.1 – Distribuição de fibras nos espécimes avaliados no primeiro conjunto	45
Figura 3.2 – Moldes para moldagem de viga: convencional (à esquerda) e dupla camada (à direita)	47
Figura 3.3 – Padrão de superfície das vigas	47
Figura 3.4 – Ensaio de tração à flexão por 3 pontos	48
Figura 3.5 – Ilustração de viga em situação indeformada (linha contínua) e deformada (linha tracejada), com representação da deflexão vertical no centro do vão.	49
Figura 3.6 – Modelo esquemático do dispositivo “YOKE” na viga.	50
Figura 3.7 – Posicionamento dos LVDT’s, onde (a) base magnética, (b) LVDT’s em haste metálica próximo a cantoneira e (c) cantoneira metálica.	51

Figura 3.8 – Área de influência do carregamento no espécime definida como zona de interesse na análise por CID.	51
Figura 3.9 – Curva típica obtida por meio do ensaio EN 14651 (2007) para CRF.	52
Figura 3.10–Ambiente de ensaio.	55
Figura 3.11–Malha gerada pelo ITOM para calibração da câmera.	56
Figura 3.12–Resultado do processo de calibração no ITOM para o primeiro lote, em pixel/mm.	57
Figura 3.13–Interface gráfica do ITOM, aba “ <i>Measurement</i> ”.	58
Figura 3.14–Curva de calibração para o <i>LVDT</i> esquerdo.	58
Figura 3.15–Região de análise e gráfico de tons de cinza por pixel para imagem aos 2000 segundos na viga V2.	60
Figura 3.16–Detalhe da abertura de fissura obtida através da imagem utilizando o ITOM em intervalos diferentes de tempo	61
Figura 3.17–Processo de geração de campos cinemáticos na interface gráfica ITOM . . .	62
Figura 3.18–Vetores de deslocamentos com base nas imagens nos instantes $t_0 = 770$ e $t_1 = 800$	63
Figura 3.19–Mapa de cores de deformação ϵ_{xy} com base nas imagens nos instantes $t_0 = 770$ e $t_1 = 800$	63
Figura 3.20– <i>Boxplot</i>	65
Figura 3.21–Fluxograma do programa experimental.	66
Figura 4.1 – Consistência do CAA na Produção 2	68
Figura 4.2 – Deslocamento em função do tempo total num intervalo de 100 segundos para a viga V1	70
Figura 4.3 – Curvas sobrepostas “tempo x deslocamento” para espécimes monolíticos de CAARFA	71
Figura 4.4 – Curvas sobrepostas “tempo x deslocamento” para espécimes em dupla camada	71
Figura 4.5 – Análise gráfica dos deslocamentos obtidos em função do tempo por meio de <i>LVDT</i> 's e de CID: Viga MON V1	72
Figura 4.6 – Análise gráfica dos deslocamentos obtidos em função do tempo por meio de <i>LVDT</i> 's e de CID: Viga MON V2	72
Figura 4.7 – Análise gráfica dos deslocamentos obtidos em função do tempo por meio de <i>LVDT</i> 's e de CID: Viga MON V3	73
Figura 4.8 – Análise gráfica dos deslocamentos obtidos em função do tempo por meio de <i>LVDT</i> 's e de CID: Viga MON V4	73
Figura 4.9 – Análise gráfica dos deslocamentos obtidos em função do tempo por meio de <i>LVDT</i> 's e de CID: Viga DC V1	74
Figura 4.10–Análise gráfica dos deslocamentos obtidos em função do tempo por meio de <i>LVDT</i> 's e de CID: Viga DC V2	74

Figura 4.11–Análise gráfica dos deslocamentos obtidos em função do tempo por meio de LVDT’s e de CID: Viga DC V3	75
Figura 4.12–Análise gráfica dos deslocamentos obtidos em função do tempo por meio de LVDT’s e de CID: Viga DC V4	75
Figura 4.13–Abertura de fissura medida (linha em azul – linecut) e abertura de boca de fissura (linha em vermelho).	76
Figura 4.14– <i>Boxplot</i> : análise gráfica do erro absoluto.	78
Figura 4.15–Início do processo de fissuração na viga CON-V1 tempos 800 s (à esquerda) e 900 s (à direita).	80
Figura 4.16–Curvas sobrepostas “Carga x Abertura de fissura” para vigas monolíticas. . .	80
Figura 4.17–Curvas sobrepostas “Carga x Abertura de fissura” para vigas em dupla camada.	81
Figura 4.18–Detalhe da cantoneira na Viga V2 em Dupla camada no tempo 800 segundos.	82
Figura 4.19–Análise gráfica dos deslocamentos médios obtidos em função do tempo por meio de LVDT’s e de análise de imagens para as 4 vigas do primeiro grupo.	83
Figura 4.20–Análise gráfica dos deslocamentos médios obtidos em função do tempo por meio de LVDT’s e de análise de imagens para as 4 vigas em dupla camada. .	83
Figura 4.21–Padrão de fissuração: a) Viga V1 CON, b) Viga V3 CON, c) Viga V1 DC e Viga V3 DC	86
Figura 4.22–Correlação entre os deslocamentos obtidos através dos LVDT’s e por análise de imagens para vigas monolíticas.	88
Figura 4.23–Correlação entre os deslocamentos obtidos através dos LVDT’s e por análise de imagens para vigas em dupla camada.	89
Figura 4.24–Curvas momento-curvatura para espécimes monolíticos (constante) e em dupla camada (tracejado).	91
Figura 4.25–Perda de rigidez relativa média para os espécimes monolíticos e em dupla camada.	92
Figura 4.26–Imagens utilizadas para geração dos campos cinemáticos na Viga MON V1.	96
Figura 4.27–Malha gerada pelo <i>ITOM</i> representando deslocamentos nodais em <i>pixels</i> . . .	97
Figura 4.28–Mapa de cores de deslocamentos na direção y: Viga MON V1 – Iteração 1. .	98
Figura 4.29–Mapa de cores de deslocamentos na direção y: Viga MON V1 – Iteração 2. .	98
Figura 4.30–Mapa de cores de deslocamentos na direção y: Viga MON V1 – Iteração 3. .	98
Figura 4.31–Mapa de cores de deslocamentos na direção x: Viga MON V1 – Iteração 1. .	99
Figura 4.32–Mapa de cores de deslocamentos na direção x: Viga MON V1 – Iteração 2. .	99
Figura 4.33–Mapa de cores de deslocamentos na direção x: Viga MON V1 – Iteração 3. .	99
Figura 4.34–Mapas de cores de deformação geradas no <i>ITOM</i> : Viga MON V1	100
Figura 4.35–Mapas de cores de deformação geradas no <i>Origin</i> : Viga MON V1	101
Figura A.1 –Parâmetros de calibração.	114
Figura A.2–Calibração dos LVDT’s para espécimes monolíticos.	115
Figura A.3–Calibração dos LVDT’s para espécimes em dupla camada.	115

Figura B.1 – Iteração 1: Viga MON V1 ($\Delta t_0 = 790$ seg e $\Delta t_1 = 800$) seg.	144
Figura B.2 – Iteração 2: Viga MON V1 ($\Delta t_0 = 790$ seg e $\Delta t_1 = 810$ seg).	145
Figura B.3 – Iteração 3: Viga MON V1 ($\Delta t_0 = 790$ seg e $\Delta t_1 = 820$ seg).	146
Figura B.4 – Iteração 1: Viga MON V2 ($\Delta t_0 = 500$ seg e $\Delta t_1 = 510$ seg).	147
Figura B.5 – Iteração 2: Viga MON V2 ($\Delta t_0 = 500$ seg e $\Delta t_1 = 520$ seg).	148
Figura B.6 – Iteração 3: Viga MON V2 ($\Delta t_0 = 500$ seg e $\Delta t_1 = 530$ seg).	149
Figura B.7 – Iteração 1: Viga MON V3 ($\Delta t_0 = 500$ seg e $\Delta t_1 = 510$ seg).	150
Figura B.8 – Iteração 2: Viga MON V3 ($\Delta t_0 = 500$ seg e $\Delta t_1 = 520$ seg).	151
Figura B.9 – Iteração 3: Viga MON V3 ($\Delta t_0 = 500$ seg e $\Delta t_1 = 530$ seg).	152
Figura B.10 – Iteração 1: Viga MON V4 ($\Delta t_0 = 550$ seg e $\Delta t_1 = 560$ seg).	153
Figura B.11 – Iteração 2: Viga MON V4 ($\Delta t_0 = 550$ seg e $\Delta t_1 = 570$ seg).	154
Figura B.12 – Iteração 3: Viga MON V4 ($\Delta t_0 = 550$ seg e $\Delta t_1 = 580$ seg).	155
Figura B.13 – Iteração 1: Viga DC V1 ($\Delta t_0 = 400$ seg e $\Delta t_1 = 410$ seg).	156
Figura B.14 – Iteração 2: Viga DC V1 ($\Delta t_0 = 400$ seg e $\Delta t_1 = 420$ seg).	157
Figura B.15 – Iteração 3: Viga DC V1 ($\Delta t_0 = 400$ seg e $\Delta t_1 = 430$ seg).	158
Figura B.16 – Iteração 1: Viga DC V2 ($\Delta t_0 = 500$ seg e $\Delta t_1 = 510$ seg).	159
Figura B.17 – Iteração 2: Viga DC V2 ($\Delta t_0 = 500$ seg e $\Delta t_1 = 520$ seg).	160
Figura B.18 – Iteração 3: Viga DC V2 ($\Delta t_0 = 500$ seg e $\Delta t_1 = 530$ seg).	161
Figura B.19 – Iteração 1: Viga DC V3 ($\Delta t_0 = 360$ seg e $\Delta t_1 = 370$ seg).	162
Figura B.20 – Iteração 2: Viga DC V3 ($\Delta t_0 = 360$ seg e $\Delta t_1 = 380$ seg).	163
Figura B.21 – Iteração 3: Viga DC V3 ($\Delta t_0 = 360$ seg e $\Delta t_1 = 390$ seg).	164
Figura B.22 – Iteração 1: Viga DC V4 ($\Delta t_0 = 430$ seg e $\Delta t_1 = 440$ seg).	165
Figura B.23 – Iteração 2: Viga DC V4 ($\Delta t_0 = 430$ seg e $\Delta t_1 = 450$ seg).	166
Figura B.24 – Iteração 3: Viga DC V4 ($\Delta t_0 = 430$ seg e $\Delta t_1 = 460$ seg).	167
Figura A.1 – Viga biapoiada sob carregamento transversal F (ensaio de flexão em três pontos).	170
Figura A.2 – Diagramas de corpo livre e equações de momento para situações de análise.	171
Figura A.3 – Ilustração de viga fletida com variáveis para obtenção da estimativa da curvatura.	173
Figura A.4 – Carregamentos impostos aos espécimes durante o ensaio de flexão: (a) três pontos e (b) quatro pontos.	174

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Consumo de materiais por m ³ - C30.	46
Tabela 3.2 – Valores do coeficiente k_x de acordo com o número de amostras n.	53
Tabela 3.3 – Classes de resistências residuais $f_{R,3k}/f_{R,1k}$, obtidas pelo ensaio EN 14651 (2007).	53
Tabela 3.4 – Especificações da câmera.	54
Tabela 4.1 – Resultados da caracterização em estado fresco dos concretos.	68
Tabela 4.2 – Resistência aos 28 dias para os espécimes, em MPa.	69
Tabela 4.3 – Diferença percentual entre LVDT's e Imagem para espécimes monolíticos, unidades em %.	77
Tabela 4.4 – Diferença percentual entre LVDT's e Imagem para espécimes em dupla camada, unidades em %.	77
Tabela 4.5 – Resumo descritivo: análise do boxplot, unidades em %.	78
Tabela 4.6 – Tempo e carga estimados para o início do processo de fissuração.	82
Tabela 4.7 – Resultados obtidos com as curvas carga por abertura de fissura, segundo a EN 14651:2007.	85
Tabela 4.8 – Comparativo entre parâmetros de resistência.	85
Tabela 4.9 – Tenacidade (kN.mm) nos espécimes até os 4 mm de abertura de fissura.	86
Tabela 4.10–Resumo da análise via regressão linear.	90
Tabela 4.11–Estimativa de rigidez ($kN.m^2$) para espécimes monolíticos.	93
Tabela 4.12–Estimativa de rigidez ($kN.m^2$) para espécimes em dupla camada.	93
Tabela 4.13–Verificação de normalidade com o teste de Shapiro-Wilk para Viga MON V1.	94
Tabela 4.14–Valores calculados e críticos (Tabelados) para testes F e T , na Viga MON V1.	94
Tabela 4.15–Verificação de normalidade com o teste de Shapiro-Wilk.	94
Tabela 4.16–Valores calculados e críticos (Tabelados) para testes F e T	95
Tabela 4.17–Valores máximos de estimativa de rigidez ($kN.m^2$).	95
Tabela A.1 – Resumo da análise dos LVDT's via regressão linear.	114
Tabela B.1 – Viga MON V1	116
Tabela B.2 – Viga MON V2	119
Tabela B.3 – Viga MON V3	122
Tabela B.4 – Viga MON V4	126
Tabela B.5 – Viga DC V1	129
Tabela B.6 – Viga DC V2	133
Tabela B.7 – Viga DC V3	136
Tabela B.8 – Viga DC V4	139

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
C30	Concreto com resistência média à compressão de 30 MPa
CAA	Concreto Autoadensável
CAARFA	Concreto Autoadensável Reforçado com Fibras de Aço
CDI	Correlação Digital de Imagens
CMOD	<i>Crack Mouth Opening Displacement</i>
CRF	Concreto Reforçado com Fibras
CV	Coefficiente de variação
DC	Dupla Camada
DIC	<i>Digital Image Correlation</i>
ELS	Estado Limite de Serviço
ELU	Estado Limite Último
EN	<i>European Norma</i>
END	Ensaio Não Destrutivo
LEMA	Laboratório de Estruturas e Materiais
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
MON	Monolítica

LISTA DE SÍMBOLOS

F_j	Carga correspondente à abertura de fissura j ;
F_L	Carga máxima de ensaio no intervalo de abertura de fissura de 0 a 0,05 mm;
k_x	Coefficiente dependente do número de amostras do ensaio;
δ	Deslocamento axial;
sp	Desvio padrão;
h_{sp}	Distância entre o topo do entalhe e a face superior do corpo de prova;
b	Largura do corpo de prova;
f_{ctk}	Resistência característica a flexão;
LOP	Resistência definida como Limite de Proporcionalidade, obtida por F_L ;
f_{ctm}	Resistência média a flexão;
$f_{R,j}$	Resistência residual à flexão correspondente à abertura de fissura j ;
LOP_k	Valor característico de resistência correspondente ao LOP;
l	Vão de ensaio.

SUMÁRIO

1	Introdução	17
1.1	Comentários iniciais	17
1.2	Objetivos	20
1.2.1	Objetivo geral	20
1.2.2	Objetivos específicos	20
1.3	Justificativa	20
1.4	Delimitações do trabalho	22
1.5	Organização do texto	22
2	Referencial teórico	24
2.1	Conceito de dano	24
2.2	Técnicas para análise de danos em elementos de concreto	24
2.3	Ensaio não destrutivo	25
2.3.1	Inspeção visual	26
2.3.2	Esclerometria – Método de dureza superficial	27
2.3.3	Pacometria – Detecção eletromagnética do posicionamento da armadura e avaliação do cobrimento	28
2.3.4	Ultrassom	29
2.3.5	Radiografia	32
2.3.6	Métodos dinâmicos	33
2.3.7	Métodos estáticos	34
2.3.8	Correlação de Imagens Digitais - CID	35
2.3.8.1	Princípio de funcionamento	37
2.3.8.2	Fatores de influência no processo de CID	43
3	Procedimento experimental	45
3.1	Preparação das amostras	46
3.2	Determinação do dano com auxílio da CID	48
3.2.1	Calibração dos equipamentos	55
3.2.1.1	Câmera	55
3.2.1.2	LVDT's	57
3.2.2	Análise das imagens	59
3.3	Análise estatística dos resultados	64
4	Resultados e discussões	67
4.1	Concreto	67
4.1.1	Caracterização dos concretos em estado fresco	67
4.1.2	Caracterização mecânica dos concretos	68
4.2	Deslocamentos e Fissuração	70

4.2.1	Deslocamentos	70
4.2.2	Fissuração	79
4.2.3	Acurácia das medições de deslocamentos	87
4.3	Rigidez à flexão	90
4.3.1	Campos cinemáticos	95
5	Considerações finais	102
5.1	Recomendações para trabalhos futuros	104
 Referências		 106
 Apêndices		 113
APÊNDICE A Dados Calibração		114
A.1	Fator de magnificação	114
A.2	Curvas de calibração dos LVDT's	114
APÊNDICE B Campos cinemáticos: deslocamentos		116
B.1	Valores nodais: deslocamentos	116
B.2	Imagens	143
 Anexos		 168
ANEXO A Modelo teórico-analítico para estimativa da rigidez		169
A.1	Ensaio de flexão em três pontos	170

1 INTRODUÇÃO

1.1 COMENTÁRIOS INICIAIS

Estruturas, durante toda sua vida útil, estão sujeitas aos mais variados tipos de solicitações (fenômenos naturais, intervenção humana, carregamento estático ou dinâmico, etc.), que certamente, quando combinadas aos problemas de degradação podem causar danos, comprometendo seu funcionamento e até mesmo trazendo risco de colapso.

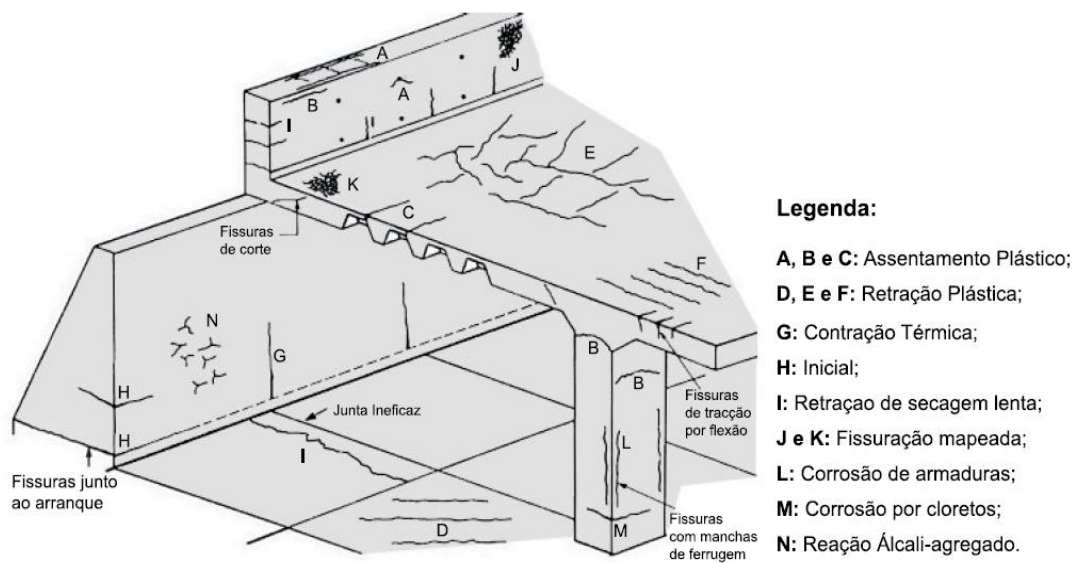
Farrar e Worden (2013) explicam que danos estruturais podem ser definidos como alterações que são introduzidas num sistema, de maneira intencional ou não, mas que de certa forma acabam comprometendo seu desempenho atual ou futuro. Carvalho (2015a) aponta que implícito a este conceito está o de que dano não tem significado sem uma análise comparativa entre dois estágios, um de referência, que normalmente representa a estrutura não danificada, e o outro danificado, ou com uma intensidade de dano maior que o sistema referencial adotado, podendo a estrutura danificada ser representada por um desgaste natural ou após alteração de integridade de maneira induzida para fins experimentais.

Quando presentes em sistemas estruturais, os danos acabam apresentando alguns fatores negativos como a diminuição da rigidez, em função, por exemplo do surgimento de fissuras que podem ocasionar uma redução significativa do momento de inércia da seção, sem contar no desconforto visual. Além disso, esses danos estão diretamente relacionados a atividades de manutenção e reparo de estruturas e acabam sendo associados a um certo custo, principalmente quando negligenciados. Em último caso, dependendo de sua intensidade, os danos podem levar a estrutura ao colapso, gerando prejuízos não só financeiros como também com a perda de vidas. Logo, deve-se considerar o dano como um sinal de alerta que a estrutura fornece para que alguma atividade de intervenção venha a ser tomada.

A Figura 1.1 apresenta uma estrutura de concreto com um tipo comum de dano, as fissuras. Essas fissuras, conforme apresentado, podem advir de diferentes condições e efeitos. Coiás (2009) aponta que algumas dessas fissuras são tidas como características e, assim, mais “fáceis” de serem identificadas, a exemplo de fissuras devido à tração por flexão, corrosão das armaduras e por retração. Não obstante a isso, o autor ressalta o quanto é desafiador trabalhar com monitoramento de estruturas, principalmente quando se leva em consideração a combinação de efeitos.

A análise de danos em estruturas fornece informações relevantes sobre sua integridade estrutural, norteadas as decisões relacionadas à necessidade de reparos e reforços. Hala e Schabowicz (2010) explicam que, na análise experimental, os testes empregados para detecção de danos podem ser classificados de acordo com a integridade dos espécimes e/ou região analisada

Figura 1.1 – Estrutura de concreto com uma série de fissuras



Fonte: Coiás, 2009.

em destrutivos, semi-destrutivos e não destrutivos. Como a ideia é analisar um determinado dano, não é atrativo gerar novos danos à estrutura durante seu monitoramento, logo os Ensaios Não Destrutivos (END) são tidos como os métodos ideais para detecção de danos. Além disso, os autores ainda enfatizam que os métodos não destrutivos possibilitam a repetição dos ensaios ao longo da vida útil da estrutura, promovendo uma melhor logística para monitoramento de integridade estrutural.

Uma das primeiras técnicas não destrutivas utilizadas para análise de danos é a inspeção visual, a qual, por meio de indicadores de danificação, classifica o estado de conservação de determinada estrutura, recomendando ou não uma possível intervenção. Segundo Oliveira (2013), apesar de ainda ser uma técnica bastante empregada, a inspeção visual atua em uma abordagem completamente qualitativa, condicionada à experiência do avaliador e, muitas vezes, deixando passarem despercebidos danos internos ou pequenos, como microfissuras, e assim é tida muitas vezes como uma técnica subjetiva. Garantir que esses danos sejam identificados na fase inicial é um dos objetivos da detecção de danos, evitando o desenvolvimento de problemas estruturais e servindo de apoio para ações emergenciais.

Abreu (2012) ressalta que no Brasil é bem comum manutenções não seguirem as recomendações das normatizações, como preconizado por exemplo nas normas ABNT NBR 5674 (2012) e ABNT NBR 6118 (2014), fazendo com que o dano só gera preocupação quando visível, necessitando assim de uma intervenção corretiva. Logo, a abordagem qualitativa através da análise visual é entendida, de certa forma, como uma pré-etapa ao processo de quantificação de danos.

O desenvolvimento de métodos baseados em abordagem não destrutiva para avaliação de

elementos de concreto melhorou a possibilidade de investigar grandes áreas mais rapidamente e dar mais conhecimento frente à integridade estrutural de determinado elemento. Schabowicz (2019) explica que dentre os métodos não destrutivos utilizados, podem-se citar técnicas já consolidadas como o ultrassom, raio-x, métodos de campo magnético, térmico e elétrico, entre outros. No entanto, para realizar boa parte desses testes é preciso saber previamente onde está o dano, trazendo assim uma abordagem local.

Cawley e Adams (1979) apontam que, para contornar esse problema, análises baseadas em parâmetros modais como frequências naturais e modos de vibração foram utilizadas para avaliação de integridade estrutural, surgindo assim os métodos dinâmicos. À medida que o dano vai se agravando, as características dinâmicas da estrutura também se alteram. Por meio do comparativo entre estrutura de referência, seja ela danificada ou não, e estrutura danificada, ou com maior dano, é possível conseguir informações relevantes do processo de danificação.

Por ser um método que permite a detecção de danos por meio de uma abordagem global da estrutura, os métodos dinâmicos são bastante empregados no campo de monitoramento estrutural, porém a análise baseada em parâmetros dinâmicos apresenta algumas desvantagens. Koh e Dyke (2007) ressaltam que os dados modais muitas vezes são incompletos e pouco precisos, devido a problemas como erros de modelação, ruídos nas medições, entre outros. Além disso, os autores apontam que a instrumentação é bastante cara quando comparada às demais técnicas, sem contar que necessita de diversas leituras para varrer toda a estrutura.

Tendo em vista as limitações acima, os métodos estáticos são uma via para análise de danos em estruturas. Segundo Wang *et al.* (2001), os métodos estáticos permitem a análise de danos pela medição de mudanças na resposta estrutural estática, sendo os parâmetros de controle normalmente deslocamentos e deformações, que podem ser quantificados de maneira rápida e mais econômica.

Carvalho (2015a) resalta que dentre os métodos estáticos, um bastante empregado é a utilização da variação da deflexão de vigas como indicador de dano, que apresenta modelos teórico-analíticos bastante consolidados para encontrar a rigidez em função dos valores de flecha, comprimento do vão e para situações de carregamentos.

No entanto, um dos problemas constatados tanto nos métodos estáticos como nos dinâmicos é a necessidade de acesso à estrutura para instalação da instrumentação. Visando contornar essa situação, por meio da análise experimental, diversos estudos vêm sendo desenvolvidos com o intuito de conceber técnicas sem contato para auxiliar na quantificação de danos através de procedimentos técnicos. É exatamente nesse aspecto que o presente trabalho se insere.

Nessa pesquisa é estudada a aplicação de um método óptico-numérico, a Correlação de Imagens Digitais (CID ou, em inglês, DIC), como suporte à aquisição de informações para análise de danos, em que através de um método estático (a variação da deflexão), analisará a integridade estrutural de elementos de concreto por meio da perda de rigidez devido a fissuras de

flexão. A meta é que as informações cinemáticas obtidas pela CID, como deslocamentos, sejam comparadas com os métodos tradicionais de aquisição *in loco*, como LVDT's.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral desse trabalho consiste em estudar um procedimento experimental para detecção de danos em vigas de concreto sobre flexão, baseado na perda de rigidez, a partir da Correlação de Imagens Digitais.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) Apresentar um modelo teórico-analítico, consolidado na literatura, para verificação da perda de rigidez em função da deflexão;
- b) Aplicar um procedimento experimental para aquisição de imagens que permita avaliar a perda de rigidez à flexão em elementos de concreto;
- c) Realizar um estudo comparativo a partir das informações mensuradas por meio da CID e de metodologias convencionais;
- d) Analisar estatisticamente a eficiência dos resultados obtidos.

1.3 JUSTIFICATIVA

A maioria das técnicas para análise de danos necessita de acesso à estrutura para instalação da instrumentação. A priori, a inspeção visual pode contornar esse impasse. No entanto, como aponta Oliveira (2013), essa é uma técnica bastante subjetiva, já que atua em uma abordagem completamente qualitativa, condicionada à experiência do avaliador e muitas vezes deixando passarem despercebidos danos internos ou pequenos, como, por exemplo, microfissuras.

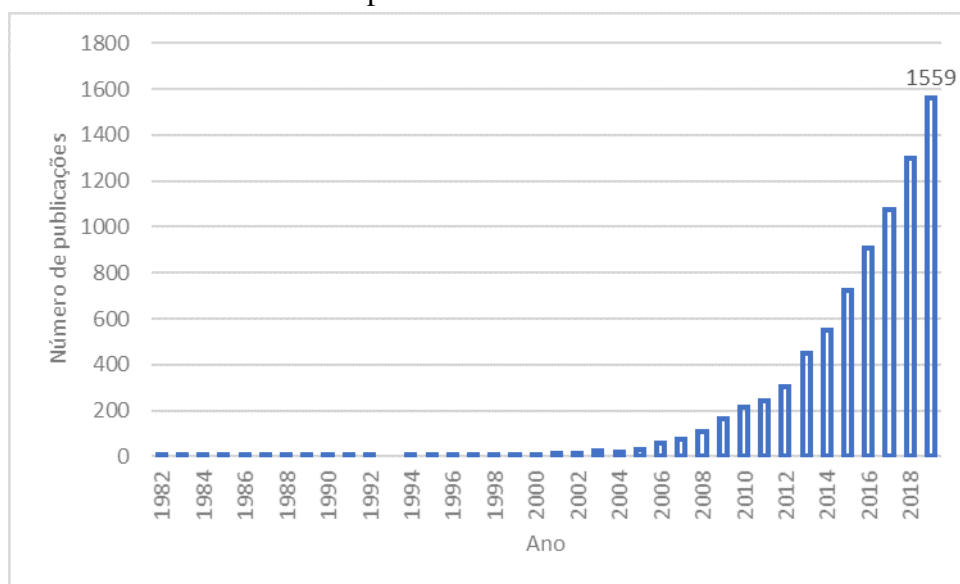
Este estudo propõe a aplicação de uma técnica óptica-numérica, a Correlação de Imagens Digitais, como suporte à aquisição de informações num procedimento estático de análise de danos. Sutton, Orteu e Schreier (2009) descrevem que esta técnica primeiro adquire imagens digitais de um objeto em estágios diferentes durante a execução de determinado procedimento experimental, por meio de câmeras digitais, e em seguida são empregadas técnicas de rastreamento e registro de mudanças de imagens superficiais, baseadas em padrões de texturas naturais ou artificiais, como portadores de informação, para medições precisas de campos cinemáticos, deslocamentos e deformações.

Conforme explica Ferraz (2013), no quesito instrumentação, a CID apresenta bastante vantagens quando comparada com outros métodos tradicionais para avaliação de deslocamentos,

já que necessita tecnicamente de uma câmera para aquisição de imagens e um computador contendo um *software* que permita a análise dos dados. Além disso, o autor ressalta que essa técnica pode ser uma boa alternativa para elementos com difícil acesso para instalação da instrumentação convencional ou quando não existe uma ferramenta adequada para a obtenção de determinados tipos de dados. No geral, são equipamentos que podem ser reaproveitados e que não foram projetados apenas para essa aplicação, o que pode proporcionar um benefício econômico quando comparado a outras técnicas.

Desenvolvida na década de 70, a CID é uma técnica que já está bastante consolidada no campo da mecânica experimental, sendo empregada em diversos ramos da engenharia nos quais se busca a medição de campos cinemáticos como em componentes estruturais e até mesmo em tecidos biológicos. A Figura 1.2 apresenta um gráfico do número de “artigos publicados” que contêm o termo restrito “*Digital Image Correlation*”, registrados na base de dados “*Science Direct*” por ano, desde o ano de desenvolvimento da técnica até 2019, enfatizando assim a consolidação deste procedimento a partir dos anos 2000 em virtude principalmente dos aprimoramentos dados às câmeras, aos computadores e às técnicas de processamento de imagens, conforme apontam Pan *et al.* (2009b).

Figura 1.2 – Número de publicações com o termo restrito “Digital Image Correlation” por ano



Fonte: Adaptado de Science Direct, 2020.

Além de propor uma metodologia para análise de danos em elementos de concreto por meio de uma técnica não destrutiva e sem contato, esta pesquisa busca dar continuidade aos estudos que vêm sendo desenvolvidos nos últimos anos na área de Estruturas e Materiais do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil desta Universidade, a exemplo dos trabalhos de Ferraz (2013), Carvalho (2015a) e Várady Filho (2016), e dos trabalhos de iniciação científica, a exemplo do desenvolvido por Oliveira (2019).

1.4 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO

A análise da integridade estrutural será feita por um procedimento estático baseado na verificação da rigidez em função da variação da deflexão, conforme formulações estabelecidas no Anexo A. O diferencial deste trabalho será a forma de aquisição de dados, utilizando-se uma técnica sem contato, e, portanto, não destrutiva, a CID.

O elemento estrutural escolhido para análise são vigas de Concreto Reforçado com Fibras (CRF) submetidas à esforços de flexão. Optou-se pela utilização das fibras pois já se tornaram bastante difundidas e estudadas em todo o mundo. Neville e Brooks (2013) explicam que o uso de fibras como reforço na matriz cimentícia proporciona um aumento da resistência à tração pelo retardo da propagação de fissuras e pelo aumento da tenacidade pela transmissão de tensões através de uma seção fissurada, de modo que seja possível uma deformação muito maior após a tensão de pico do que sem o reforço com fibras. Além de todas essas vantagens técnicas, Figueiredo (2011) ressalta que há também vantagens econômicas, como a redução de etapas no processo produtivo e de mão de obra, assegurando maior produtividade ao processo. Porém, no Brasil devido à carência de um código ou norma que norteie os engenheiros e demais profissionais envolvidos quanto ao dimensionamento em componentes com fibras, sua aplicabilidade é mais limitada à pavimentos e concreto projetado, o que motiva estudos nessa área.

A análise da perda da rigidez será verificada em espécimes de CRF desenvolvidos por Oliveira (2019) e Freitas *et al.* (2019). Na configuração adotada por Oliveira (2019) as vigas possuem fibras de aço distribuídas, de maneira aleatória, ao longo de todos os espécimes. Já Freitas *et al.* (2019) adotaram elementos estruturais em dupla camada de concreto, os quais, segundo o autor, chegam como uma solução para maximizar os benefícios existentes no CRFA, utilizando reforço somente em regiões que demandam maiores esforços estruturais com a pós-fissuração, já na região com menor demanda é utilizado o concreto convencional.

Será empregado o ensaio de flexão em três pontos para análise da perda de rigidez nos espécimes, seguindo as recomendações da norma EN 14651 (2007). Com isso, as vigas terão a indução de deslocamentos devido à variação de carga, gerando assim um ambiente controlado para monitoramento do dano, sendo este assistido por meio de CID.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Sendo este o primeiro capítulo, apresentou-se uma breve contextualização do problema, descrevendo objetivos, justificativa e delimitações do trabalho. Os conteúdos do segundo ao quinto capítulo são descritos a seguir.

O Capítulo 2 apresenta um referencial teórico com os principais tópicos do trabalho, como técnicas para análise de danos em elementos de concreto, baseadas em abordagens qualitativas e quantitativas, e ensaios não destrutivos. São discutidas brevemente as principais técnicas adotadas

usualmente para tal estudo. Em seguida, de maneira mais detalhada, é abordado num subtópico a técnica utilizada nesta pesquisa, a Correlação de Imagens Digitais.

O Capítulo 3 descreve o procedimento experimental empregado para análise dos espécimes, especificando materiais empregados, instrumentação, ensaios e roteiro seguido.

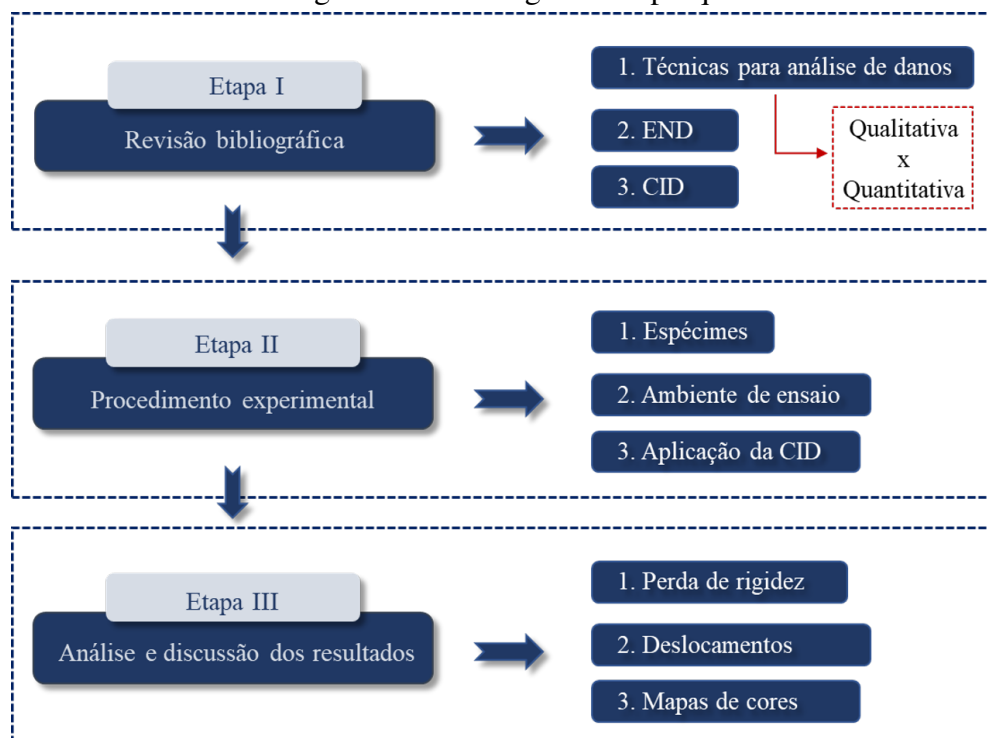
O Capítulo 4 apresenta os resultados e discussões das análises realizadas durante o procedimento experimental, tendo como foco a análise da perda de rigidez à flexão dos elementos prismáticos, deslocamentos e mapas de calor dos campos cinemáticos (deslocamentos e deformações).

Já no Capítulo 5 são discutidas algumas considerações finais obtidas por meio dessa pesquisa, além de serem apresentadas algumas sugestões para o desenvolvimento de novos estudos, a partir das análises verificadas.

Por fim são apresentados apêndices e anexos. No Anexo A, consta um modelo teórico analítico para estimar a variação da rigidez em função das variáveis: carga de aplicação, vão do elemento prismático e deflexão no ponto de atuação da carga transversal. Nos apêndices, são apresentados resultados experimentais como por exemplo os gerados pelos procedimentos de calibração dos LVDT's e da Câmera. Além disso, são apresentadas as imagens empregadas para avaliação das iterações.

Buscando alcançar os objetivos propostos, a Figura 1.3 apresenta um fluxograma com a metodologia estabelecida neste trabalho.

Figura 1.3 – Fluxograma da pesquisa



Fonte: Autor, 2020.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CONCEITO DE DANO

De maneira geral, o dano pode ser definido como qualquer alteração introduzida em uma estrutura que afeta negativamente seu desempenho atual ou futuro. Essa alteração pode-se dar devido aos diversos tipos de carregamento a que a estrutura está sujeita, os quais, associados aos fenômenos como corrosão, ataques químicos e carbonatação, por exemplo, podem produzir diferentes tipos de danos à estrutura (SOHN *et al.*, 2004).

Analogamente, Worden e Dulieu-Barton (2004) explicam que os danos estruturais podem ser caracterizados como mudanças nas propriedades físicas ou geométricas de uma estrutura em níveis que alteram as suas condições iniciais de projeto, mas que ainda permitem a esta desempenhar função para a qual foi projetada.

Os danos, quando presentes, diminuem a resistência da estrutura, causam desconforto ao usuário com o estado de formação de fissuras, conforme explica a ABNT NBR 6118 (2014) e, em alguns casos, quando negligenciados, podem levar a estrutura ao colapso. Com isso, Silva (2015) explica que, nos últimos anos, a análise de danos em estruturas apresentou um desenvolvimento progressivo, visto que pode reduzir enormes prejuízos tanto de vidas humanas quanto de perdas materiais, já que esse processo fornece subsídios para que ações corretivas possam ser tomadas com antecedência.

Conforme Alves (2012) explica, analisar danos em sistemas estruturais, de maneira direta, é uma tarefa complexa, já que várias razões podem explicar uma anomalia em uma estrutura. Esse autor informa que as aparições de danos estruturais podem estar relacionadas às modificações da capacidade de resistência das estruturas devido à degradação de seus materiais constitutivos (por exemplo, corrosão, fissuras, etc.) ou então, às diferentes solicitações às quais a estrutura pode ser submetida. O tópico a seguir apresentará algumas técnicas para análise de danos em elementos de concreto.

2.2 TÉCNICAS PARA ANÁLISE DE DANOS EM ELEMENTOS DE CONCRETO

Quando se fala em análise de danos, os testes empregados para este fim são classificados de acordo com a integridade do espécime averiguado em: destrutivos, semi-destrutivos e não destrutivos. Os testes destrutivos são pouco empregados para análise de danos, uma vez que os próprios já causam danos à estrutura. Já os semi-destrutivos, que necessitam somente de uma pequena prospecção intrusiva do material, ocasionando dano apenas no local da intrusão, são geralmente empregados para identificação de causa e risco de corrosão. Como a ideia é analisar

um determinado dano, não é atrativo gerar novos danos à estrutura durante seu monitoramento, logo, os ensaios não destrutivos são os métodos clássicos para esta área de estudo (HOLA; SCHABOWICZ, 2010).

2.3 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

Conforme Smith (1996) explica, os END's são métodos de avaliação praticados sobre qualquer material ou peça sem alterar de forma permanente suas propriedades físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais. Para Helal, Sofi e Mendis (2015), o objetivo geral dos END's é determinar a qualidade e a integridade dos materiais e componentes de um elemento estrutural, sem produzir danos ou afetar sua condição de serviço. Através desse monitoramento pode-se elevar a vida útil das referidas estruturas, tornando mais fácil e econômico o seu tratamento e a sua recuperação.

Os END's quando aplicados em estruturas de concreto fornecem informações importantes como tamanho, profundidade, localização e estado da armadura, além de condições físicas e parâmetros que estão associados aos processos de deterioração ou risco de danos à estrutura. No quesito desempenho estrutural, o ACI 228.2R (1998) considera que os END's normalmente são aplicados por quatro razões principais:

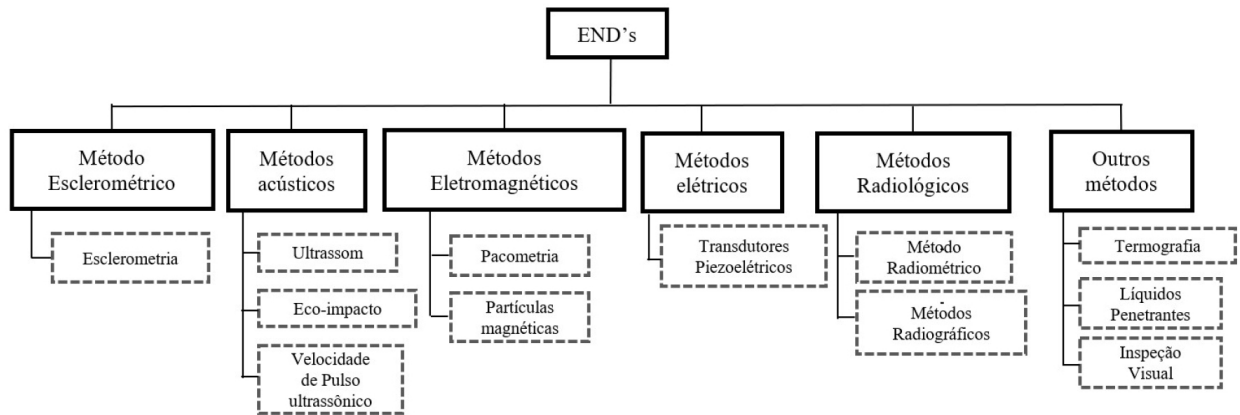
- a) Controle de qualidade em novas construções;
- b) Solução de problemas em novas construções;
- c) Avaliar a condição de estruturas de concreto antigas para reabilitação;
- d) Confirmação de reparos em estrutura de concreto.

Shull (2016) ressalta que, para a correta escolha de um END, é necessário levar em consideração as propriedades dos materiais envolvidos, possíveis discontinuidades, os processos físicos que governam os métodos de ensaio, o potencial e limitações tecnológicas disponíveis, além de fatores econômicos, ambientais e regulatórios.

São inúmeros os END's, sendo que alguns podem ser empregados durante a construção da estrutura e outros após a sua conclusão. Valluzzi *et al.* (2020) comentam que esses testes vão desde uma inspeção visual para detecção de fissuras e trincas em estruturas até a realização de radiografia para confirmar a existência de vazios e/ou discontinuidades em elementos pré-fabricados. A Figura 2.1 lista os principais ensaios não destrutivos empregados para avaliação de estruturas e componentes da construção civil.

Kumar e Santhanam (2020) explicam que os END's normalmente são empregados em conjunto com os ensaios destrutivos, correlacionando assim as informações para um maior controle da estrutura. A seguir, serão apresentados brevemente alguns dos END's mais empregados para análise de danos em elementos de concreto. Em seguida, será explicado mais detalhadamente o END empregado nesta pesquisa, a CID.

Figura 2.1 – Métodos não destrutivos para diagnosticar estruturas e componentes de construção



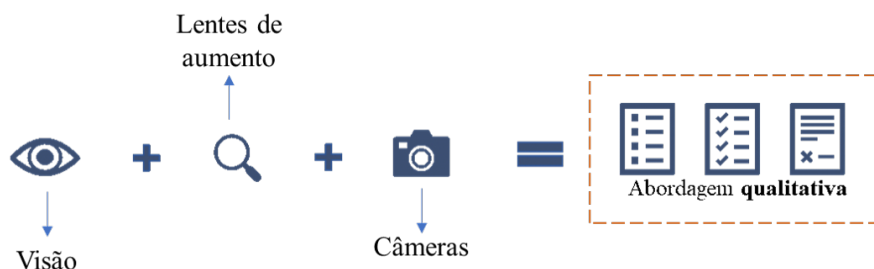
Fonte: Adaptado de Schabowicz (2019).

2.3.1 Inspeção visual

Normalmente, quando há dúvidas a respeito da integridade estrutural, o primeiro procedimento adotado é a inspeção visual, a qual por meio de indicadores de danificação classifica o estado de conservação de determinada estrutura, recomendando ou não uma possível intervenção (OLIVEIRA, 2013).

Como o próprio nome sugere, o principal recurso nessa análise é a visão, que pode ser auxiliada por meio de lentes de aumento, ou até mesmo de câmeras de alta resolução, de acordo com a estrutura inspecionada (ver Figura 2.2). Lourenço (2012) enfatiza que como o campo de análise, nesta técnica, é apenas o visual, fatores como luminosidade, acesso à estrutura e condições de equipamentos, quando empregadas câmeras, por exemplo, podem condicionar a avaliação.

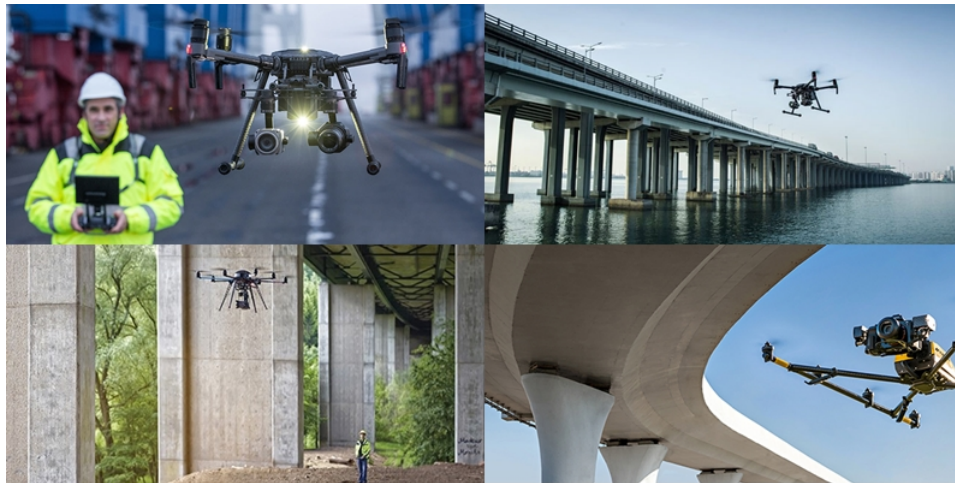
Figura 2.2 – Meios para análise visual (Abordagem qualitativa)



Fonte: Autor, 2020.

Inspecionar visualmente grandes estruturas demanda bastante tempo e atenção. Buscando contornar esse problema, drones com câmeras acopladas estão sendo utilizadas para aquisição de dados, dando assim suporte à integridade de estruturas como pontes, viadutos, barragens, dentre outros, conforme apresentam Agostinho (2012), Brito (2014) e Haack (2015) (ver Figura 2.3).

Figura 2.3 – Inspeção visual com auxílio de drones



Fonte: Adaptado de Topcon Solutions Store, 2019.

Oliveira (2013) explica que apesar de ainda ser uma técnica bastante empregada e de ter recebido avanços significativos com a inserção de drones, os quais proporcionam ganhos tanto no quesito área de análise, como tempo e acesso, a mesma é muito subjetiva, já que atua numa abordagem completamente qualitativa, condicionada à experiência do avaliador e muitas vezes deixando passarem despercebidos danos internos ou pequenos, como microfissuras.

Speight (1980) ressalta que normalmente as manutenções periódicas não são seguidas como recomendam as normatizações e o dano só gera preocupação quando visível, podendo transformar-se em um risco potencial. Logo, a análise visual de certa forma está inerente ao processo de detecção de danos, conforme aponta a ABNT NBR 9452 (2019).

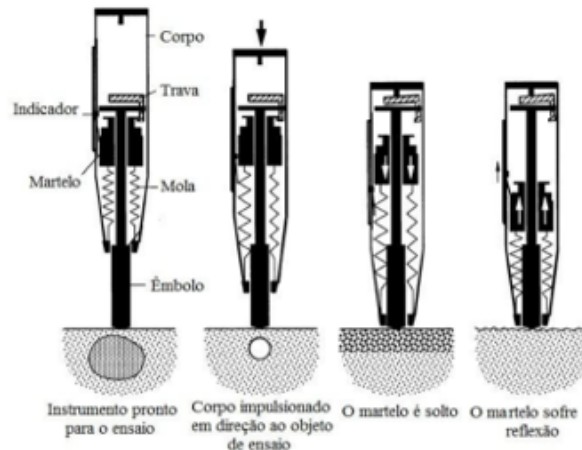
Diante da necessidade de avaliar as condições da estrutura no sentido de localizar e quantificar a intensidade do dano, outras técnicas não destrutivas foram desenvolvidas. A seguir, serão apresentadas algumas das mais consolidadas.

2.3.2 Esclerometria – Método de dureza superficial

De acordo com Malhotra (2003), a esclerometria é uma técnica não destrutiva empregada em estruturas de concreto para verificar uniformidade e estimar a resistência pela dureza superficial. No Brasil, esse ensaio é prescrito pela ABNT NBR 7584 (2012), e nos EUA padronizado pela ASTM C805 (2018).

Mehta e Monteiro (2014) explicam que o procedimento experimental deste método consiste no emprego de um martelo controlado por uma mola que desliza por um pistão. O operador exerce um esforço sobre o pistão contrário à estrutura, ele reage contra a força da mola; e quando completamente estendida a mola é automaticamente liberada. Em seguida, o martelo choca no êmbolo que atua contra a superfície do concreto e a massa controlada pela mola recua, deslizando com um ponteiro de arraste ao longo de uma escala guia que é usada para indicar o valor da reflexão do martelo. A Figura 2.4 representa o procedimento descrito acima.

Figura 2.4 – Diagrama de operação do esclerômetro de reflexão



Fonte: Adaptada de ACI 228.1R-03, 2003.

Conforme aponta a normatização brasileira, o índice esclerométrico fornecido pelo aparelho é utilizado para estimar a resistência do concreto através de tabela e curvas fornecidas pelo fabricante. Além disso, pode-se estimar a resistência em duas áreas e realizar comparações para constatar a uniformidade da resistência do concreto à compressão na estrutura.

Ebensperger e Donoso (2019) ressaltam que o ensaio de esclerometria requer certa habilidade do operador com relação ao manuseio do equipamento e escolha dos pontos onde serão realizados os impactos, devido ao fato de o aparelho ser sensível às variações do concreto. Se o choque ocorrer sobre uma superfície com armadura, um elemento inerte, ou até mesmo um agregado, o índice esclerométrico será elevado. Por outro lado, se o choque ocorrer em cima de um vazio, o índice será baixo. Por isso, é conveniente escolher pontos pouco armados e sem vazios, além de fazer para cada área de ensaio uma série de no mínimo 9 e no máximo 16 impactos, sendo o índice a média das determinações, de acordo com a normatização brasileira.

Além das limitações, devido à sensibilidade do método, como exposto acima, Aydın e Saribiyik (2010), informam que o ensaio de esclerometria em estruturas muito antigas apresenta consideráveis variações, o que dificulta uma boa avaliação devido à possível degradação do concreto. Vecca e Lucero (2010) ressaltam que a presença de armaduras pode gerar erros de leitura de até 10% dependendo do diâmetro e do recobrimento de concreto adotado. Apesar de todas essas limitações, a análise de estruturas de concreto por esclerometria é bastante empregada devido à sua simplicidade executiva e viabilidade econômica.

2.3.3 Pacometria – Detecção eletromagnética do posicionamento da armadura e avaliação do cobrimento

De acordo com Santos (2008), a pacometria é um método eletromagnético empregado em estruturas de concreto para localização de armaduras e determinação da espessura do cobrimento. O princípio de funcionamento deste ensaio consiste na geração de um campo eletromagnético

que, em contato com um objeto metálico, tem suas linhas de força distorcidas. Essa perturbação causada pelo objeto metálico é detectada pelo aparelho. A Figura 2.5 apresenta a inspeção de uma estrutura de concreto por meio do ensaio de pacometria.

Figura 2.5 – Avaliação de estrutura de concreto com pacômetro



Fonte: Ad Fiducia Ltda, 2019.

Por não haver normatização nacional, os procedimentos aplicados ao ensaio de pacometria devem seguir as orientações de normas internacionais como a BS 1881: Part 204 (1988) e a ACI 228.2R (1998). Andrade (2017) ressalta que as medições podem ser afetadas por fatores como a presença de diferentes tipos de aço na estrutura, cruzamentos e densidades elevadas de barras na área levantada, presença de arames, pregos ou outros elementos metálicos próximos à superfície do elemento. Além disso, esse procedimento apresenta medições eficientes até a profundidade de sete centímetros.

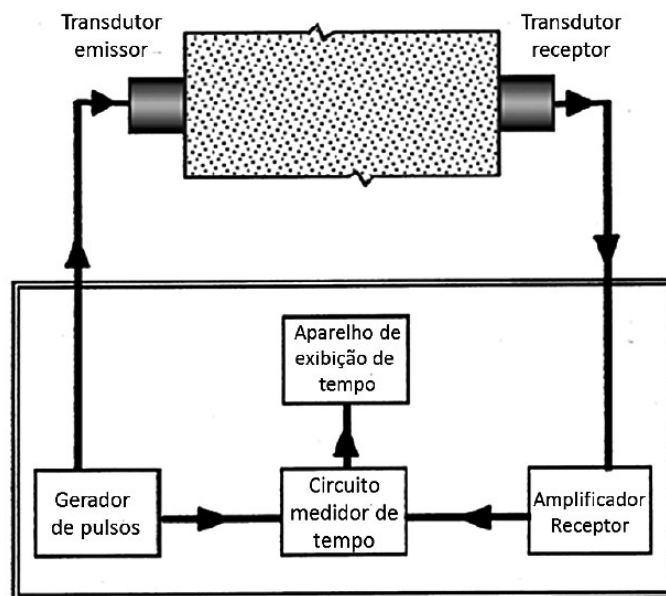
Santos (2008) ainda explica que os resultados obtidos por meio desse ensaio servem de orientação para o emprego do ensaio de esclerometria, já que o mesmo deve ser executado em locais com baixa armação. Mesmo sendo uma técnica bastante intuitiva, é necessária atenção durante o procedimento de análise, uma vez que fatores como presença de elementos metálicos podem comprometer resultados.

2.3.4 Ultrassom

O ensaio de ultrassom é um dos métodos não destrutivos mais empregados em estruturas de concreto para verificação de discontinuidades. Seu princípio consiste em medir a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas em determinado meio. O resultado final desse processo é geralmente expresso em termos de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas. Por serem ondas de alta frequência, são imperceptíveis ao ouvido humano e sua transmissão ao material não lhe causa dano. Quando quantificadas, as ondas ultrassônicas podem ser utilizadas para determinar a uniformidade do concreto, presença de vazios ou fendas, variações das propriedades com o tempo, módulo de elasticidade e propriedades dinâmicas.

As ondas são geradas por um transdutor eletroacústico que, ligado a um circuito eletrônico, recebe um estímulo para oscilar mecanicamente, em uma frequência que pode ser de 20 até 100 kHz dependendo do transdutor. Esse transdutor eletroacústico normalmente é formado por materiais cristalinos de efeito piezoelétrico, podendo ser também de material magnetoescritivos ou outro sensível à tensão. O circuito eletrônico emite pequenos pulsos elétricos ao transdutor, excitando o cristal na sua frequência natural. Esta vibração gera ondas ultrassônicas capazes de atravessar o material em estudo (BUNGEY; GRANTHAM, 2006; ASTM C597-16, 2016). A Figura 2.6 representa o esquema de funcionamento do ultrassom.

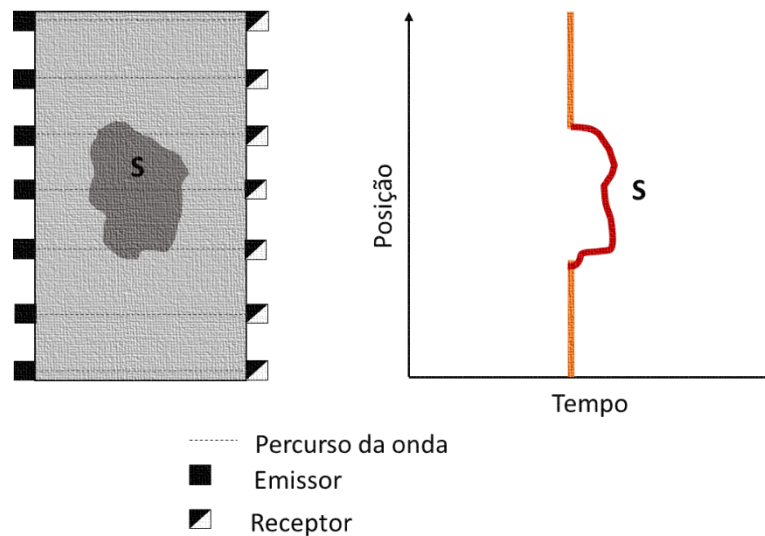
Figura 2.6 – Princípio de funcionamento do ultrassom



Fonte: Adaptado de ASTM C597-09, 2010.

Sendo mais didático, as ondas percorrem o meio num determinado tempo e, quando encontram algum obstáculo, como por exemplo espaços vazios, descontinuidades ou mudanças de propriedade do material, necessitam contorná-lo, percorrendo um caminho maior e, assim, gastam mais tempo na análise. No ultrassom, essas variações das leituras em função do tempo indicam a incidência de variação no material. A Figura 2.7 apresenta um exemplo de análise com ultrassom, no qual a região sinalizada com “S” apresenta alguma inconformidade, refletindo no tempo de percurso da onda.

Figura 2.7 – Método ultrassônico convencional



Fonte: Adaptado de PERLIN; PINTO, 2013.

O arranjo dos transdutores, conforme descrevem a maioria das normas, apresenta diferentes configurações: quando posicionados em faces opostas, recebem o nome de transmissão direta; colocadas na mesma face, transmissão indireta; ou ainda quando posicionados em duas faces perpendiculares, transmissão semidireta. A Figura 2.8 ilustra os modos de arranjo dos transdutores para leitura no ensaio de ultrassom.

- *Transmissão direta*

Segundo a normatização brasileira ABNT NBR 8802 (2019), este arranjo é o mais recomendado na determinação da velocidade de propagação de ondas através de um material, já que, desta forma, as ondas são recebidas com maior intensidade.

- *Transmissão semidireta*

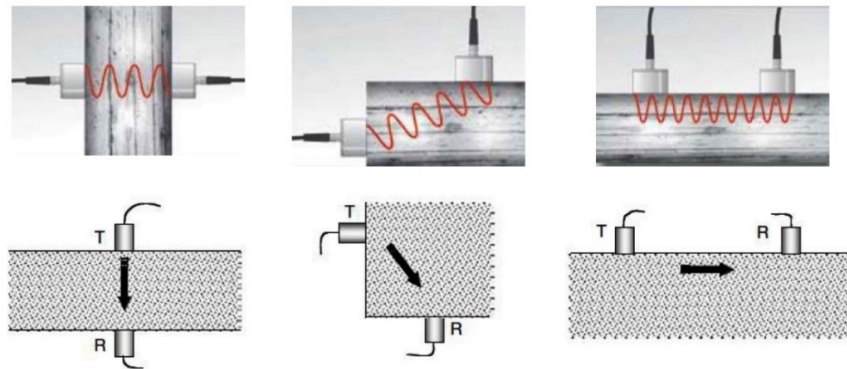
Malhotra (2003) explica que este arranjo também pode ser utilizado de forma satisfatória. No entanto, os transdutores não devem estar muito distantes um do outro, caso contrário, o pulso transmitido pode atenuar-se e um sinal de pulso pode não ser detectado. Esse arranjo deve ser utilizado quando não houver a possibilidade de acesso a duas faces opostas de um corpo de prova ou elemento de concreto.

- *Transmissão indireta*

Este arranjo é utilizado quando se tem acesso a apenas uma face do corpo de prova. É mais propenso a erros e é menos satisfatório porque a amplitude do sinal recebido é significativamente menor do que o obtido pelo método de transmissão direta.

SILVA (2017) ressalta que, caso o material seja uniforme, uma única linha reta é obtida na representação gráfica de tempo versus distância. Se grandes heterogeneidades se apresentarem, a representação gráfica se desviará desta linha reta.

Figura 2.8 – Modos de arranjo dos transdutores para ensaio de ultrassom



Fonte: Adaptado de NAIK et al. 2004.

Algumas das aplicações já consagradas para avaliação de estruturas de concreto por meio do ultrassom são: cálculo do módulo de elasticidade dinâmico, medição de profundidade de fissuras superficiais, estimativa da resistência do concreto, variação das propriedades do concreto através do tempo e verificação da homogeneidade do concreto. Para mais detalhes a respeito desta técnica, consultar o trabalho de RAMÍREZ (2015).

2.3.5 Radiografia

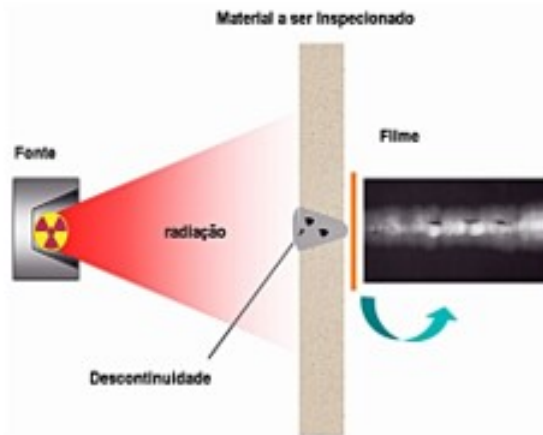
Segundo Lourenço (2012)) a radiografia foi um dos primeiros métodos de END introduzidos na indústria para detecção de descontinuidades internas. O autor ainda comenta que o método está baseado na variação da atenuação da radiação eletromagnética (Raios X ou Gama), causada pela presença de descontinuidades durante a passagem da radiação pela peça, sendo a imagem registrada em um filme radiográfico ou em um sistema de radioscopia, tipo intensificador e integrador de imagem, que permite a visualização dos resultados em um monitor de TV.

Devido às diferenças na densidade e variações na espessura do material, ou mesmo diferenças nas características de absorção causadas por variações na composição do material, diferentes regiões de uma peça absorverão quantidades diferentes da radiação penetrante. Essa absorção diferenciada da radiação poderá ser detectada através de um filme fotográfico localizado atrás da peça inspecionada, onde será impresso o possível problema na estrutura, conforme ilustrado na Figura 2.9 (ANDREUCCI, 2014).

A aplicação dessa técnica dependerá de vários fatores que incluem tipo de material, geometria e quantidade de peças, local, sensibilidade requerida e espessura em questão, conforme aponta Lourenço (2012). A análise por meio da radiografia pode ser “in loco”, quando empregados aparelhos portáteis para média ou baixa energia de radiação, ou em laboratório, quando utilizado alta energia para análises mais robustas.

Lourenço (2012) ainda comenta que as descontinuidades bidimensionais tais como trincas podem não ser detectadas se elas estiverem orientadas a um determinado ângulo em relação ao eixo do feixe de radiação. Além disso, o autor explica que a utilização de qualquer

Figura 2.9 – Técnica geral de ensaio radiográfico na indústria



Fonte: Adaptado de Andreucci, 2014.

espécie de fonte emissora de radiação requer o cumprimento de legislação pertinente à proteção radiológica, o que implica aumento de custo, limitando assim a aplicação desse procedimento.

2.3.6 Métodos dinâmicos

Como discutido, boa parte dos testes não destrutivos apresentados necessitam saber previamente onde está o dano, trazendo assim uma abordagem local. Apesar da inspeção visual conseguir informações a respeito da integridade estrutural por meio de uma abordagem global, principalmente quando combinada com o uso de drones, os dados obtidos são qualitativos. Dessa forma, faz-se necessário o estabelecimento de técnicas que possam avaliar as condições da estrutura no sentido de localizar e quantificar a intensidade do dano por meio de uma abordagem global.

Para contornar esse problema, análises baseadas em parâmetros modais como frequências naturais e modos de vibração foram utilizados para avaliação de integridade estrutural, surgindo assim os métodos dinâmicos (CAWLEY; ADAMS, 1979). À medida que o dano vai se agravando as características dinâmicas da estrutura também se alteram. Por meio do comparativo entre estrutura de referência, seja ela danificada ou não, e estrutura danificada, ou com maior dano, é possível obter informações relevantes do processo de danificação.

Nóbrega (2004) define a análise baseada em parâmetros modais como um processo constituído de técnicas teóricas e experimentais que possibilitam a construção de um modelo matemático representativo do comportamento dinâmico do sistema em estudo, a fim de determinar os seus parâmetros modais como frequências naturais, modos de vibração e fatores de amortecimento modal. Esses parâmetros são frequentemente determinados por métodos analíticos, com auxílio, por exemplo, de Método dos Elementos Finitos. É comum o modelo analítico sequer existir, assim, os parâmetros modais podem ser determinados experimentalmente. Ou mesmo que ele exista, a abordagem experimental pode servir para verificação e validação dos resultados

do modelo analítico.

Silva (2018) ressalta que a análise baseada em parâmetros modais tem sido amplamente utilizada na Engenharia Civil para a validação de modelos numéricos, na detecção de danos, no monitoramento de vibrações e avaliação do conforto humano. Para informações mais específicas sobre métodos dinâmicos, recomenda-se Carrillo (2004) e Carvalho (2015a). A Figura 2.10 apresenta duas estruturas que são monitoradas de maneira contínua, no Brasil, por meio de características dinâmicas, a ponte Rio-Niterói e a ponte JK em Brasília.

Figura 2.10 – Ponte Rio-Niterói (à esquerda) e Ponte JK (à direita)



Fonte: Adaptado de Agência Brasil, 2019.

Mesmo sendo uma metodologia já consagrada na análise experimental, principalmente por sua abordagem global, os métodos dinâmicos apresentam algumas limitações. Koh e Dyke (2007) ressaltam que os dados modais muitas vezes são incompletos e pouco precisos, devido a problemas como erros de modelação, ruídos nas medições, entre outros. Além disso, estes autores apontam que a instrumentação é bastante cara quando comparada com outras técnicas de cunho experimental para análise global, sem contar na necessidade de diversas leituras para varrer toda a estrutura, motivando assim o desenvolvimento de novos meios para avaliar estruturas no sentido de analisá-la de maneira global e por meio de uma abordagem quantitativa.

2.3.7 Métodos estáticos

Tendo em vista as limitações acima, os métodos estáticos são uma via para análise de danos em estruturas. Segundo Wang *et al.* (2001), os métodos estáticos permitem a análise de danos pela medição de mudanças na resposta estrutural estática. Os parâmetros de controle normalmente são deslocamentos e deformações, que podem ser quantificados de maneira rápida e mais econômica, o que segundo Law e Zhu (2009) atrai muita atenção da indústria da engenharia.

Carvalho (2015a) explica que o uso da estática para detecção de danos é uma estratégia bastante simplificada e que não necessariamente traz consigo o implemento de um robusto e custoso aparato experimental, utilizando normalmente a deflexão em vigas como indicador

de danos em estruturas. Contudo, o autor ainda comenta que essa estratégia tem sido pouco explorada como ferramenta para essa finalidade.

A ocorrência de carregamentos externos em estruturas provoca alterações não só nas respostas dinâmicas, mas também nas respostas estáticas, e é com base nessas variações que o dano pode ser detectado. Dentre os métodos estáticos, um bastante empregado é a utilização da variação da deflexão de vigas como indicador de dano, que apresenta modelos teórico-analíticos bastante consolidados para encontrar a rigidez em função dos valores de flecha, comprimento do vão e para situações de carregamentos.

O método estático que será utilizado nesta pesquisa será a variação de deslocamentos estáticos, que apresenta modelos teórico-analítico consolidados na literatura, conforme podem ser encontrados em Hibbeler (2010), Gere e Goodno (2011) e Carvalho (2015a). No Anexo A consta um modelo teórico analítico para uma viga biapoiada, utilizado para encontrar a rigidez em função dos valores da flecha, do comprimento do vão e para situação onde a carga é concentrada no meio do vão de um elemento prismático, simulando o modelo adotado para o ensaio de flexão em três pontos.

Outro método estático utilizado para análise de danos é o da viga conjugada, que também analisa o dano baseado na redução da rigidez do elemento. Segundo Palechor (2013), esse método consiste em gerar uma viga fictícia com o mesmo comprimento e as mesmas características mecânicas da viga original. A viga fictícia é então submetida a uma carga fictícia que tem relação com o diagrama de momentos fletores e rigidez à flexão da viga original, aplicando-se posteriormente o método da superposição para determinação dos deslocamentos nas vigas real e fictícia, determinando-se em seguida, por um processo iterativo, a rigidez à flexão das vigas. Para informações mais específicas sobre métodos estáticos, recomenda-se Carvalho (2015a).

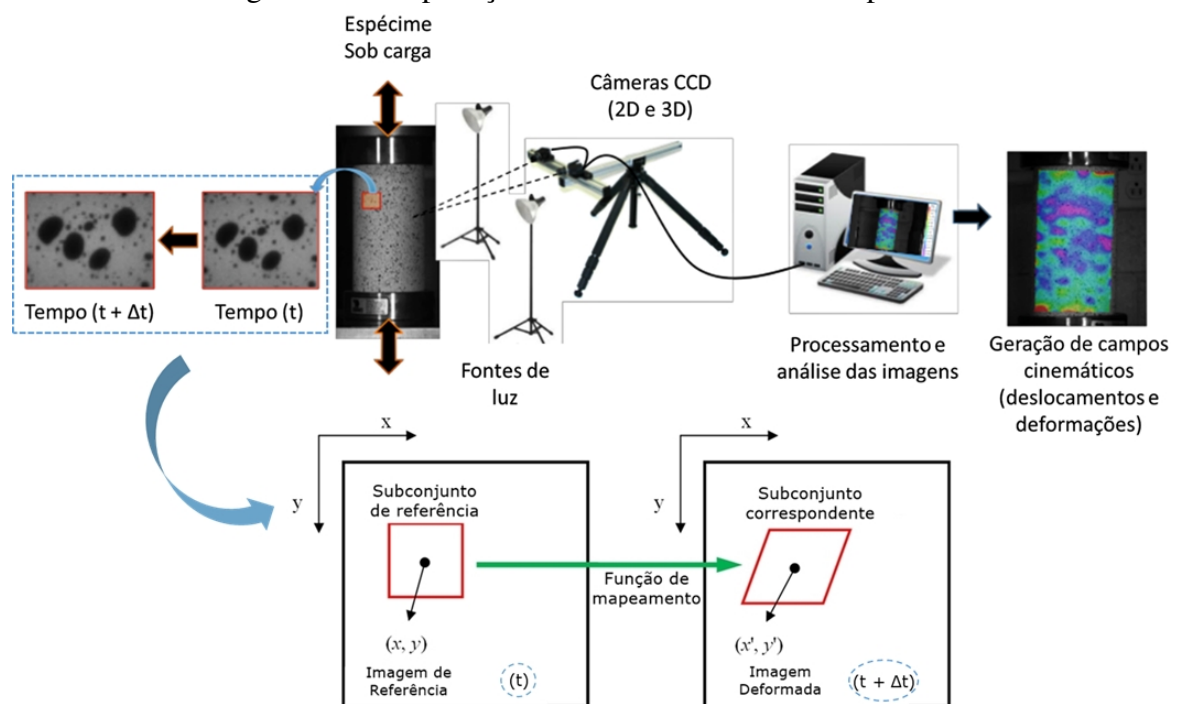
Conforme apresentado, as técnicas tidas como clássicas para a análise de danos, apesar de já serem consagradas, apresentam de certa forma alguma limitação, normalmente associada à necessidade de acesso ao local para avaliação *in loco* da estrutura. Para contornar esse impasse, diversos estudos vêm sendo desenvolvidos com o intuito de conceber técnicas, sem contato, para auxiliar na quantificação de procedimentos técnicos de ensaios. Uma das técnicas não destrutivas que apresenta grande potencial para acoplamento em análise de danos por meio de métodos estáticos é a Correlação de Imagens Digitais. O tópico seguinte apresentará de maneira mais detalhada os conceitos, aplicações e particularidades desta técnica que será utilizada nesta pesquisa.

2.3.8 Correlação de Imagens Digitais - CID

De acordo com Skarzynski, Syroka-Korol e Tejchman (2009), a Correlação de Imagens Digitais é uma técnica óptica-numérica baseada em imagem sem contato para medição de deslocamentos e deformações de campo total.

Sutton, Orteu e Schreier (2009) descrevem que esta técnica primeiro adquire imagens digitais de um objeto em estágios diferentes durante a execução de determinado procedimento experimental, por meio de câmeras digitais, e em seguida, são empregadas técnicas de rastreamento e registro de mudanças de imagens superficiais, baseadas em padrões de texturas naturais ou artificiais, como portadores de informação, para medições precisas em domínios bi e tridimensionais. Pan *et al.* (2009b) explicam que o domínio bidimensional é empregado para edição de deformações e deslocamentos no plano. Já o tridimensional é utilizado para rastrear o movimento de um determinado volume unitário dentro da amostra. A Figura 2.11 fornece um esquema básico do conceito de CID.

Figura 2.11 – Aplicação de CID em ensaio de compressão



Fonte: Adaptado de Gonzales et al. (2015) e Harris & Dizaji (2019).

Sendo uma técnica utilizada há mais de 35 anos no campo da mecânica experimental, a CID é empregada em diversos ramos da engenharia onde busca-se a medição de campos cinemáticos (deslocamentos e deformações) como em componentes estruturais e até mesmo em tecidos biológicos.

Segundo Ferraz (2013), ao contrário de outras formas de medição, a instrumentação necessária para a CID é tecnicamente uma câmera fotográfica de alta resolução (para análise bidimensional) e um computador para o processamento das imagens. Além disso, é comum o emprego de uma fonte de luz para manter as condições de iluminação constantes durante o ensaio. No geral, são equipamentos que podem ser reaproveitados e que não foram projetados apenas para essa aplicação.

Inicialmente, Peters e Ranson (1982) utilizaram esta técnica óptica para análise de tensões em um corpo rígido por meio de um algoritmo de correlação cruzada. Logo em seguida,

Chu, Ranson e Sutton (1985) promoveram melhorias tanto nas configurações de preparação dos espécimes como no algoritmo de correlação, criando métodos mais automatizados e conceitos mais consolidados, sendo estes os trabalhos que serviram de base teórica para o método de análise por CID moderno. Pan *et al.* (2009b) comentam que com os avanços tecnológicos, a análise por CID, que demandava potencial computacional e óptico grande para a época, cresceu em popularidade perante outras técnicas ópticas de medição como a interferometria óptica. Desde então, o método tem sido otimizado de maneira a aumentar sua precisão e reduzir sua complexidade computacional, tornando-o uma alternativa experimental cada vez mais acessível para obtenção de deslocamentos e deformações superficiais. Lecompte *et al.* (2006), Pan *et al.* (2009a) e Schreier e Sutton (2002) são grandes contribuintes aos desenvolvimentos desta técnica nos últimos anos, desenvolvendo até manuais que expõem os procedimentos aconselháveis e princípios básicos nas medições das propriedades obtidas pelo sistema de CID (MUDASSAR; BUTT, 2016).

Conforme Pan (2018) explana, os deslocamentos e deformações mensurados por meio da CID podem servir aos quatro propósitos a seguir:

- **Caracterização:** as quantidades cinemáticas medidas, como por exemplo deslocamento, deformação e tensão, em respostas às condições externas, revelam diretamente o comportamento mecânico dos materiais e estruturas ensaiadas.
- **Identificação:** com base nas cargas mecânicas ou térmicas submetidas e conhecidos os campos cinemáticos medidos, vários parâmetros constitutivos, em situação estática ou dinâmica, podem ser determinados, como módulo de Young, coeficiente de Poisson, frequência natural, coeficiente de dilatação térmica, dentre outros, ou identificados pela combinação de métodos de identificação, como o método de campos virtuais ou com a utilização de Método dos Elementos Finitos (MEF).
- **Validação cruzada:** os campos cinemáticos obtidos podem ser usados para verificar a exatidão das previsões feitas via MEF.
- **Controle de testes:** usando a CID é possível o controle preciso de vários parâmetros mecânicos durante a realização de um ensaio técnico, para isso é necessário que ocorra um acoplamento da câmera e do software de monitoramento a um sistema de aquisição de dados, levando em consideração a configuração de aplicação de carga e o tamanho da amostra.

2.3.8.1 Princípio de funcionamento

Uma imagem digital, conforme explica Moreira (2015), consiste num conjunto finito de elementos – designados pixels – que tem, cada um deles, associado a si mesmo, uma posição

e uma intensidade. Por meio do monitoramento desses pixels, o sistema pode medir campos cinemáticos (deslocamentos e deformações).

Segundo Pan *et al.* (2009b), a análise por CID se baseia em três etapas:

- Configuração experimental
- Aquisição de dados
- Análise computacional

Na configuração experimental é dada maior atenção à preparação da superfície do corpo de prova, visto que é a portadora de informações do procedimento. Nessa preparação do corpo de prova, a superfície ensaiada deve conter um padrão aleatório granulado, o que facilitará a identificação na imagem deformada, do ponto definido no sistema de referência. Oliveira (2019) ressalta que elementos de concreto, após o processo de desforma, apresentam um padrão heterogêneo suficiente em sua superfície para aplicação da CID, eliminando assim a necessidade de aplicação de técnicas artificiais de rastreamento.

Em seguida, no processo de aquisição de dados, as imagens são obtidas durante estágios à medida que o carregamento vai variando. Ao finalizar o ensaio, as imagens adquiridas são processadas e é feita a análise computacional para determinação dos campos de deslocamento e deformações resultantes.

As imagens digitais são formadas a partir da luz refletida sobre um objeto que incide sobre as lentes e capturadas por sensores. Os sensores ópticos utilizados para captura de imagens, são os que utilizam filtro Bayer. Apesar de apresentarem processo de captura similares, diferem na composição e tecnologia utilizada para fabricação (CORREIA, 2015).

De acordo com Carvalho (2015b), para se aplicar os algoritmos de processamento de imagens, uma opção é que os valores dos pixels estejam identificados por uma escala de cinza. Para pixels cujo valor corresponde ao preto, o nível de cinza é zero e para pixels cujo valor corresponde ao branco, o nível de cinza é 255, em sensores de oito bits.

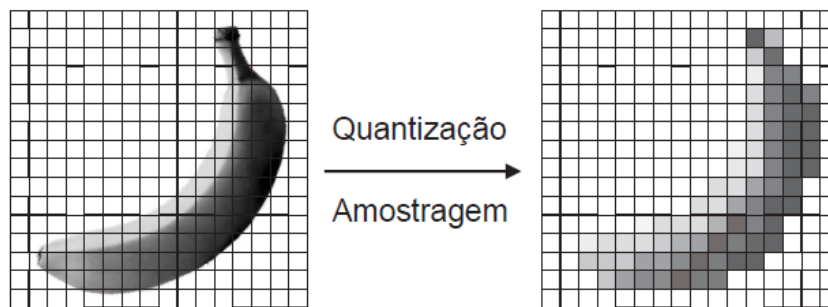
Carvalho (2015b) ainda ressalta que na escala de cinza, a imagem normalmente é formada por oito bits, sendo possível 256 tonalidades de escala de cinza (2^8). Já as imagens coloridas são formadas por 24 bits, permitindo uma combinação de 16.777.216 tipos de cores (2^{24}). Sendo por isso, a nível computacional, mais prático a utilização de imagens monocromáticas por exigir cálculos menos extensos. Por esta razão alguns softwares só aceitam como *input* imagens monocromáticas, sendo que outros fazem a conversão antes de iniciar a análise da imagem. Curt *et al.* (2019) discutem que com o advento de câmeras digitais disponíveis, existe o potencial de explorar cor em CID, já que as imagens em cores apresentam mais informações, logo para o mesmo subconjunto de análise, as imagens coloridas oferecem melhores resultados quando

comparadas as imagens em escala de cinza, conforme apresentado no estudo desenvolvido por este autor.

Sato *et al.* (2009) comentam que a formação da imagem digital, depende ainda da aplicação de dois processos: amostragem e quantização. O procedimento de amostragem consiste na discretização espacial do domínio contínuo da imagem nas dimensões x e y do problema, enquanto o procedimento de quantização consiste na avaliação dos valores escalares associados a uma função bidimensional utilizada para representação do espaço deformado.

A Figura 2.12 ilustra a comparação entre uma imagem monocromática contínua e sua equivalente após submetida aos processos de amostragem e quantização. Gonzalez e Woods (2001) apontam que cada espaço ilustrado nesta figura após a transformação, representa um pixel, de modo que quanto maior a resolução do equipamento utilizado para aquisição da imagem, mais elementos serão utilizados no processo de amostragem, resultando em uma representação mais realística.

Figura 2.12 – Efeito da amostragem e quantização em comparação a imagem contínua captada pelos sensores



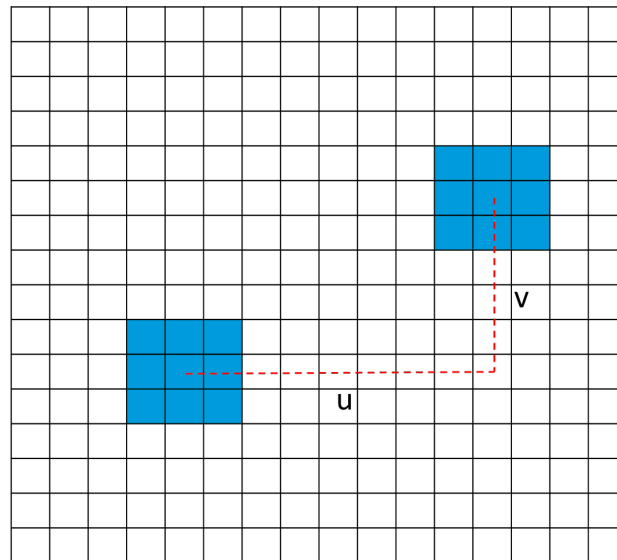
Fonte: Adaptado de Gonzales e Woods & Sato, 2002.

Segundo Pan (2018), o estabelecimento de correspondências entre regiões da imagem não deformada e regiões da imagem deformada é o processo fundamental numa análise por Correlação de Imagens Digitais. Isto é, selecionado um ponto na imagem inicial, pretende-se determinar a sua nova posição na imagem deformada. A determinação de uma correspondência implica levar em conta não só o ponto procurado, mas um conjunto de $m \times n$ pixels na vizinhança desse ponto, por isso é comum dizer que a CID não trabalha apenas ponto a ponto, e sim de conjunto a conjunto de pontos.

De maneira intuitiva, Barreto Júnior (2008) apresentou um exemplo onde mostra como são obtidos deslocamentos com base em CID. O exemplo trata de uma imagem formada por uma matriz quadrada de 16 pixels em ambas direções (x e y), conforme apresentada na Figura 2.13. Na mesma, o alvo de interesse está representado por um quadrado de 3 pixels nas direções x e y , e mostrado em duas localidades diferentes nesta matriz pixel.

A configuração inicial, antes da deformação, é representada à esquerda pelo alvo quadrado, onde apresenta em seu pixel central um ponto branco, e tem como localização $x = 4$ pixels e $y = 5$ pixels. Após a deformação, o alvo foi movido no plano de pixels e seu pixel central agora está

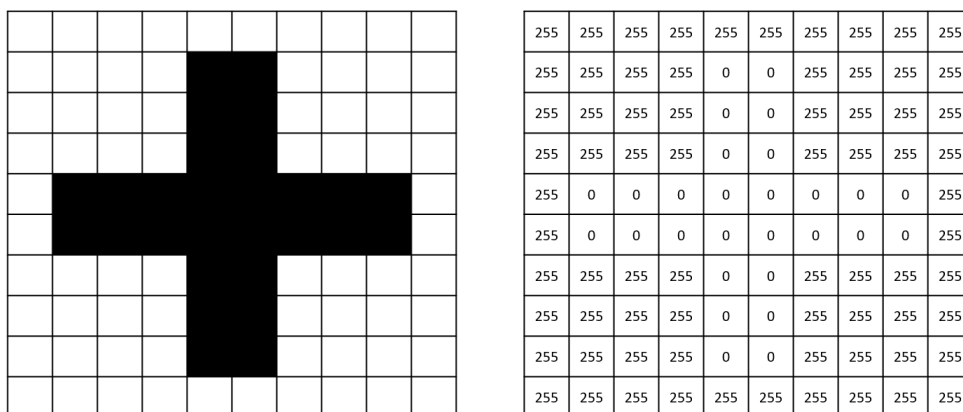
Figura 2.13 – Matriz quadrada de pixels com alvos quadrados



Fonte: Adaptado de Barreto Júnior, 2008.

localizado em $x = 12$ pixels e $y = 10$ pixels. As componentes do deslocamento são $u = 12 - 4 = 8$ pixels e $v = 10 - 5 = 5$ pixels. Este simples exemplo mostra que a imagem analisada neste plano, antes e depois da deformação, contém informações suficientes para determinar as componentes do deslocamento u e v .

Barreto Júnior (2008) explica que este exemplo é simples porque o alvo permanece centrado na posição do pixel e não muda de forma durante o processo de deformação. Um exemplo mais realístico é demonstrado na Figura 2.14, onde o alvo não permanece centrado na posição do pixel e move-se durante o processo de deformação. O alvo é representado por um sinal em cruz (+), formado por dois blocos de 2×8 pixels atravessados um em relação ao outro, de cor preta em um campo de 10×10 pixels. Para pixels cujo valor corresponde ao preto o nível de cinza é zero e para pixels cujo valor corresponde ao branco o nível de cinza é 255.

Figura 2.14 – Condição inicial da matriz quadrada 10×10 de pixels com alvos em +

Fonte: Adaptado de Barreto Júnior, 2008.

Suponha agora que o espécime está deformado e o sinal de '+' move um pixel para

baixo e um pixel para a esquerda em relação à matriz original de 10 x 10 pixels. A imagem do sinal de ‘+’ após este movimento e o novo conjunto de intensidade luminosa para cada pixel correspondente à nova localização do sinal de +, conforme mostrado na Figura 2.15.

Figura 2.15 – Condição final da matriz quadrada 10 x 10 de pixels com alvos em +

255	255	255	255	255	255	255	255	255	255
255	255	255	255	255	255	255	255	255	255
255	255	255	0	0	255	255	255	255	255
255	255	255	0	0	255	255	255	255	255
255	255	255	0	0	255	255	255	255	255
0	0	0	0	0	0	0	0	255	255
0	0	0	0	0	0	0	0	255	255
255	255	255	0	0	255	255	255	255	255
255	255	255	0	0	255	255	255	255	255
255	255	255	0	0	255	255	255	255	255
255	255	255	255	255	255	255	255	255	255
255	255	255	255	255	255	255	255	255	255
255	255	255	255	255	255	255	255	255	255
255	255	255	255	255	255	255	255	255	255
255	255	255	255	255	255	255	255	255	255

Fonte: Adaptado de Barreto Júnior, 2008.

A quantificação do deslocamento sofrido começa por definir um subconjunto de pixels que circundam as principais características do alvo na fase inicial do padrão de intensidade de luz, conforme ilustrado na Figura 2.16. O subconjunto utilizado neste exemplo é um bloco de 6 x 6 pixels, que circunda o centro do sinal +. A imagem gravada após o movimento do sinal + é então transferida para encontrar um bloco correspondente de 6 x 6 pixels com o mesmo padrão de intensidade. Após o bloco de 6 x 6 ter sido localizado na segunda imagem, o centro do alvo pode ser determinado e as componentes do deslocamento u e v medidos em termos de pixels, demonstrando assim que o deslocamento pode ser quantificado por meio desta analogia.

Figura 2.16 – Bloco de 6x6 pixels que circunda a região central do sinal de + definindo um padrão de intensidade nas imagens

255	255	255	255	255	255	255	255	255	255
255	255	255	255	255	255	255	255	255	255
255	255	255	0	0	255	255	255	255	255
255	255	255	0	0	255	255	255	255	255
255	255	255	0	0	255	255	255	255	255
0	0	0	0	0	0	0	0	255	255
0	0	0	0	0	0	0	0	255	255
255	255	255	0	0	255	255	255	255	255
255	255	255	0	0	255	255	255	255	255
255	255	255	0	0	255	255	255	255	255
255	255	255	255	255	255	255	255	255	255
255	255	255	255	255	255	255	255	255	255
255	255	255	255	255	255	255	255	255	255
255	255	255	255	255	255	255	255	255	255
255	255	255	255	255	255	255	255	255	255

Fonte: Adaptado de Barreto Júnior, 2008.

Na etapa de processamento de imagens é necessário obter parâmetros de correspondência entre as regiões de análise, ou sub-regiões. Esses parâmetros de correspondência são obtidos por meio de coeficientes de correlação, através da análise das matrizes de pixels que formam

a imagem. Para isso, define-se a posição de cada pixel na imagem de referência e estima-se a posição deformada de cada pixel por meio de algoritmos de CID. Khoo, Karuppanan e Tan (2016) mencionam que durante o processo de correlação de imagens, são aplicados diversos critérios matemáticos de correspondência para avaliar a semelhança entre os subconjuntos antes e após a deformação, e é com base neles que o coeficiente de correlação é definido.

Várady Filho (2016) aponta que o coeficiente de correlação de imagens se resume a um indicador usado para medir a semelhança entre duas imagens. As expressões mais utilizadas para o cálculo do coeficiente de correlação são as de correlação cruzada (CC) e somatório do quadrado da diferença (SSD), que utilizam algoritmos matemáticos que relacionam posição e tonalidade do pixel para quantificar o deslocamento presente. Pan (2011) enfatiza que algumas variações desses processos de correlação são focadas na redução de ruídos externos, calculando o coeficiente a partir de uma relação de valores médios, obtidos durante a operação, sendo as mais empregadas: *Zero Normalized Cross Correlation* (C_{ZNCC}) e a *Zero Normalized Sum of Squared Differences* (C_{ZNSSD}):

$$C_{ZNCC} = \frac{\sum \bar{f}_i \bar{g}_i}{\sqrt{\sum \bar{f}_i^2 \sum \bar{g}_i^2}} \quad (2.1)$$

$$C_{ZNSSD} = \sum \left(\frac{\bar{f}_i}{\sqrt{\sum \bar{f}_i^2}} - \frac{\bar{g}_i}{\sqrt{\sum \bar{g}_i^2}} \right)^2 \quad (2.2)$$

Onde

$$\bar{f} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i \quad (2.3)$$

$$\bar{g} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g_i \quad (2.4)$$

$$\bar{f}_i = f_i - \bar{f} \quad (2.5)$$

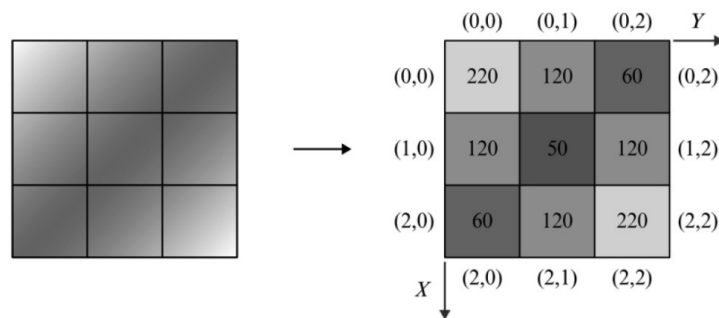
$$\bar{g}_i = g_i - \bar{g} \quad (2.6)$$

As variáveis f_i e g_i representam as intensidades nos blocos de pixels em instantes diferentes, onde a melhor correspondência encontra-se na região que minimiza uma destas funções custo. É importante ressaltar que este processo de correlação é iterativo e o coeficiente é calculado diversas vezes no intuito de otimizá-lo, maximizando-o quando empregado CC e minimizando quando utilizado SSD.

Definido o coeficiente de correlação, a próxima etapa consiste em obter e verificar graficamente os vetores de deslocamento, com base no rastreamento dos pixels de referências definidos na sub-região de análise, por meio do processamento de imagens.

Cada pixel que forma a região de interesse será associado a uma posição (x, y) e um valor de intensidade $f(x, y)$, considerando dessa forma a imagem como uma função bidimensional. A ideia fundamental deste método, conforme já discutido, consiste em extrair de cada imagem a matriz de intensidade de um bloco de pixels, como representado na Figura 2.17, e procurar essas intensidades nas imagens posteriores, com base no intervalo de tempo pré-estabelecido na análise. Os valores quantificados neste procedimento são representados em pixels, que por meio de um fator de magnificação gerado no procedimento de calibração transformará essa informação em milímetros.

Figura 2.17 – Exemplo de discretização das posições e das intensidades dos pixels para rastreamento



Fonte: Adaptado de Sutton, 2008.

2.3.8.2 Fatores de influência no processo de CID

Com base nos conceitos apresentados, percebe-se que diversos fatores acabam influenciando o processo de CID. Esses fatores podem ser classificados em internos, quando estão relacionados com o desempenho dos algoritmos, ou externos quando relacionados às condições experimentais.

Dentre os principais fatores que acabam influenciando a análise por CID citam-se:

- Requisitos técnicos da instrumentação:** Leitão (2015) enfatiza que as imagens adquiridas para análise devem possuir uma boa resolução, de forma a possibilitar o seu tratamento através da CID, enfatizando que a resolução da imagem deve ter no mínimo cerca de 4 pixels por milímetros. Logo, o fator qualidade da imagem é algo de bastante relevância nesse estudo, sendo necessário a utilização de câmeras de alta resolução para aquisição de imagens com uma certa qualidade neste procedimento. Além disso, o computador deve apresentar uma capacidade de processamento adequada para trabalhar com as matrizes de pixels durante o processo de CID.

- b) **Ambiente de ensaio:** devido à sensibilidade dos equipamentos (por exemplo câmera, fontes de iluminação, computador, dentre outros) e à variação de luminosidade, comumente a CID é empregada em ambientes controlados.
- c) **Posicionamento da câmera:** o posicionamento da câmera está diretamente relacionado com a qualidade da imagem que é fornecida pelo equipamento, devido a sua distância focal. Além disso, o posicionamento da câmera serve de parâmetro durante o procedimento de calibração para definição da subárea de interesse.
- d) **Superfície do espécime:** a superfície analisada deve conter um padrão aleatório granuloso, o que facilitará a identificação na imagem deformada, do ponto definido no sistema de referência. Esse padrão aleatório pode ser artificial, com o uso de sprays, ou natural, quando a superfície já apresentar esse padrão granuloso adequado.
- e) **Luminosidade:** como a CID utiliza a imagem como portadora de informações, é necessário garantir, durante o procedimento de ensaio, a menor variação de luminosidade possível, para isso é comum a aplicação de uma fonte de luz constante, com direcionamento voltado para a zona de análise.
- f) **Erro humano:** como qualquer procedimento experimental é de extrema importância que o responsável técnico tenha conhecimento e experiência adequada para avaliação, dando assim o suporte adequado para garantir a execução do ensaio.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Conforme discutido nas delimitações do trabalho, a análise de danos nesta pesquisa foi realizada por meio de um procedimento estático baseado na verificação da perda de rigidez em função da variação da deflexão, seguindo o modelo teórico-analítico definido no Anexo A.

O elemento estrutural escolhido para este estudo são vigas de Concreto Autoadensável Reforçado com Fibras de Aço (CAARFA) submetidas a esforços de flexão, as quais foram agrupadas em duas formulações, que foram definidas por Oliveira (2019) e Freitas *et al.* (2019). A formulação definida por Oliveira (2019) consiste em vigas com fibras de aço distribuídas, de maneira aleatória, ao longo de todo o espécime, consideradas homogêneas por serem constituídas de apenas um tipo de concreto, sendo neste trabalho designadas de Vigas Monolíticas (MON). Já a formulação definida por Freitas *et al.* (2019) tem como intuito a produção de elementos estruturais em Dupla Camada (DC) de concreto. Essa dupla camada é composta por CAARFA na região tracionada da viga e Concreto Autoadensável (CAA) convencional, sem fibras, na região onde atuam esforços de compressão, com as proporções definidas conforme ilustrado na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Distribuição de fibras nos espécimes avaliados no primeiro conjunto



(a) Espécimes desenvolvidos por Oliveira (2019), com distribuição total (100% de CRFA).



(b) Espécimes desenvolvidos por Freitas et al. (2019), com distribuição em dupla camada (50% de CRFA e 50% de concreto convencional).

Fonte: Adaptado de Oliveira (2019) e Freitas et al. (2019).

As fibras de aço empregadas para esse estudo foram de classe A e de tipo I, seguindo a norma ABNT NBR 15530 (2007), com fator de forma único e igual a 80. Vale ressaltar que a análise se limita à utilização de fibras metálicas em um teor volumétrico no concreto de 0,32% e 0,16%, respectivamente. Ao todo foram produzidas oito vigas, sendo quatro para cada formulação adotada.

O procedimento experimental tem por objetivo avaliar a perda de rigidez nos espécimes produzidos, para isso foram adotadas as seguintes etapas:

- Preparação das amostras;
- Análise estática de danos com auxílio da CID;
- Análise estatística dos resultados.

Todas as etapas experimentais aqui mencionadas foram realizadas na Universidade Federal de Alagoas – Campus A. C. Simões, sendo a preparação das amostras e análise de danos com auxílio da CID executadas no Laboratório de Estruturas e Materiais (LEMA). A seguir, serão explicadas cada uma das etapas do procedimento experimental.

3.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

A dosagem e moldagem dos espécimes prismáticos foram definidas por Oliveira (2019) e Freitas *et al.* (2019), sendo estas baseadas na formulação para dosagem de espécimes em CAARFA adaptada de Gomes (2002), ver Tabela 3.1, e que já apresentaram resultados de respaldo com base nos estudos desenvolvidos pelos Grupos de Pesquisa “Análise Teórico-Experimental de Estruturas e Materiais” e “Mecânica das Estruturas e Materiais Avançados”. Para as vigas que utilizaram diferentes camadas, o CAARFA foi o mesmo utilizado nas vigas monolíticas (com 100% de fibras), variando apenas a espessura das camadas e a utilização de CAA convencional, ou seja, sem fibras, conforme ilustrado na Figura 3.1.

Tabela 3.1 – Consumo de materiais por m³ - C30.

Materiais	Massa (kg)
Cimento	377,90
RBMG	188,95
Agregado miúdo	774,53
Agregado graúdo	813,75
Água inicial	151,16
Água complementar	37,75
Água de absorção	11,17
Superplastificante	6,30
Fibras de aço	25,98

Fonte: Oliveira, 2019.

Oliveira (2019) explica que para o procedimento de fabricação do concreto o primeiro passo é a separação do material. Em seguida, o interior da betoneira deve ser molhado, fazendo com que a água da mistura não seja absorvida pelas paredes internas, o que causaria prejuízos no processo de hidratação do cimento. Na sequência, o esqueleto granular (agregados graúdo e miúdo) deve ser colocado na betoneira juntamente com a água de absorção e deve-se misturá-los

por 30 segundos. O passo seguinte é a adição do cimento e RBMG, misturando novamente por mais 30 segundos. Em seguida, a água inicial é adicionada misturando-se por mais 1,5 minutos. Por fim, o superplastificante e a água complementar são adicionados, sendo a mistura revolvida por mais 2 minutos. Durante o processo final de mistura, as fibras são adicionadas de maneira fracionada para garantir uma boa distribuição das fibras no concreto. Já no CAA a alteração em relação a dosagem apresentada está na ausência de fibras a mistura.

A Figura 3.2 apresenta os moldes utilizados para confecção das vigas (15x15x55cm). À esquerda tem-se o molde convencional, utilizado para moldagem dos elementos prismáticos definidos por Oliveira (2019). Já à direita, uma adaptação para moldagem das vigas em dupla camada, com a inserção de uma divisória ao molde, definida por Freitas *et al.* (2019). As caracterizações dos materiais e roteiros de dosagens empregadas estão disponíveis nos trabalhos de Oliveira (2019) e Freitas *et al.* (2019), para elementos monolíticos de CAARFA e de dupla camada, respectivamente.

Figura 3.2 – Moldes para moldagem de viga: convencional (à esquerda) e dupla camada (à direita)



Fonte: Adaptado de Oliveira (2019) e Freitas et al. (2019), 2020.

Após o processo de cura e desforma aos 28 dias, não foi dado nenhum tratamento à superfície das vigas, visto que Oliveira (2019) constatou que não há necessidade de destacar a área fotografada, ou região de interesse, uma vez que a superfície das vigas já apresenta um padrão de heterogeneidade suficiente para o procedimento de correlação de imagens, conforme indica a Figura 3.3.

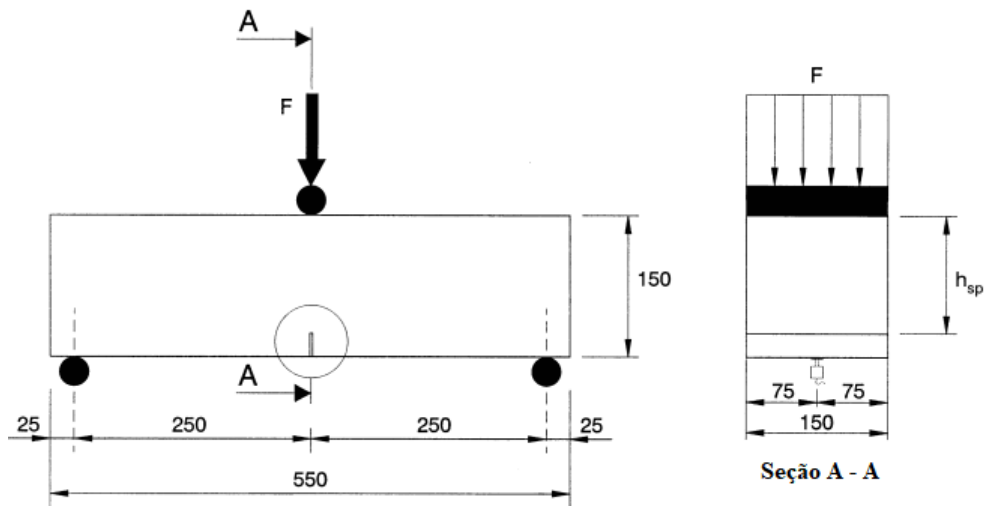
Figura 3.3 – Padrão de superfície das vigas



Fonte: Oliveira, 2019.

Como o procedimento experimental seguiu as recomendações da EN 14651 (2007), foi necessário criar um entalhe nas vigas, tendo como função induzir o posicionamento da fissura. Esse rasgo foi introduzido com auxílio de uma serra de corte em todos os espécimes analisados e possui 5 mm de largura, com 25 mm de altura, face a face da seção. A fissura é localizada muito próxima do plano do entalhe e deformações não lineares não ocorrem nas outras regiões do corpo de prova, sendo assim toda a energia dissipada pode ser atribuída à abertura da fissura e os dados obtidos apresentam menor dispersão. A Figura 3.4 representa o esquema de ensaio de tração por flexão de acordo com a norma mencionada, onde a área sinalizada com um círculo identifica o posicionamento do entalhe. Vale ressaltar que o posicionamento deste entalhe para as vigas em dupla camada foi na região em que foi empregado CAARFA.

Figura 3.4 – Ensaio de tração à flexão por 3 pontos



Fonte: Adaptado de EN 14651, 2007.

Foram produzidas oito vigas, sendo quatro com formulação convencional para CAARFA e outras quatro como elementos de dupla camada de concreto, sendo uma camada com CAARFA e outra com CAA convencional.

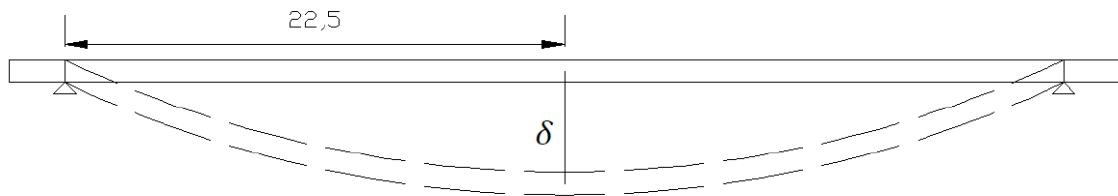
3.2 DETERMINAÇÃO DO DANO COM AUXÍLIO DA CID

O método estático utilizado nesta pesquisa foi a variação de deslocamentos estáticos, que apresenta modelos teórico-analíticos consolidados na literatura, conforme podem ser encontrados em Hibbeler (2010), Gere e Goodno (2011) e Carvalho (2015a). No Anexo A consta um modelo teórico analítico para uma viga biapoiada, utilizado para encontrar a variação da rigidez à flexão em função dos valores da flecha, comprimento do vão e para situação onde a carga é concentrada no meio do vão no elemento prismático, simulando o modelo adotado para o ensaio de flexão em três pontos.

A informação de controle utilizada para análise da variação da rigidez será o deslocamento vertical (δ) do ponto em que se aplica a carga no ensaio EN 14651 (2007), conforme

ilustra a Figura 3.5, sendo possível obter uma estimativa de rigidez da viga, de acordo com a equação idealizada da flexão da viga por meio das Expressões 3.1 e 3.2.

Figura 3.5 – Ilustração de viga em situação indeformada (linha contínua) e deformada (linha tracejada), com representação da deflexão vertical no centro do vão.



Fonte: Adaptado de Carvalho, 2015.

$$EI = \frac{FL^3}{48\delta} \quad (3.1)$$

$$EI = \frac{FL}{4} \left(\frac{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + \delta^2}{2\delta} \right) \quad (3.2)$$

Sendo:

δ = Valores experimentais obtidos para a deflexão.

F = Carregamento atuante (Valores obtidos experimentalmente pelo controle do ensaio de flexão).

L = Vão total da viga (Valor fixo e mensurado previamente).

É importante destacar que conforme explicado no Anexo A, a Equação 3.1 é utilizada para casos onde não há variação significativa do momento de inércia, ou seja, a seção permanece íntegra. Já a 3.2 quando ocorre o contrário, variação significativa do momento de inércia, devido, por exemplo, à fissuração, que é o dano considerado neste estudo. Para análise da perda de rigidez foram utilizados dados fornecidos pelo ensaio de flexão e imagens captadas durante o processo de CID, podendo assim identificar início do processo de fissuração e forma de propagação das fissuras.

A quantificação da variável (δ) pode ser feita por meio do próprio ensaio de flexão, já que este retorna valores que relacionam carga-deslocamento e carga-abertura de fissura. Além disso, uma forma de estimar o deslocamento vertical, de acordo com a EN 14651 (2007), é através da abertura de fissura, conforme mostrado na Equação 3.3.

$$\delta = 0,85CMOD + 0,04 \quad (3.3)$$

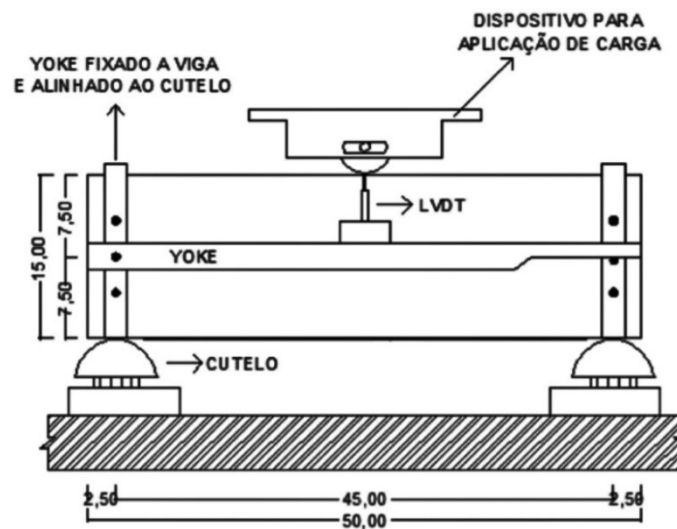
Sendo:

δ : deslocamento vertical (mm);

CMOD: Crack Mouth Opening Displacement (abertura de boca da fissura) (mm).

Neste ensaio de flexão, a EN 14651 (2007) recomenda a utilização de um *Clip-gage* para quantificação da abertura de fissura e a utilização de um LVDT em uma estrutura rígida denominada de *Yoke* onde é fixada ao espécime a meia altura da amostra sobre os cutelos, como indicado na Figura 3.6.

Figura 3.6 – Modelo esquemático do dispositivo “YOKE” na viga.

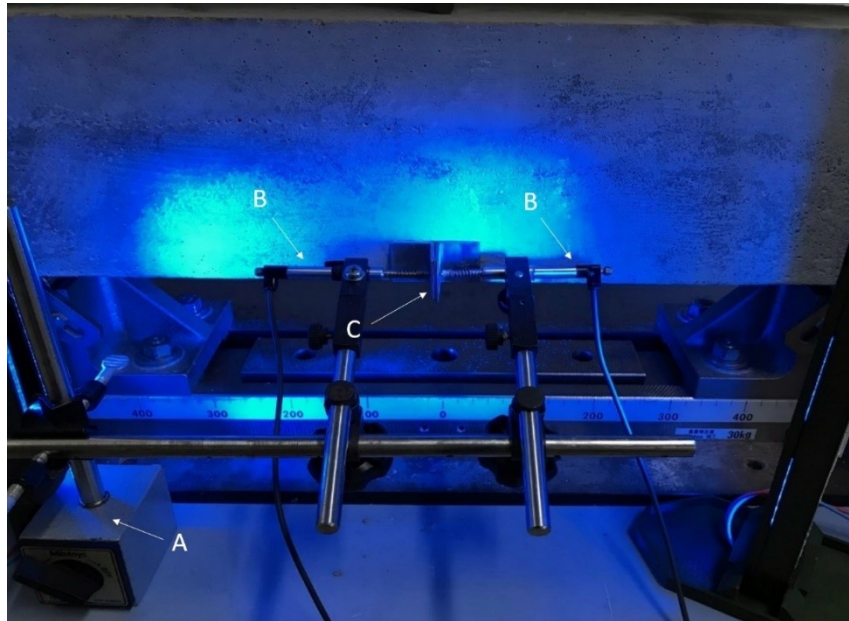


Fonte: Adaptado de Dias, 2018.

No entanto, devido à falta de alguns equipamentos (*Clip Gage* e *Yoke*), uma adaptação foi realizada com a utilização de LVDT's, estando estes posicionados em cantoneiras metálicas em formato de “L”, fixadas na região no entalhe para monitorar assim o controle da abertura de fissura, ver Figura 3.7. Segundo Agra (2017) os valores obtidos com esta adaptação são confiáveis, não comprometendo os resultados do ensaio. O controle de deslocamento foi realizado pelo próprio ensaio, já que utiliza um sistema fechado de controle de velocidades de deslocamento, e com base na estimativa do deslocamento proposto pela Equação 3.3.

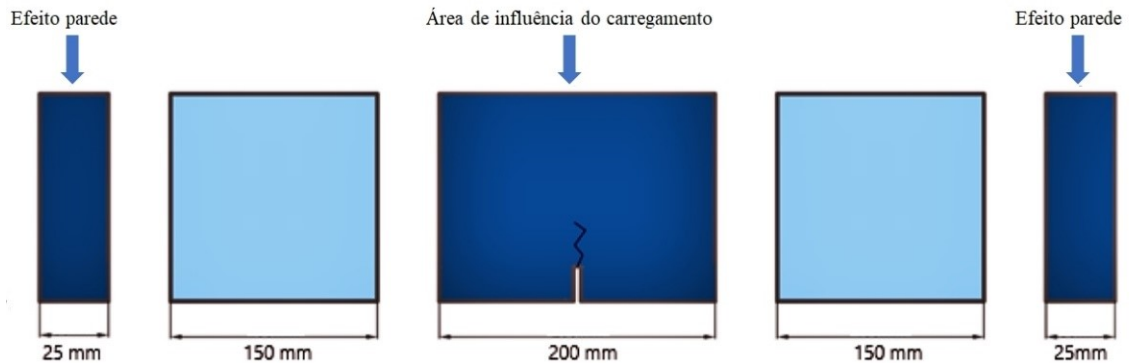
De maneira convencional estes são os modos para estimar essa variável de interesse (δ), contudo, o presente trabalho propõe a utilização de uma técnica óptica-numérica para quantificação desse deslocamento por meio de processamento de imagens digitais, e em seguida avalia a perda de rigidez com base nos critérios estabelecidos nas Equações 3.1 e 3.2. Para a determinação desta variável é necessário que durante a realização do ensaio de flexão seja fotografada a zona de interesse, que neste caso corresponde à zona de influência do carregamento, conforme ilustra a Figura 3.8. Para esse estudo, a variação da perda de rigidez foi analisada em instantes antes e após a ruína do espécime.

Figura 3.7 – Posicionamento dos *LVDT's*, onde (a) base magnética, (b) *LVDT's* em haste metálica próximo a cantoneira e (c) cantoneira metálica.



Fonte: Adaptado de Freitas et al., 2019.

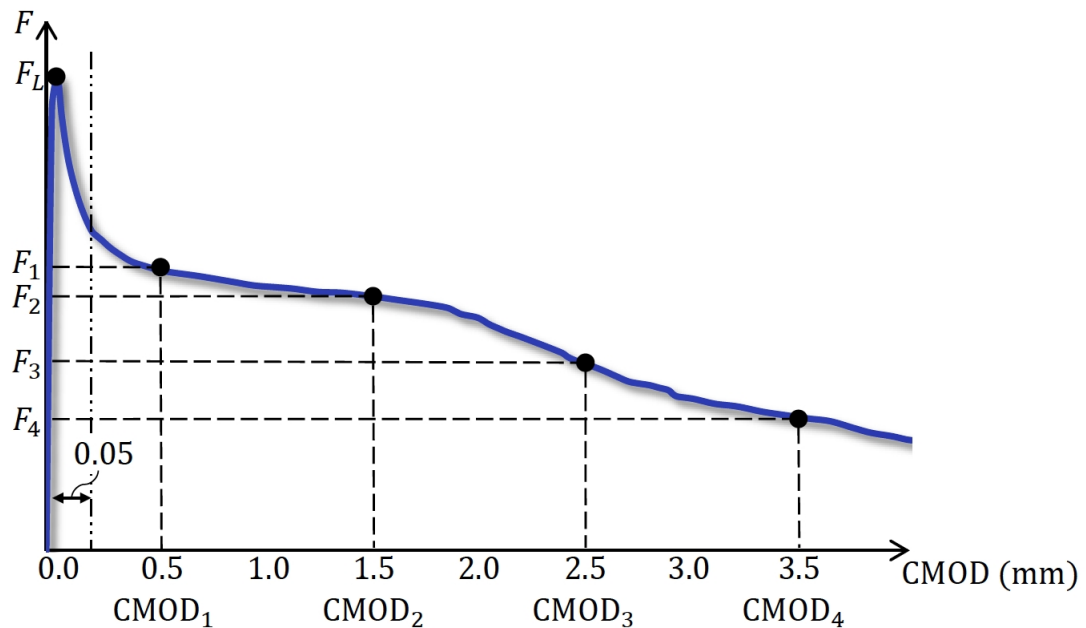
Figura 3.8 – Área de influência do carregamento no espécime definida como zona de interesse na análise por CID.



Fonte: Adaptado de Galeote et al., 2017.

A Figura 3.9 exemplifica o perfil de uma curva carga por abertura de fissura fornecida pelo ensaio EN 14651 (2007) para concreto reforçado com fibras, sendo utilizada para caracterização do comportamento mecânico do compósito.

Figura 3.9 – Curva típica obtida por meio do ensaio EN 14651 (2007) para CRF.



Fonte: Adaptado de Trindade, 2018.

As resistências correspondentes aos Estados Limite Último ($f_{R,3}$) e de Serviço ($f_{R,1}$) são extraídas do gráfico de ensaio (ver Figura 3.9), de acordo com as aberturas 2,5 mm e 0,5 mm, respectivamente, sendo calculadas de acordo com a Equação 3.4 .

$$f_{R,j} = \frac{3 \cdot F_j \cdot l}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2} \quad (3.4)$$

Onde:

$f_{R,j}$: é a resistência residual à flexão correspondente à abertura de fissura j , onde $j = 0.5, 1.5, 2.5$ ou 3.5 mm - $f_{R,1}, f_{R,2}, f_{R,3}$ e $f_{R,4}$, respectivamente, em *MPa*;

F_j : carga correspondente à abertura de fissura j , em *N*;

F_L : carga máxima de ensaio no intervalo de abertura de fissura de 0 a 0,05 mm, em *N*. Utilizada para o cálculo da resistência a partir da carga máxima nesse intervalo de abertura de fissura, sendo está resistência definida como Limite de Proporcionalidade (*LOP*);

l : vão de ensaio, em *mm*;

b : largura do corpo de prova, em *mm*;

h_{sp} : distância entre o topo do entalhe e a face superior do corpo de prova, em *mm*, ver Figura 3.4.

Após a definição das resistências residuais à flexão devem ser obtidos os valores característicos desses parâmetros para avaliação da performance desses compósitos, segundo as

recomendações do Fib Model Code 2010 (2013), por meio da Equação 3.5.

$$f_{ctk} = f_{ctm} - k_x \cdot sp \quad (3.5)$$

Sendo:

f_{ctk} : resistência característica a flexão;

f_{ctm} : resistência média a flexão;

k_x : coeficiente dependente do número de amostras (n) do ensaio (Tabela 3.2);

sp : desvio padrão.

Tabela 3.2 – Valores do coeficiente k_x de acordo com o número de amostras n .

n	1	2	3	4	5	6	8	10	20	30	∞
k_x	2,31	2	1,9	1,8	2	1,8	1,7	1,7	1,7	1,7	1,6

Fonte: Adaptado de RILEM TC 162-TDF, 2003.

Utilizando os valores característicos o desempenho do compósito é avaliado por meio da relação $f_{R,3k}/f_{R,1k}$. Para classificar o CRF, o valor de $f_{R,1k}$ pode ser definido de acordo com as seguintes classes: 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0 e 8,0 MPa; e a razão $f_{R,3k}/f_{R,1k}$ é representada pelas letras a, b, c, d, e, conforme indicado na Tabela 3.3. Caso atendam as Equações 3.6 e 3.7, as fibras podem substituir as barras ou telas metálicas, total ou parcialmente.

Tabela 3.3 – Classes de resistências residuais $f_{R,3k}/f_{R,1k}$, obtidas pelo ensaio EN 14651 (2007).

Letra	Condição
a	$0,5 \leq f_{R,3k}/f_{R,1k} \leq 0,7$
b	$0,7 < f_{R,3k}/f_{R,1k} \leq 0,9$
c	$0,9 < f_{R,3k}/f_{R,1k} \leq 1,1$
d	$1,1 < f_{R,3k}/f_{R,1k} \leq 1,3$
e	$1,3 < f_{R,3k}/f_{R,1k}$

Fonte: Adaptado de Fib Model Code, 2010.

$$\frac{f_{R,3k}}{LOP_k} \geq 0,4 \quad (3.6)$$

$$\frac{f_{R,3k}}{f_{R,1k}} \geq 0,5 \quad (3.7)$$

Em que:

$f_{R,1k}$: resistência residual característica do estado limite de serviço correspondente a abertura de fissura de 0,5 mm;

$f_{R,3k}$: resistência residual característica do estado limite último correspondente a abertura de fissura de 2,5 mm;

LOP_k : valor característico de resistência correspondente ao LOP.

Os equipamentos e ambiente de ensaio empregados para análise de danos foram definidos com base em Oliveira (2019), conforme ilustrado na Figura 3.10. Especificamente, para a aplicação da CID foram empregadas:

- Câmera fotográfica:

Tabela 3.4 – Especificações da câmera.

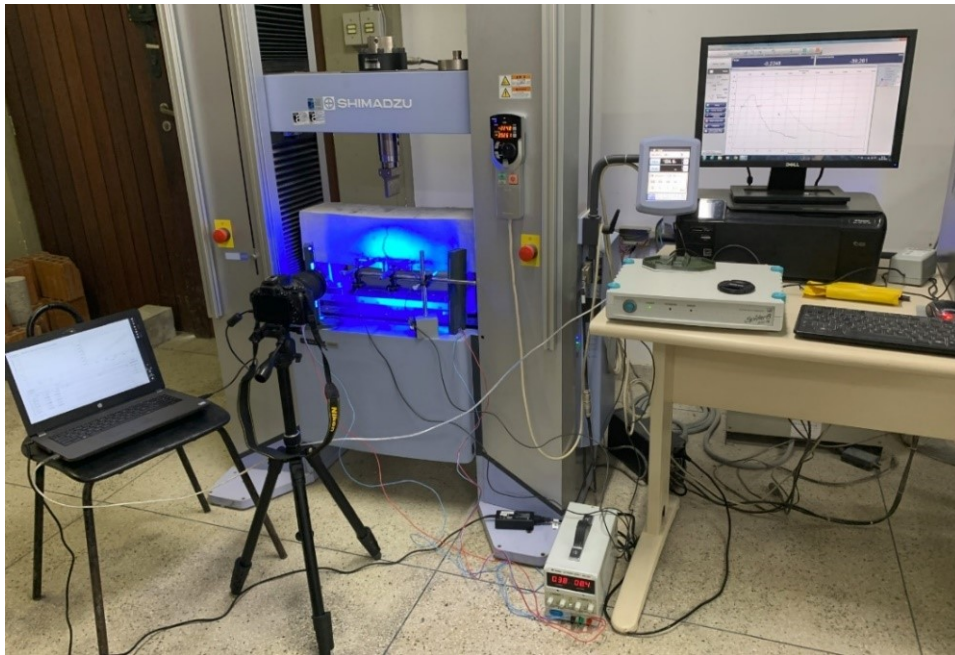
Modelo	Nikon D5500
Tipo de sensor	CMOS
Resolução	6000x4000 (24,2 MP; 3:2)
Sensibilidade	ISO 100-25600
Formato do sensor	DX
Lente	AF-S DX NIKKOR 18-140mm f/3.5-5.6G ED VR
Abertura da lente	Variando de f/3.5-5.6 a f/22-38
Ângulo de visão da lente	76°11'30"

Fonte: Adaptado de <https://www.nikon.com/>.

- Computador: "Acer Aspire E 15: E5 – 573G – 74Q5", que possui um software (*ITOM* - versão 3.1.0), com *script*, para gerenciar e auxiliar no processamento das imagens obtidas durante o ensaio de flexão com o método CID.
- Sistema com vários módulos para aquisição de sinais (*Spider 8*);
- Tripé de suporte;
- Fontes de iluminação.

É importante lembrar, que por meio dessa configuração, Oliveira (2019), em seu estudo desenvolvido para avaliar o processo de abertura de fissuras em CAARFA utilizando processamento de imagens digitais, conseguiu resultados significativos, com diferenças percentuais médias de aproximadamente 7,5% em relação aos LVDT's. Logo, pode-se verificar que o processo de avaliação via CID utilizado, que foi criado e está em desenvolvimento pelo Grupo de Pesquisa em Mecânica das Estruturas e Materiais Avançados do CNPq, já apresenta resultados expressivos.

Figura 3.10 – Ambiente de ensaio.



Fonte: Oliveira, 2019.

Na Figura 3.7 pode-se observar que a fonte de iluminação não está direcionada de maneira adequada, ou seja, para a área de influência do carregamento. Além disso, também é constatado que a base magnética está posicionada longe dos LVDT's, ocasionando um maior braço de alavanca, que para medições na casa dos milésimos de milímetros acaba influenciando na quantificação.

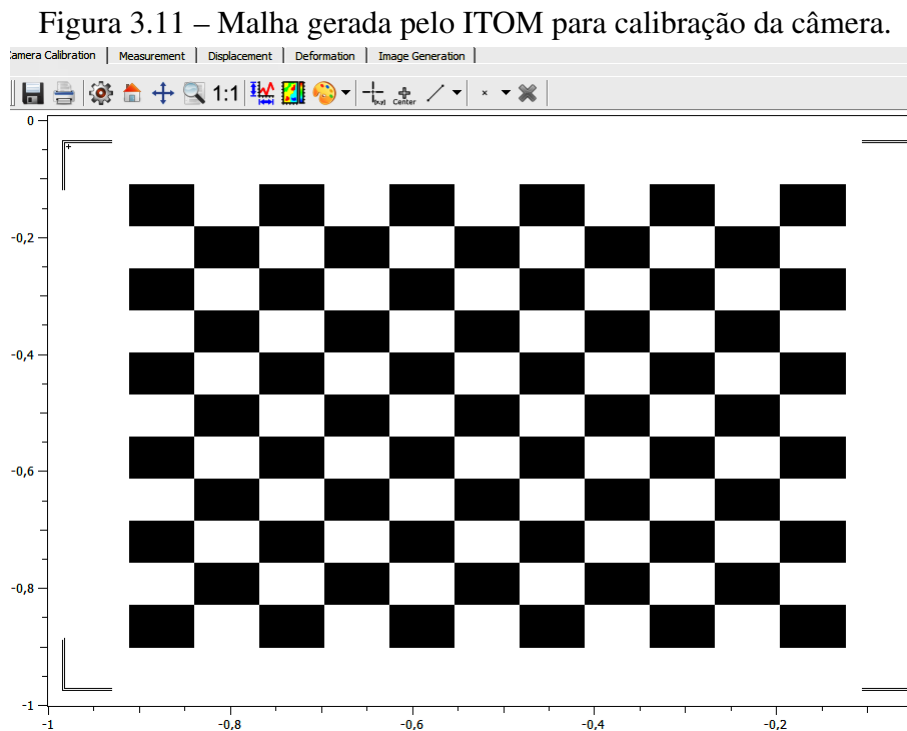
3.2.1 Calibração dos equipamentos

3.2.1.1 Câmera

Um equipamento calibrado garante maior confiança aos dados e minimiza os erros obtidos em procedimentos experimentais, por isso antes de iniciar a captura de imagens é necessário a obtenção do fator de magnificação. O objetivo da calibração é identificar uma matriz de transformação de coordenadas que converta os pontos da imagem para as coordenadas do mundo real. Primeiro, é realizado o ajuste focal, incluindo abertura da lente, com o intuito de obter medidas de posição e tamanho de objetos no ambiente, onde comumente é empregado como região de interesse para definição do ajuste focal a área de análise, ou sub-região.

Para este estudo, a zona de interesse definida foi a região com entalhe. O entalhe induzirá o posicionamento das fissuras no espécime, garantindo assim que as mesmas estejam na região de análise. Tendo definido o ajuste focal, o foco da câmera é setado para o manual, e daí vem a segunda etapa deste procedimento, feito no software *ITOM*, no qual é fornecido o valor do *Pixel Pitch*, que nada mais é que o valor da distância entre dois pixels em um monitor e da máquina fotográfica utilizada, e, de posse dessa informação, o programa gerou

um Checkerboard caracterizado por uma malha xadrez, conforme apresenta a Figura 3.11, responsável pela obtenção de parâmetros intrínsecos da câmera ligados ao foco da câmera, ao fator de escala e ao centro da imagem. O modelo adotado para o processo de calibração é o *PinHole*, ou modelo do orifício, que considera que a câmera é formada por uma caixa com orifício pequeno, capaz de projetar a imagem ortogonal ao furo no interior da caixa. Para maiores detalhes a respeito desse modelo, consultar Pinto (2012).



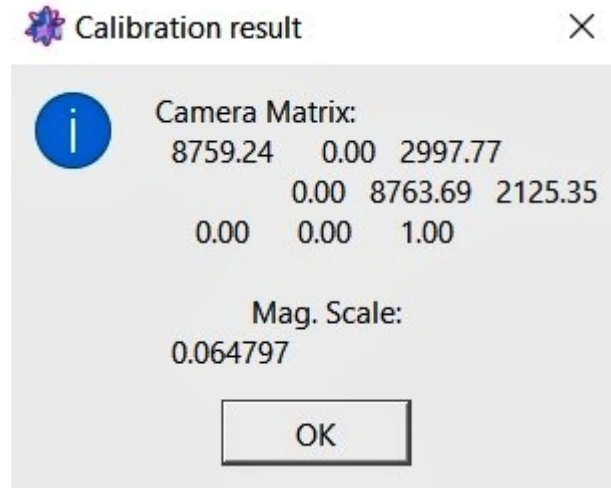
Fonte: Autor, 2020.

Em seguida, sem alterar nenhuma das configurações da câmera, foram obtidas imagens dessa malha, variando o ângulo de obtenção. Oliveira (2019) recomenda utilizar dez imagens nessa etapa. Transferem-se as fotografias para o computador, o software reconhece cada uma delas, uma a uma são realizadas marcações com o objetivo de verificar o tamanho do objeto com base da distância focal definida. O fator de conversão é a razão entre a média do vetor de translações e o ponto médio dos comprimentos focais da objetiva. O vetor de translações indica a posição do sistema de coordenadas do mundo real, enquanto os comprimentos focais indicam as distâncias entre os pontos focais da lente ao objeto.

Após essa etapa, o computador realiza o cálculo da calibração e gera um arquivo com o fator de magnificação, sendo utilizado posteriormente, para conversão de pixels em milímetros, com isso, a câmera está pronta para o início do ensaio. O intuito desse segundo ajuste é determinar o que um pixel na imagem corresponde em milímetros no ambiente. Esse parâmetro é fornecido por meio de um arquivo de calibração gerado pelo *ITOM*, que possui um fator de escala associado de pixel para milímetro. A Figura 3.12 apresenta o resultado do processo de calibração gerado no *ITOM* para as vigas monolíticas de CAARFA, onde a variável *Mag. Scale* representa o fator

de conversão pixel-milímetro. Os resultados das calibrações para os elementos em dupla e tripla camada constam no Anexo A.

Figura 3.12 – Resultado do processo de calibração no ITOM para o primeiro lote, em pixel/mm.



Fonte: Adaptado de Oliveira, 2019.

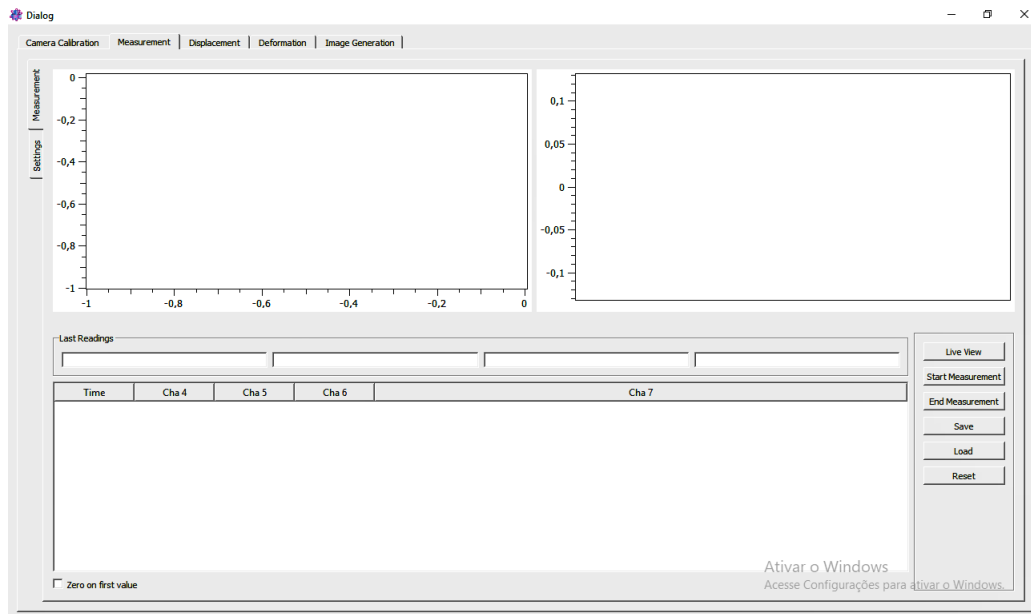
3.2.1.2 LVDT's

Obtido o fator de conversão de pixels para milímetros foi necessário calibrar os LVDT's que posteriormente foram posicionados em cantoneiras metálicas para validação do controle de abertura de fissura. Para realizar a calibração dos LVDT's foram realizadas as seguintes etapas: colocação da base com suporte magnético, instalação do LVDT, ajuste do posicionamento do suporte de aplicação de carga através de uma máquina de ensaio marca Shimadzu, modelo Autograph AG-X Plus com capacidade de 100 kN, e em seguida a verificação do padrão de resposta elástica de cada LVDT.

Após a fixação do LVDT na máquina de ensaio, foi verificado se o *ITOM* estava em perfeita comunicação com o LVDT e o *Spider 8*, por meio da aba *Measurement*, conforme apresentado na Figura 3.13. Com a comunicação efetivada, na interface de controle da máquina de ensaio universal da *Shimadzu*, no *Trapezium X*, foi escolhido o ensaio de resistência à compressão. Sendo definidas essas etapas, o suporte de aplicação de carga da máquina foi posicionado próximo ao LVDT por meio do ajuste manual e em seguida, até tocar no mesmo por meio do ajuste automatizado, denominado assim por ser mais sensível.

Com a configuração definida, a calibração enfim teve início. Por meio do ajuste automatizado aplica-se carga no *LVDT* e este por sua vez emite um sinal de resposta em (mV/V) captado pelo *ITOM*. Foi realizado tanto o procedimento de carga como o de descarga para verificar além da calibração o padrão de resposta elástica do elemento. Este procedimento é adotado para ambos os *LVDT's*.

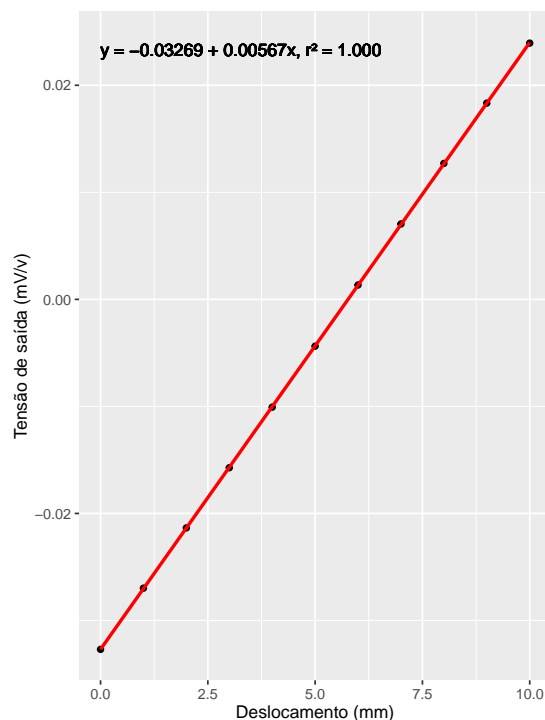
Figura 3.13 – Interface gráfica do ITOM, aba “Measurement”.



Fonte: Autor, 2020.

O processo de calibração apresenta como resultado uma relação deslocamento por sinal de resposta, que foi convertido num gráfico, como representado na Figura 3.14. A Equação apresentada nessa figura é capaz de converter deslocamento em tensão de saída, no entanto é desejável o contrário. Logo, isolando a variável “x” é encontrada a equação de conversão. No Anexo A.2 constam os demais dados e curvas de calibração realizadas no procedimento experimental.

Figura 3.14 – Curva de calibração para o LVDT esquerdo.



Fonte: Adaptado de Oliveira, 2019.

Buscando correlacionar os resultados obtidos com o ensaio EN 14651 (2007) e a aplicação de CID, os valores de deslocamentos foram registrados em tempo real através de um *script* no *ITOM*, com a finalidade de auxiliar no processo de aquisição dos dados gerados pelos LVDT's e das imagens, automatizando a captura de imagens em um determinado intervalo de tempo. Ainda com o auxílio deste *script* foi feito o tratamento das imagens, análises de abertura de fissura, e gerando campos de deslocamentos para instantes antes e após a ruína. Os LVDT's foram conectados a um sistema com diversos módulos para aquisição de sinais analógicos, o *Spider 8*. Desta forma, os sinais enviados pelos LVDT's em mV/V são capturados pelo mesmo, e convertidos em valores pelo *ITOM*. O software *Trapezium X* computou os dados em planilhas de *Excel* que correlacionam o tempo de ensaio, a carga aplicada e o deslocamento vertical do pistão.

Com isto, as etapas de calibração para o procedimento experimental foram concluídas, e o ensaio de flexão pôde assim ser iniciado em conjunto com a captura das imagens.

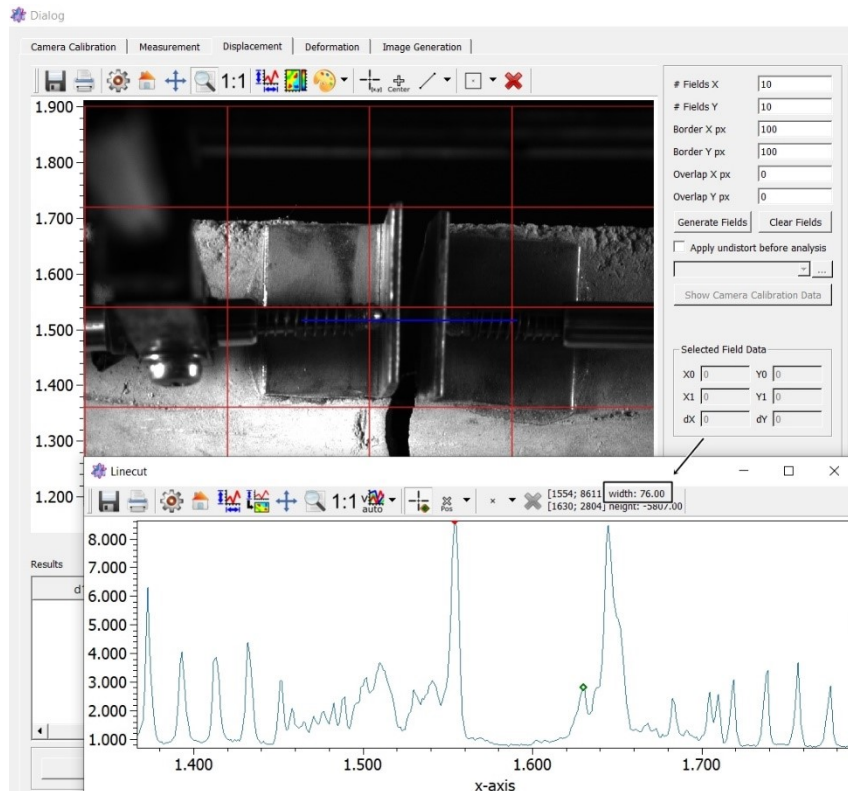
3.2.2 Análise das imagens

Para as vigas monolíticas, ou seja, resultantes da primeira moldagem, o ensaio de flexão de três pontos foi realizado até um deslocamento de 8 mm, tendo um tempo de duração de aproximadamente 44 minutos (2640 segundos). Os LVDT's captaram dados em mV/V que posteriormente foram convertidos em deslocamentos por meio das funções definidas durante o processo de calibração para cada LVDT. Esses dados foram obtidos, aproximadamente, a cada um segundo, gerando por volta de 2700 valores de abertura de fissura para cada uma das vigas deste conjunto, e que posteriormente foram convertidos em deslocamentos verticais.

À medida que o ensaio de flexão foi realizado, imagens eram capturadas da região de interesse do espécime (região com entalhe), num intervalo de 10 segundos. Como os ensaios para este conjunto de vigas duraram em média 2700 segundos, foram geradas aproximadamente 270 imagens para cada viga monolítica analisada. A metodologia adotada para o emprego da técnica de CID neste trabalho seguiu o procedimento estabelecido por Oliveira (2019). Com o intuito de realizar um estudo comparativo, esses dados obtidos foram filtrados através de um intervalo constante de 100 segundos, ao longo de todo o ensaio, já que o *ITOM* ainda não permite uma análise automatizada dessas imagens. Logo, foram utilizadas aproximadamente 27 imagens para análises nestes espécimes monolíticos de CAARFA. Para cada uma dessas imagens selecionadas foram gerados gráficos que representavam tons de cinza por pixel, de onde foram extraídos os dados de abertura de fissura, ver Figura 3.15.

Na Figura 3.15 é possível observar o gráfico tons de cinza por pixel para a linha em azul (*linecut*) que está posicionada no eixo dos LVDT's. À medida que ocorre a identificação de uma região com diferença de tonalidade o gráfico registra essa alteração. A cantoneira posicionada apresenta uma tonalidade cinza e em seguida há um espaço que representa o *CMOD*. Este espaço possui "coloração preta" e assim o gráfico registra essa informação, no entanto ao fim da abertura de fissura está posicionada outra cantoneira, que como apresenta tonalidade diferente do *CMOD*

Figura 3.15 – Região de análise e gráfico de tons de cinza por pixel para imagem aos 2000 segundos na viga V2.

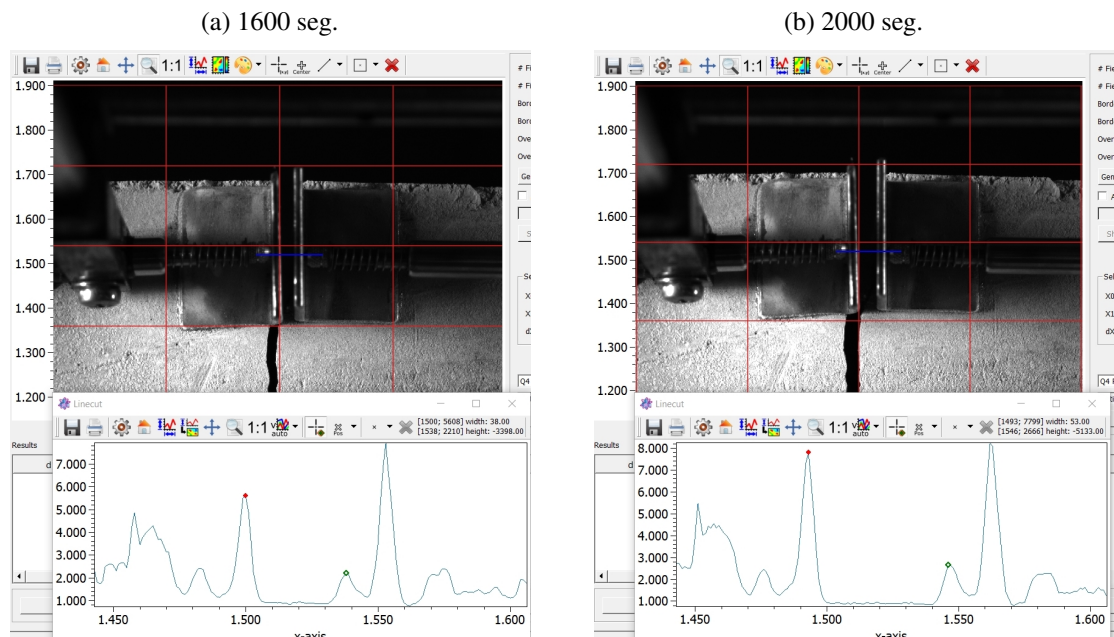


Fonte: Adaptado de Oliveira, 2019.

resulta numa variação do gráfico. Os pontos indicados no gráfico representam as tonalidades registradas devido à presença das cantoneiras, e o intervalo entre eles registra o *CMOD* ou abertura de fissura. No canto superior do gráfico apresentado na Figura 3.15 é indicado o valor em pixel (*width*) que representa a distância entre os dois pontos definidos. Esse valor representa a abertura de fissura que é transformada em milímetros por meio do fator de conversão definido no processo de calibração da câmera, ver Figura 3.12. Com a abertura de fissura quantificada o valor estimado para o deslocamento vertical foi obtido, como propõe a Equação 3.3. Vale ressaltar que o *linecut* ficou fixado para todas as imagens obtidas de uma viga, sendo alterado à medida que outra viga era analisada, variando assim apenas os pontos que registravam a abertura de fissura no gráfico.

Buscando-se avaliar os deslocamentos na Produção 2, o procedimento descrito anteriormente foi aplicado ao conjunto de amostras (dupla camada). A única variação empregada em relação à metodologia descrita foi no controle do ensaio de flexão que para elementos em Dupla Camada ficaram restritos aos 5 mm de deslocamento vertical no ponto central do vão, uma vez que espécimes com estas configurações nunca haviam sido testados no laboratório, tendo assim como intuito resguardar os equipamentos e garantir a segurança durante o ensaio devido, por exemplo, a uma ruptura brusca. Sendo assim, o ensaio de flexão para os elementos em dupla camada durou em torno de 28 minutos (1680 segundos) para cada viga. Como o intervalo definido para captura das imagens também foi de 10 segundos, os elementos em dupla camada

Figura 3.16 – Detalhe da abertura de fissura obtida através da imagem utilizando o ITOM em intervalos diferentes de tempo



Fonte: Adaptado de Oliveira et al., 2018.

geraram cerca de 170 imagens. Mantendo o intervalo de análise constante, cerca de 17 imagens foram analisadas para cada viga ensaiada na Produção 2 com auxílio da ferramenta *linecut*.

Este processo de aferir abertura de fissura foi realizado em todas as vigas, manualmente, imagem por imagem, conforme indicado na Figura 3.15. Finalizando toda esta etapa obteve-se então os deslocamentos verticais em função do tempo em cada viga analisada. Posteriormente, tendo como intuito validar o processamento de imagens na obtenção do deslocamento vertical em vigas ensaiadas à flexão de três pontos, foi realizado um estudo comparativo entre os valores obtidos por cada um dos métodos de controle adotados (*LVDT's* e análise de imagens).

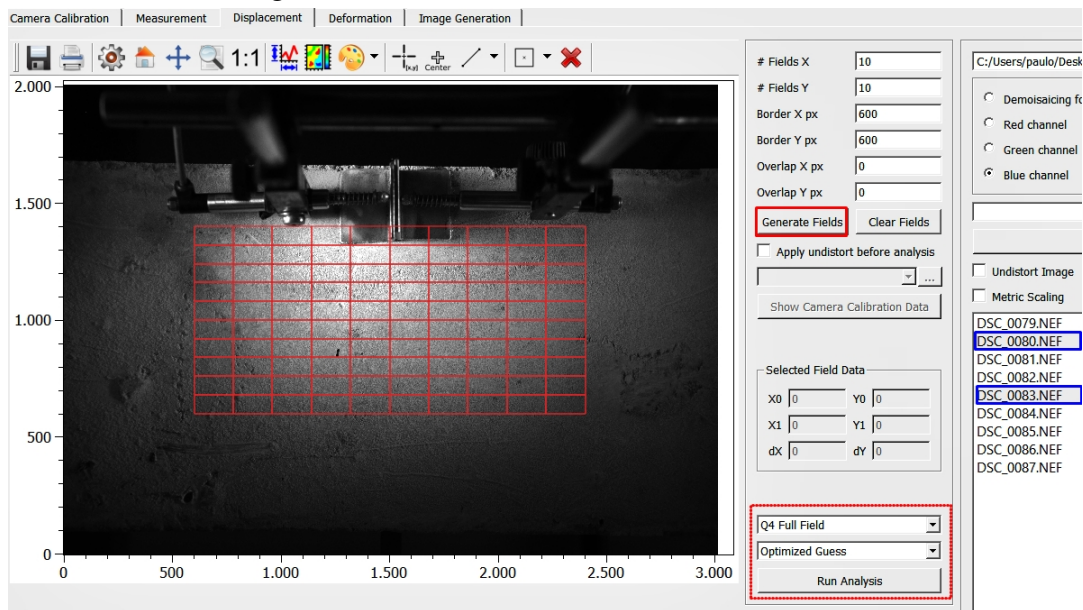
A Figura 3.16 apresenta o detalhe da abertura de fissura obtido durante execução do ensaio de flexão para vigas da Produção P1 em instante diferentes, onde pode-se perceber que a região do “vale”, presente no gráfico de tonalidade de cinza por pixel, aumentou proporcionalmente à medida que a fissura foi evoluindo.

Os campos de deslocamentos e deformações na CID são gerados a partir da correspondência entre pares de imagens obtidas durante o procedimento experimental em determinado intervalo de tempo. Para evitar problemas de decorrelação em função de grandes deslocamentos foram definidos como intervalos de análise três instantes de 10 segundos antes à ruptura e três após, tempo este também utilizado para avaliação da perda de rigidez por meio da abordagem analítica proposta.

A Figura 3.17 apresenta a interface gráfica para geração dos campos cinemáticos para os instantes 770 segundos (*DSC0080.NEF*) e em 800 segundos (*DSC0083.NEF*), sendo este

último o que indica início do processo de fissuração nesta viga. Após selecionadas as imagens é necessário definir o campo de análise por meio do comando *Generate Fields*. Nesse exemplo tem-se uma malha de elementos 10x10, com um recuo de 600 pixels em ambos os lados (direito, esquerdo, inferior e superior), fazendo com que a malha fique centralizada na região designada.

Figura 3.17 – Processo de geração de campos cinemáticos na interface gráfica ITOM



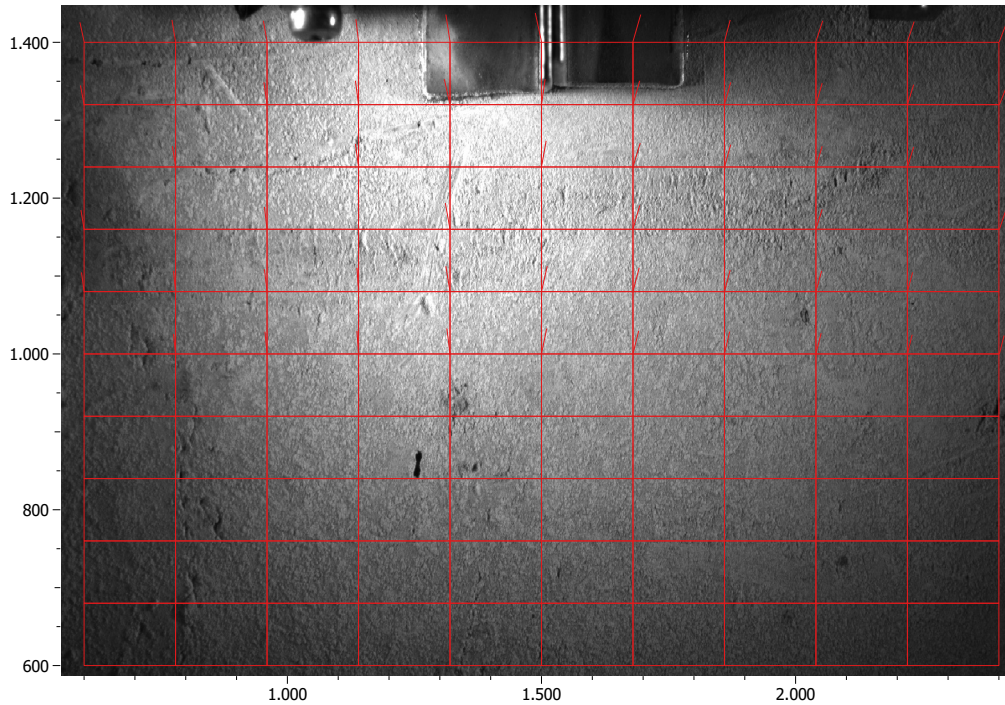
Fonte: Autor, 2020.

Após a definição da malha foi indicado o tipo de elemento para análise abordada nesta CID. Para o desenvolvimento desse estudo foi definido o elemento linear Q4 que indica que cada quadrado dessa malha apresenta quatro pontos de análise ou nós, denominados pontos de Gauss. Os valores de deslocamentos são representados por nó em domínio bidimensional, retornando para este exemplo 121 pontos de análise. Outra opção de elemento é o *sub section* que tem como ponto de análise a região central do quadrado definido para a malha, gerando assim 100 elementos de análise, também em domínio bidimensional, porém em pontos centrais. Como no *ITOM* apenas o elemento Q4 possui implementado os campos de deformação, optou-se pelo mesmo.

Os valores de deslocamentos são fornecidos em componentes x e y, indicados na Figura 3.17 por $d1$ e $d2$, respectivamente. Além disso, é disponibilizado um recurso gráfico capaz de analisar a vetorização dos deslocamentos para cada nó avaliado (ver Figura 3.19).

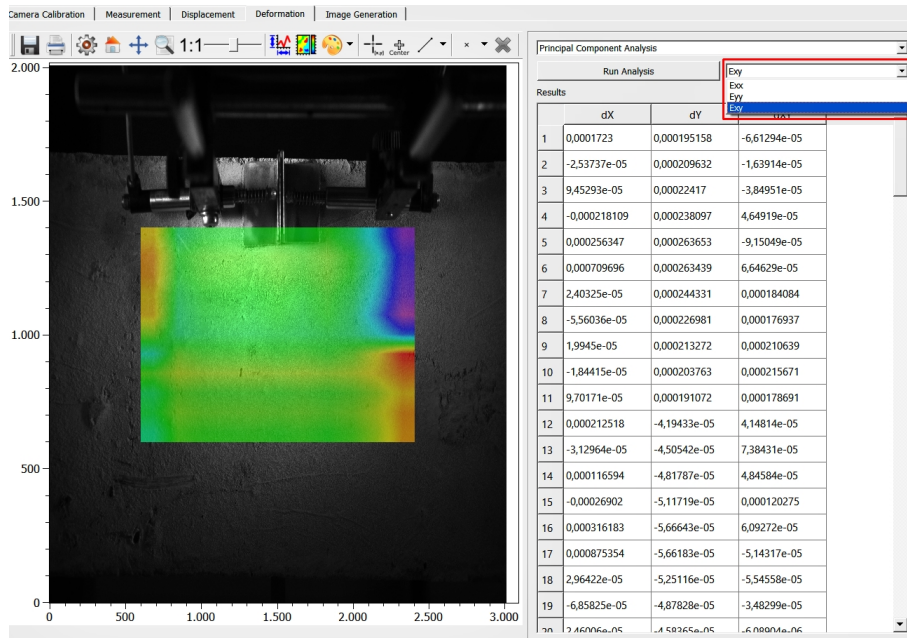
Após a análise dos deslocamentos via *ITOM*, foi realizado a geração dos mapas de cores de deformação nas direções principais por meio da aba "*Deformation*", apresentando os valores de deformação em cada nó nas direções principais. Vale ressaltar que tanto os valores obtidos nos deslocamentos como nas deformações são em pixels e necessitam do fator de magnificação definido no processo de calibração para conversão em milímetros.

Figura 3.18 – Vetores de deslocamentos com base nas imagens nos instantes $t_0 = 770$ e $t_1 = 800$



Fonte: Autor, 2020.

Figura 3.19 – Mapa de cores de deformação ϵ_{xy} com base nas imagens nos instantes $t_0 = 770$ e $t_1 = 800$



Fonte: Autor, 2020.

Resumindo o procedimento experimental, a análise por meio de processamento de imagens buscou quantificação da abertura de fissura, que foi convertida em deslocamento vertical por meio da Equação 3.3 conforme propõe a norma EN 14651 (2007). Com esta variável de interesse definida, é possível estimar a variação da rigidez nos espécimes por meio das Equações

3.1 e 3.2. Posteriormente, foram gerados campos de deslocamento e deformações antes e após a ruína dos espécimes com o intuito de correlacionar essas informações com os valores de rigidez obtidos. A Equação 3.8 representa a obtenção das deformações de acordo com os campos de deformação com base nos valores de deslocamentos nodais.

$$(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Onde:

ε_x = deformação normal na direção da viga;

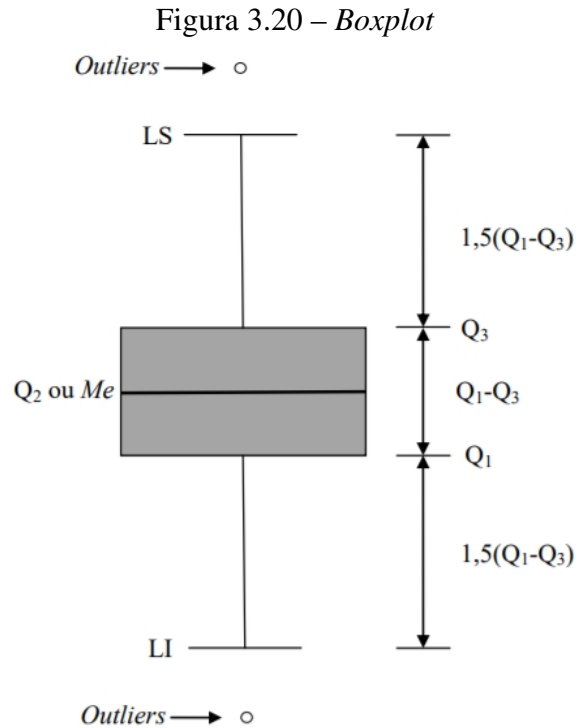
ε_y = deformação normal na direção transversal da viga;

γ_{xy} = deformação tangencial no plano xy ;

3.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

Inicialmente, foram avaliadas as linearidades dos valores de deslocamentos obtidos pela CID e pelos LVDT's através de regressão linear. Além disso, foi apresentado o erro absoluto entre as duas técnicas de medição, incluindo uma análise gráfica com uso de *Boxplot*, ou gráfico de caixa.

Craveiro e Souza (2014) explicam que o *Boxplot* representa medidas de dispersão estatística que dividem um conjunto de dados em quatro partes iguais denominadas de *quartis*. Logo, existem três quartis: o primeiro quartil (Q_1), o segundo quartil (Q_2) que corresponde a mediana, e o terceiro quartil (Q_3). Utilizando o *Boxplot* é possível identificar valores máximos e mínimos dos dados observados, os valores dos quartis, se existe ou não simetria entre as observações, variância entre os dados ou entre grupos de dados, e a presença de dados discrepantes, também chamados de *outliers*. A Figura 3.20 apresenta um gráfico de caixa e seus elementos constituintes.



Fonte: Adaptado de Craveiro & Souza, 2014.

Onde:

Outliers: dados discrepantes;

LI: Limite inferior;

LS: Limite superior;

Q_1 : 1° Quartil;

Q_2 : 2° Quartil;

Q_3 : 3° Quartil;

Me: Mediana;

$Q_1 - Q_3$: Distância interquartílica;

Logo após a acurácia dos valores de deslocamentos, foram empregados testes estatísticos para investigar se as variações de rigidez, antes e após a ruína, foram significativas, seguindo o roteiro estabelecido por Carvalho (2015a).

Nesse roteiro, Carvalho (2015a) primeiro aplica o teste de Shapiro-Wilk para verificar se as amostras em análise provêm de uma distribuição normal, onde o critério de normalidade pode ou não ser atendido.

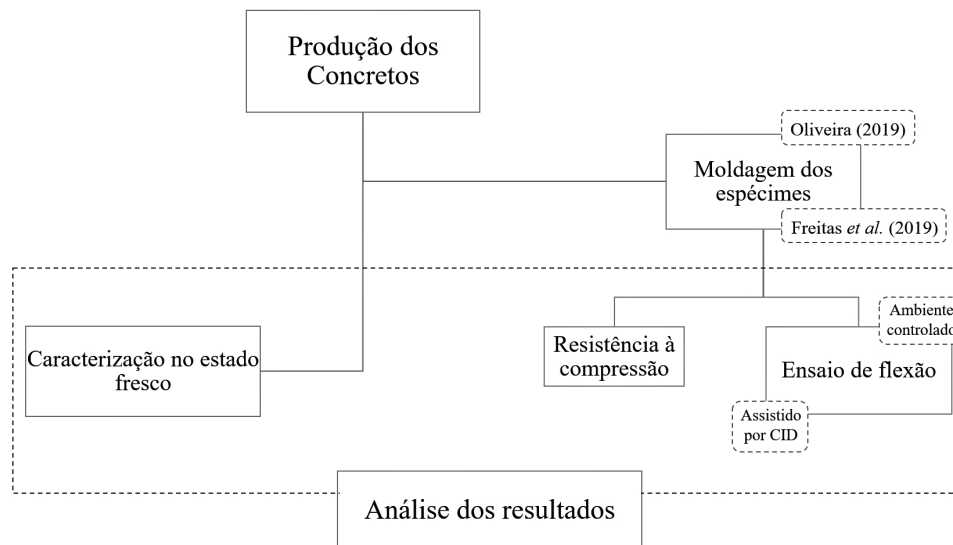
Para o caso de análise de dois grupos e com critério de normalidade atendido, aplica-se o teste F para verificar se as variâncias das amostras devem ser consideradas iguais. Esta condição deve ser aceita no caso de aceitação da hipótese nula do teste. Do contrário, as variâncias devem

ser consideradas diferentes. A seguir, aplica-se o teste t para verificar igualdade entre médias, atentando-se para a variabilidade do modo de aplicação do teste de acordo com a igualdade ou não das variâncias. Caso a hipótese nula do teste deva ser aceita, as médias devem ser consideradas iguais. Do contrário, elas devem ser consideradas diferentes.

Para o caso de análise de mais de dois grupos e com o critério de normalidade atendido, aplica-se o teste de Bartlett para verificar se as variâncias das amostras devem ser consideradas iguais. A seguir, aplica-se o teste de Tukey para verificar igualdade entre médias dos grupos, atentando-se para a variabilidade do modo de aplicação do teste de acordo com a igualdade ou não das variâncias. Caso a hipótese nula do teste deva ser aceita, as médias devem ser consideradas iguais. Do contrário, elas devem ser consideradas diferentes.

Nos casos em que não for verificada a normalidade, aplica-se o teste de Kruskal-Wallis, válido para grupos múltiplos, para verificar igualdade entre médias. Caso o teste conclua que a hipótese nula deva ser aceita, as médias devem ser consideradas iguais. Do contrário, são consideradas diferentes. Por fim, a Figura 3.21 apresenta o fluxograma definido para o procedimento experimental.

Figura 3.21 – Fluxograma do programa experimental.



Fonte: Autor, 2020.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos durante o procedimento experimental para os dois lotes ensaiados. Conforme mencionado nas delimitações do trabalho, os espécimes possuem formulações convencionais de CAARFA e em dupla camada.

Inicialmente são apresentados os resultados referentes às propriedades dos materiais às duas formulações adotadas. Posteriormente, são apresentados e discutidos valores de deslocamentos verticais no vão central dos espécimes prismáticos, estimados pela relação proposta na EN 14651 (2007) por meio da abertura de fissura que foi quantificada através dos LVDT's e da técnica CID. Logo mais, é discutido a respeito do processo de fissuração nesses espécimes. Por fim, é realizado um estudo a respeito da perda de rigidez nos elementos prismáticos através do modelo teórico-analítico proposto e por meio da análise momento-curvatura, correlacionando essas informações com campos cinemáticos gerados antes e após a ruína dos espécimes com auxílio da CID.

4.1 CONCRETO

Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados para caracterização dos concretos autoadensáveis, com e sem fibras, em estado fresco e endurecido, das produções de espécimes formuladas por Oliveira (2019) e Freitas *et al.* (2019). As seguintes propriedades foram determinadas: espalhamento do tronco de cone, tempo de escoamento, índice de estabilidade visual, resistência mecânica à compressão e à tração por compressão diametral.

4.1.1 Caracterização dos concretos em estado fresco

Para cada moldagem foram reservados aproximadamente 15 litros de concreto para os ensaios de caracterização das propriedades de autoadensabilidade dos concretos, onde foi empregado o ensaio de espalhamento, seguindo a norma ABNT NBR 15823-2 (2017). A Tabela 4.1 apresenta os resultados obtidos para a caracterização em estado fresco para os três concretos, onde a Produção 1 e 2 referem-se respectivamente as vigas: 100% com CAARFA, em Dupla Camada (50% de CAA e 50% de CAARFA).

Diante dos resultados apresentados na Tabela 4.1, e com base na norma ABNT NBR 15823 (2017), as produções estão enquadradas dentro do intervalo recomendado pela literatura, apresentando diâmetro final entre 650 e 850 mm e tempo para atingir o diâmetro de espalhamento de 50 cm (T_{500}) entre 3 e 7 segundos. Além do mais, os mesmos estão na classe de espalhamento SF2 e na classe de viscosidade plástica aparente VS 2/ VF 2, sendo desta maneira, adequados aos diversos tipos de aplicações estruturais.

Tabela 4.1 – Resultados da caracterização em estado fresco dos concretos.

Ensaio	Parâmetro	CAARFA - P1	CAARFA - P2	CAA - P2
Método do Cone de Abrams	Espalhamento (mm)	700	748	745
	Tempo de Escoamento (s)	4,0	3,1	3,2
	Índice de Estabilidade Visual	Alt. Estável	Alt. Estável	Estável

Fonte: Adaptado de Oliveira (2019) e Freitas et al.(2019).

Após a verificação da trabalhabilidade, por meio do ensaio de espalhamento, foi realizada uma avaliação visual do aspecto dos concretos, não sendo constatado nenhum problema com a adição das fibras em um teor (em volume) de 0,32% e 0,16% às respectivas linhas de produção mencionadas, estando os concretos coesos e sem afloramento de água, conforme observado na Figura 4.1. Notou-se também uma uniformidade na distribuição das fibras, estando toda a mistura envolta na argamassa.

Figura 4.1 – Consistência do CAA na Produção 2



Fonte: Adaptado de Freitas et al., 2019.

Analisando a trabalhabilidade para os concretos produzidos nas Produções 2 (CAA e CAARFA, respectivamente), percebe-se com base na relação espalhamento por tempo que os CAA apresentaram uma taxa maior que os CAARFA, cerca de 4% na Produção 2, sendo esse incremento, provavelmente, devido à ausência das fibras na mistura, apesar de não ser uma variação significativa.

4.1.2 Caracterização mecânica dos concretos

Em cada produção foram moldados 8 corpos de prova cilíndricos para os ensaios de caracterização mecânica dos concretos, totalizando 24 corpos de prova cilíndricos. Dos 8 corpos de prova utilizados em cada linha de produção, 4 foram destinados para determinação da resistência à compressão e 4 para determinação da resistência à tração por compressão diametral, seguindo as recomendações estabelecidas pelas normas ABNT NBR 5739 (2018) e ABNT NBR 7222 (2011), respectivamente.

Tabela 4.2 – Resistência aos 28 dias para os espécimes, em MPa.

Amostra	CAARFA - P1		CAARFA - P2		CAA - P2	
	Compressão	Tração	Compressão	Tração	Compressão	Tração
CP - 01	46,090	4,62	37,690	4,81	34,675	4,334
CP - 02	45,840	5,06	33,800	4,23	30,758	3,506
CP - 03	46,980	4,25	37,310	4,49	35,071	4,058
CP - 04	46,600	4,30	38,770	4,22	35,281	3,694
Média	46,378	4,558	36,893	4,438	33,946	3,898
S_d	0,511	0,373	2,152	0,278	2,14	0,37
CV (%)	1,102	8,183	5,834	6,265	6,305	9,495

Fonte: Adaptado de Oliveira (2019) e Freitas et al.(2019).

A Tabela 4.2 apresenta os valores de resistência à compressão e à tração, incluindo resistência média à compressão e à tração, desvio padrão (S_d) e coeficiente de variação (CV), para os ensaios realizados nos corpos de prova cilíndricos aos 28 dias.

Em ambas moldagens, foi constatado que a resistência à compressão média superou os 30 MPa mínimos estabelecidos nas dosagens. No entanto, a produção 2 apresentou uma notória queda na resistência à compressão quando comparada com a primeira moldagem, mesmo sendo empregados materiais do mesmo lote. Freitas *et al.* (2019) explicam que essa variação se deve provavelmente à incorporação de ar à mistura, podendo advir da adição das fibras ou pelo superplastificante. Avaliando essa queda de resistência em termos percentuais para os CAARFA constatou-se uma diferença de resistência média à compressão de aproximadamente 20,47% da Produção P2 frente à P1. Ferreira (2019) avaliou a influência da incorporação de ar em concretos autoadensáveis, e constatou em seu estudo que a queda de resistência média à compressão aos 28 dias foi de 41% para C25 com teor de ar incorporado de 9% e de 59% para um teor de 15% no concreto de mesmo traço, em relação ao concreto de referência, ressaltando assim a grande influência exercida pela incorporação de ar na resistência à compressão desses CAA.

Sendo assim, ficou constatado após os ensaios que o ar incorporado causou uma diminuição na resistência à compressão, gerando uma maior dispersão nos resultados obtidos na linha de produção 2, quando comparadas à 1.

É importante destacar na Tabela 4.2 que os resultados obtidos nas duas produções apresentaram desvio padrão da resistência à compressão inferiores a 4 MPa, conforme recomendado pela norma ABNT NBR 12655 (2015) em função do controle rigoroso no preparo do concreto para condição A, aplicável a todas as classes de concreto.

Em relação à resistência à tração, a incorporação de ar não afetou o concreto na Produção 2, estando os valores das produções muito próximas. Nos espécimes de CAARFA rompidos durante o ensaio de tração, não ocorreu bipartição ou desintegração dos corpos de prova, e os

mesmos após rompidos permaneceram unidos graças as fibras. Já aos CAA, como não havia a presença de reforço (fibras), os CP's quando submetidos ao ensaio de tração apresentaram bipartição ou desintegração.

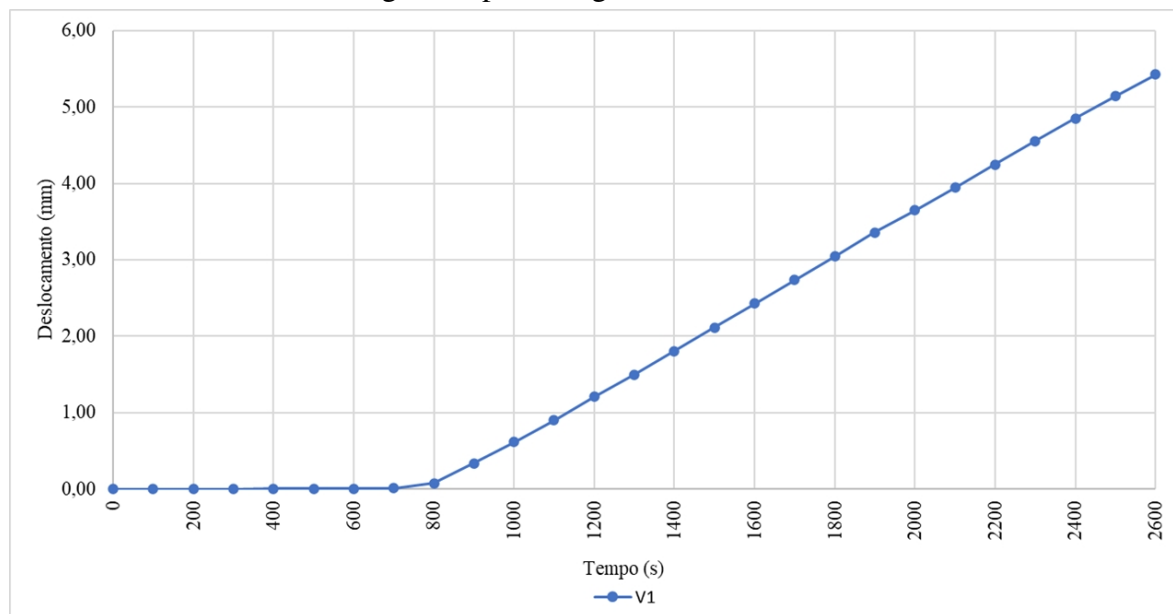
4.2 DESLOCAMENTOS E FISSURAÇÃO

4.2.1 Deslocamentos

Neste trabalho a variável de interesse definida foi o deslocamento vertical que foi estimado com base na Equação 3.3 proposta pela EN 14651 (2007) para obtenção do deslocamento vertical do corpo de prova em função do CMOD. A abertura de fissura foi monitorada com auxílio de dois LVDT's como exemplificado na Figura 3.7.

Como descrito no subtópico 3.2 buscando padronizar os tempos e os deslocamentos gerados, foi adotado um intervalo de 100 segundos para análise dos resultados deste trabalho. A Figura 4.2 apresenta a relação tempo (em segundos) por deslocamento (em milímetros) para uma viga monolítica de CAARFA, levando em consideração o tempo total do ensaio e o intervalo definido (100 segundos).

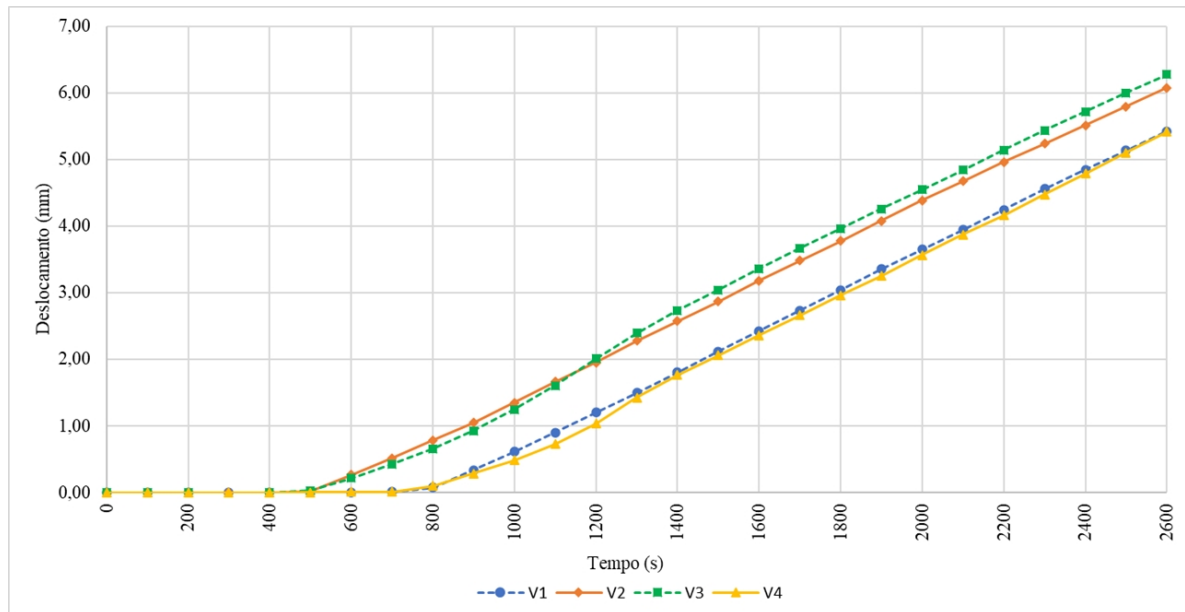
Figura 4.2 – Deslocamento em função do tempo total num intervalo de 100 segundos para a viga V1



Fonte: Autor, 2020.

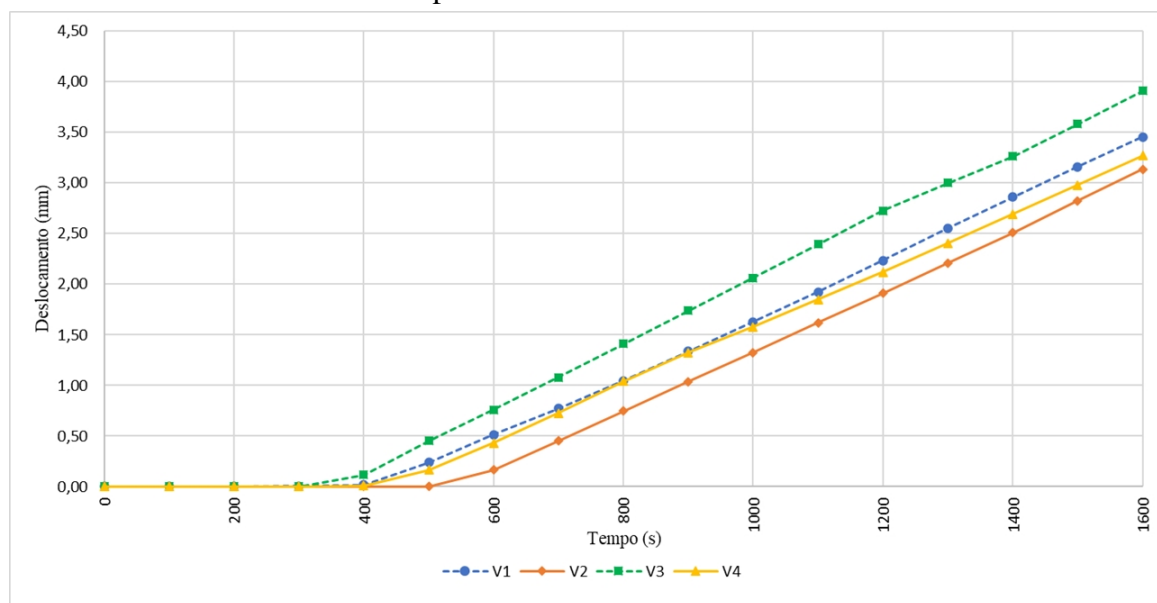
Logo, as demais vigas foram analisadas neste intervalo de tempo (100 segundos), e apresentaram deslocamento vertical com valores fluando entre 5 e 7 milímetros para espécimes da Produção 1 (ver Figura 4.3) e entre 3,5 e 4,2 milímetros para elementos em dupla camada (ver Figura 4.4). Vale lembrar que o controle de ensaio baseado no deslocamento vertical definido nos dois grupos de análise foi diferente, sendo de 8 mm para espécimes monolíticos e de 5 mm para elementos em dupla camada.

Figura 4.3 – Curvas sobrepostas “tempo x deslocamento” para espécimes monolíticos de CAARFA



Fonte: Autor, 2020.

Figura 4.4 – Curvas sobrepostas “tempo x deslocamento” para espécimes em dupla camada



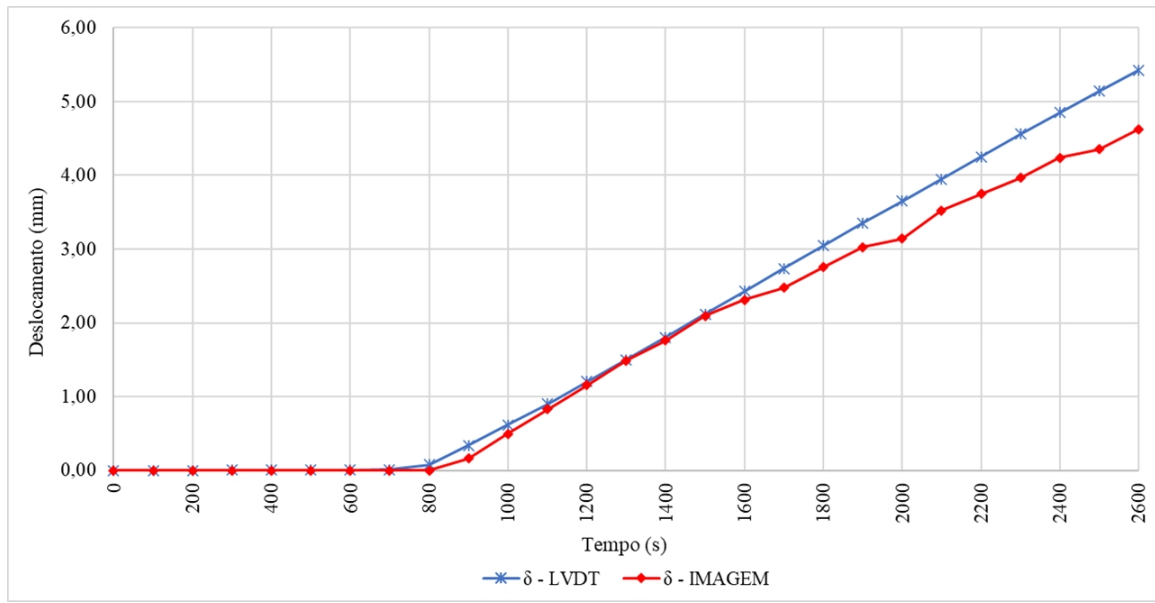
Fonte: Autor, 2020.

Ainda na Figura 4.2 percebe-se que até por volta dos 800 segundos não ocorreu variação significativa de deslocamentos, uma vez que a abertura de fissura quantificada a partir do entalhe também não sofreu variação significativa, estando estes deslocamentos associados ao termo constante da Equação 3.3 (0,04 mm). Assim, os deslocamentos só tiveram um incremento significativo à medida que a abertura de fissura foi quantificada, dando um indicativo do início do processo de fissuração.

Buscando avaliar comparativamente os deslocamentos estimados por meio da abertura

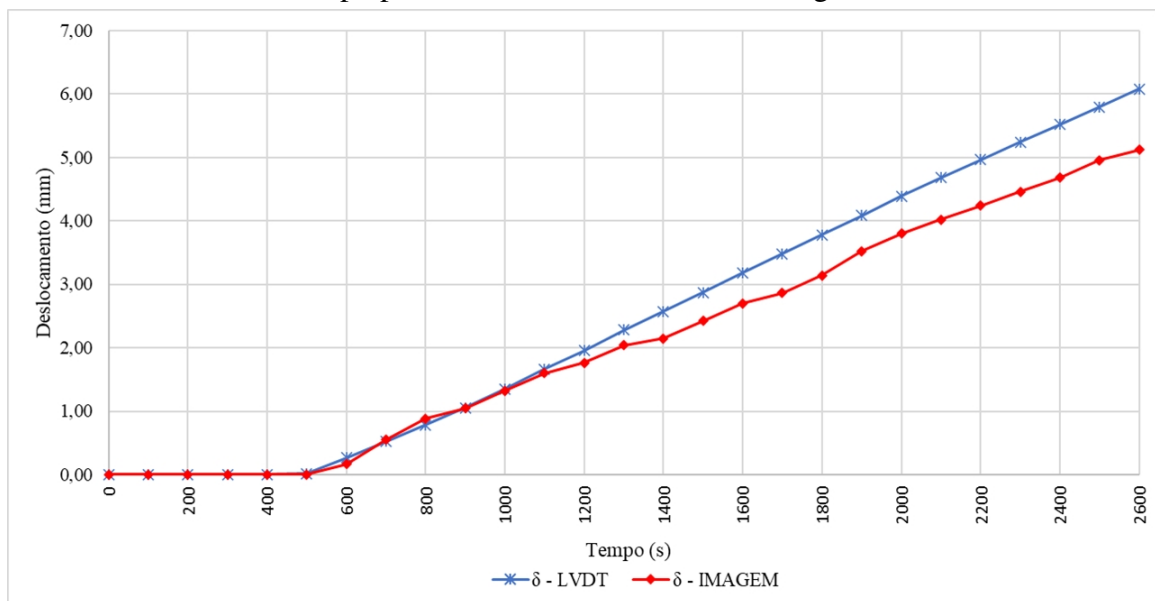
de fissura que foi monitorada através dos LVDT's e da análise de imagens (via processamento de imagens), as Figuras 4.5 até 4.12 apresentam curvas sobrepostas “tempo x deslocamento” dos espécimes analisados nas Produções 1 e 2, representando os deslocamentos estimados a partir dos LVDT's e por meio de processamento de imagens.

Figura 4.5 – Análise gráfica dos deslocamentos obtidos em função do tempo por meio de LVDT's e de CID: Viga MON V1



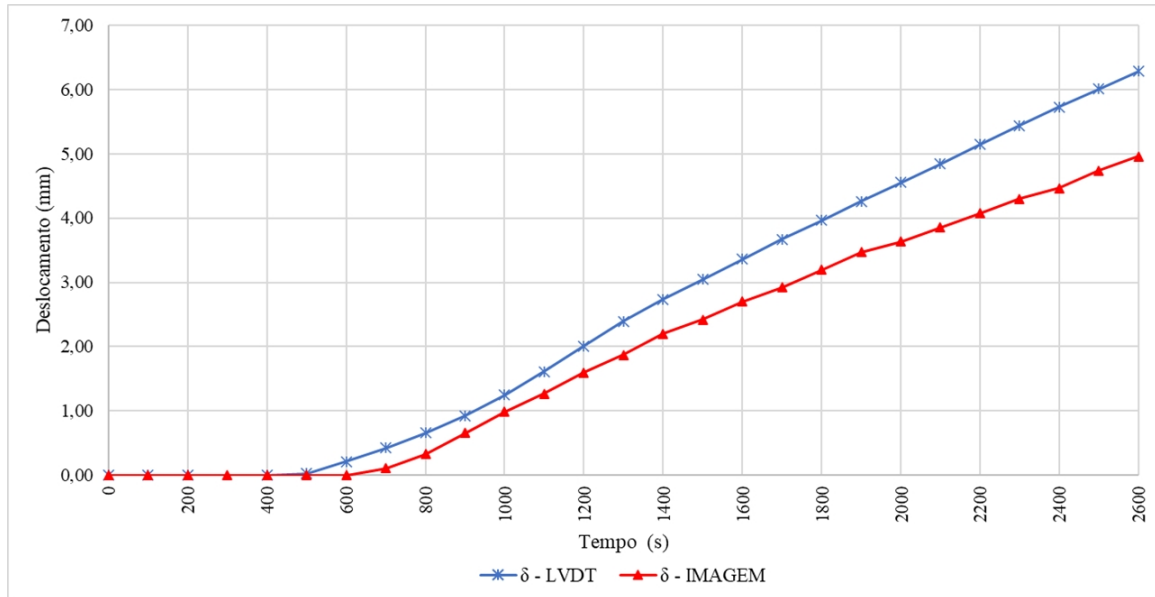
Fonte: Autor, 2020.

Figura 4.6 – Análise gráfica dos deslocamentos obtidos em função do tempo por meio de LVDT's e de CID: Viga MON V2



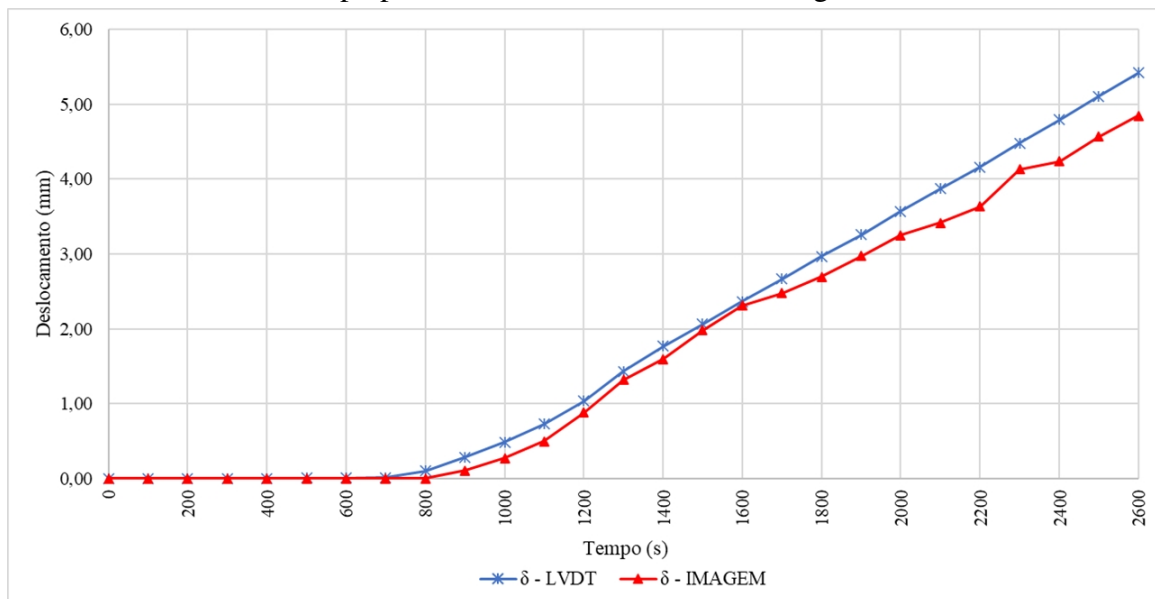
Fonte: Autor, 2020.

Figura 4.7 – Análise gráfica dos deslocamentos obtidos em função do tempo por meio de LVDT's e de CID: Viga MON V3



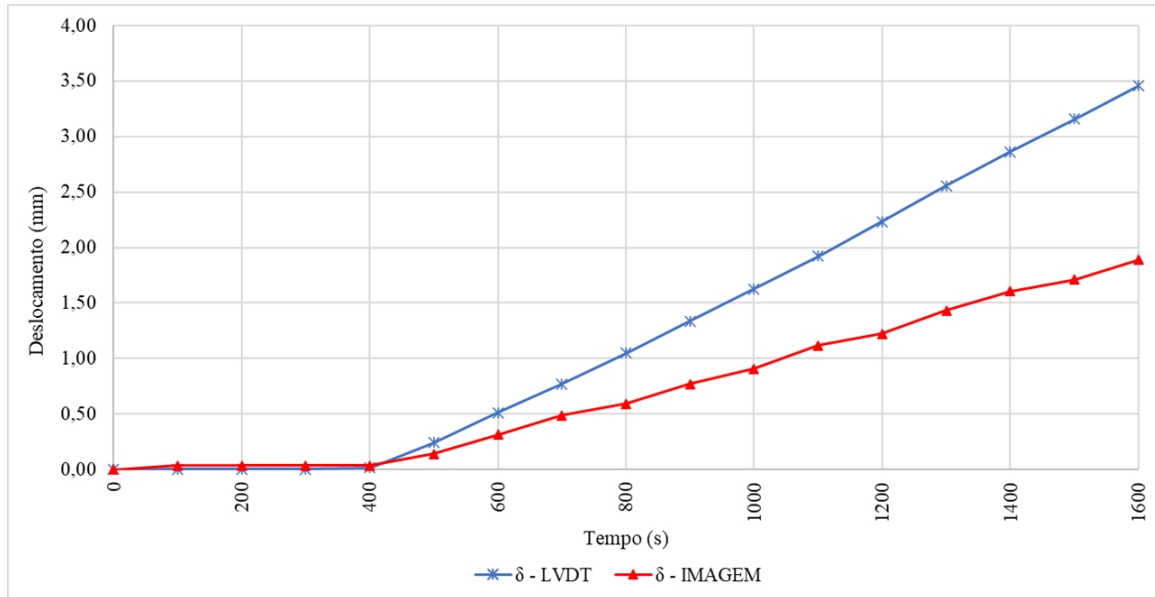
Fonte: Autor, 2020.

Figura 4.8 – Análise gráfica dos deslocamentos obtidos em função do tempo por meio de LVDT's e de CID: Viga MON V4



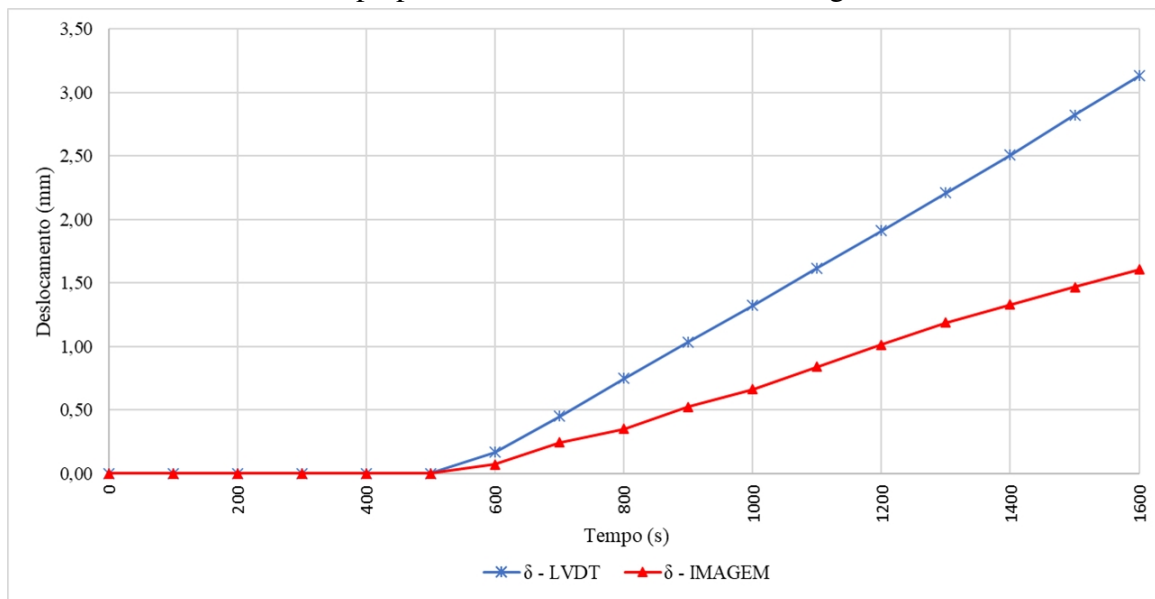
Fonte: Autor, 2020.

Figura 4.9 – Análise gráfica dos deslocamentos obtidos em função do tempo por meio de LVDT's e de CID: Viga DC V1



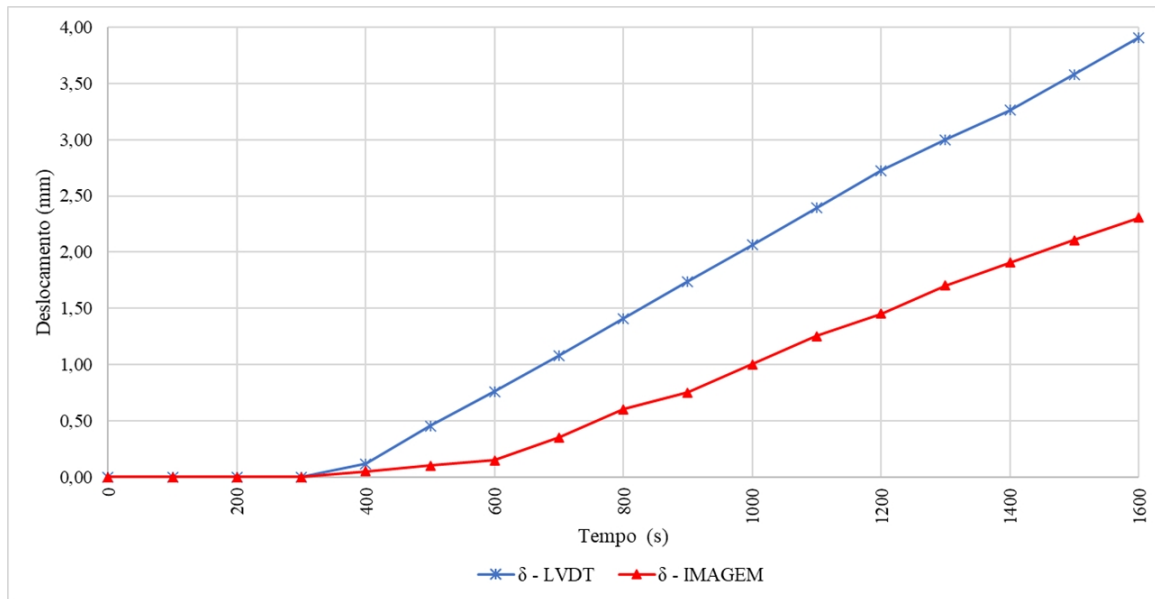
Fonte: Autor, 2020.

Figura 4.10 – Análise gráfica dos deslocamentos obtidos em função do tempo por meio de LVDT's e de CID: Viga DC V2



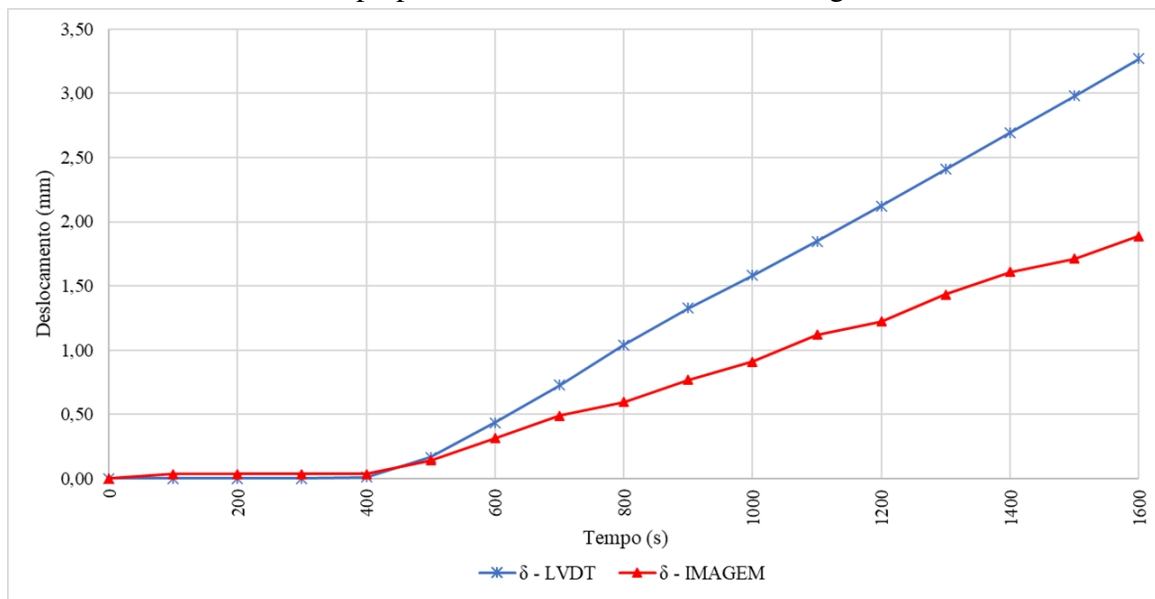
Fonte: Autor, 2020.

Figura 4.11 – Análise gráfica dos deslocamentos obtidos em função do tempo por meio de LVDT's e de CID: Viga DC V3



Fonte: Autor, 2020.

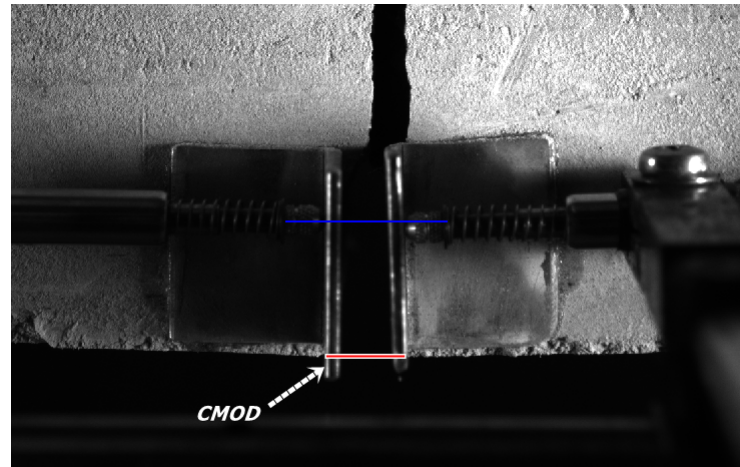
Figura 4.12 – Análise gráfica dos deslocamentos obtidos em função do tempo por meio de LVDT's e de CID: Viga DC V4



Fonte: Autor, 2020.

O deslocamento adotado como controle para o ensaio de flexão nas vigas foi de 8 mm para espécimes monolíticos e de 5 mm para elementos em dupla camada, no entanto, para todas as vigas monitoradas deslocamentos estimados estão abaixo destes valores, variando entre 5 a 7 mm na Produção 1, e entre 3,2 e 4,0 mm aos elementos da Produção 2. Isso pode ser explicado tanto devido ao posicionamento dos LVDT's, que tecnicamente não estão quantificando a real abertura da boca da fissura (CMOD), ver Figura 4.13, como pela própria conversão proposta pela EN 14651 (2007), já que esta relação é obtida experimentalmente.

Figura 4.13 – Abertura de fissura medida (linha em azul – linecut) e abertura de boca de fissura (linha em vermelho).



Fonte: Autor, 2020.

Para quantificar a diferença entre os deslocamentos mensurados por meio das duas técnicas, foi realizado um comparativo entre os dados medidos na mesma região dos LVDT's e do *linecut*, conforme indicado na Figura 4.13. Nas Figuras 4.5 à 4.12 foi constatado que os deslocamentos só tiveram um incremento significativo à medida que a abertura de fissura foi quantificada, por volta dos 500 a 800 segundos para os espécimes monolíticos de CAARFA, e por volta dos 400 aos 500 segundos para elementos em dupla camada, dando assim um indicativo do início do processo de fissuração. Oliveira (2019) comenta que devido à alta sensibilidade dos LVDT's, captando pequenos deslocamentos que estão na casa dos milésimos de milímetro, há uma diferença significativa na medição. No entanto, com base nos dados apresentados tem-se que a medição direta por processamento de imagem estava quantificando o espaçamento entre as cantoneiras, antes ao início do processo de fissuração, explicando assim essa variação, sendo esse espaçamento desconsiderado na geração dos gráficos "tempo x deslocamento".

Nas Tabelas 4.3 e 4.4 são apresentadas as diferenças percentuais dos deslocamentos estimados através das duas técnicas em função do tempo para os espécimes analisados em ambas produções. Os valores iniciais não foram incluídos pois apresentam variações altas já que a CID quantifica o espaçamento entre as cantoneiras, enquanto os LVDT's a abertura de fissura.

Tabela 4.3 – Diferença percentual entre LVDT's e Imagem para espécimes monolíticos, unidades em %.

Tempo (s)	V1	V2	V3	V4
900	51,24	0,51	28,76	61,36
1000	19,78	2,11	20,59	43,42
1100	8,44	3,97	21,34	32,18
1200	4,15	9,84	20,63	15,18
1300	0,82	10,74	21,82	7,59
1400	2,34	16,59	19,45	9,70
1500	1,18	15,51	20,35	4,02
1600	4,71	15,23	19,39	9,07
1700	9,46	17,78	20,46	7,03
1800	9,54	16,91	19,39	9,07
1900	9,75	13,62	18,56	8,68
2000	13,98	13,38	20,09	8,94
2100	10,67	14,02	20,39	11,84
2200	11,83	14,55	20,78	12,65
2300	13,02	14,90	20,97	7,75
2400	12,58	15,11	22,03	11,52
2500	15,35	14,47	21,09	10,45
2600	14,76	15,74	21,06	10,62

Fonte: Autor, 2020.

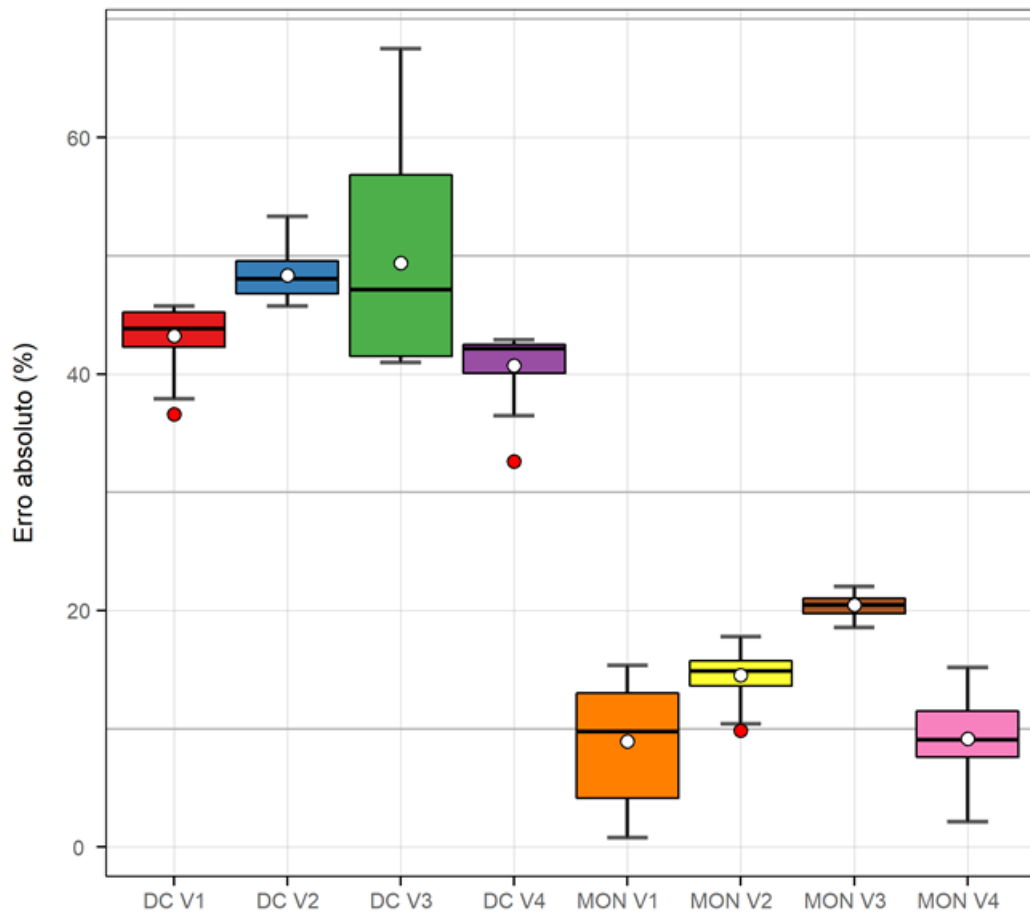
Tabela 4.4 – Diferença percentual entre LVDT's e Imagem para espécimes em dupla camada, unidades em %.

Tempo (s)	V1	V2	V3	V4
700	36,61	45,75	67,51	32,62
800	43,31	53,34	57,29	42,89
900	42,45	49,44	56,71	42,00
1000	44,15	49,85	51,36	42,49
1100	41,83	48,15	47,63	39,45
1200	45,19	46,95	46,64	42,31
1300	43,87	46,25	43,17	40,46
1400	43,80	47,03	41,58	40,29
1500	45,76	47,98	41,18	42,54
1600	45,35	48,68	40,96	42,26

Fonte: Autor, 2020.

A partir das Tabelas 4.3 e 4.4 foi gerado um *BoxPlot* com o intuito de avaliar graficamente esses valores (ver Figura 4.14). Definiu-se o tempo de análise em função do início da estabilização da diferença percentual absoluta entre as técnicas, sendo a partir dos 1200 segundos para as Vigas MON, e a partir dos 700 segundos para os elementos em DC. Além disso, é apresentada na Tabela 4.5 um resumo descritivo com os indicadores para construção do *Boxplot*.

Figura 4.14 – *Boxplot*: análise gráfica do erro absoluto.



Fonte: Autor, 2020.

Tabela 4.5 – Resumo descritivo: análise do boxplot, unidades em %.

Grupos	DC - V1	DC - V2	DC - V3	DC - V4	MON - V1	MON - V2	MON - V3	MON - V4
Mínimo	36,607	45,746	40,960	32,618	0,816	9,836	18,556	2,156
Lim. inferior	37,880	45,746	40,960	36,452	0,816	10,429	18,556	2,156
1° Quartil	42,292	46,772	41,480	40,083	4,150	13,615	19,726	7,592
Média	43,232	48,341	49,403	40,732	8,941	14,558	20,454	9,146
Mediana	43,836	48,062	47,135	42,130	9,749	14,899	20,460	9,066
3° Quartil	45,233	49,547	56,854	42,504	13,018	15,739	21,059	11,522
Lim. superior	45,756	53,340	67,508	42,890	15,351	17,778	22,033	15,177
Máximo	45,756	53,340	67,508	42,890	15,351	17,778	22,033	15,177

Fonte: Autor, 2020.

Como se pode observar, para os espécimes monolíticos analisados a diferença percentual entre as técnicas de medição de deslocamentos ficaram em torno dos 13%, variando entre 8,94% e 20,45%. Já para os elementos em dupla camada apresentaram um erro absoluto médio maior variando entre 40,73% e 49,40%. Os extremos representados no *boxplot* indicam o alcance do conjunto de dados observados. Os pontos indicados em vermelho são denominados de *Outliers*, indicando valores fora do padrão definido no *boxplot*, ou seja, valores fora do limite de tolerância. Além disso, o tamanho da caixa indica a variação dos dados, caixas maiores representam dados mais disperso, e menores indicam que os dados estão mais agrupados.

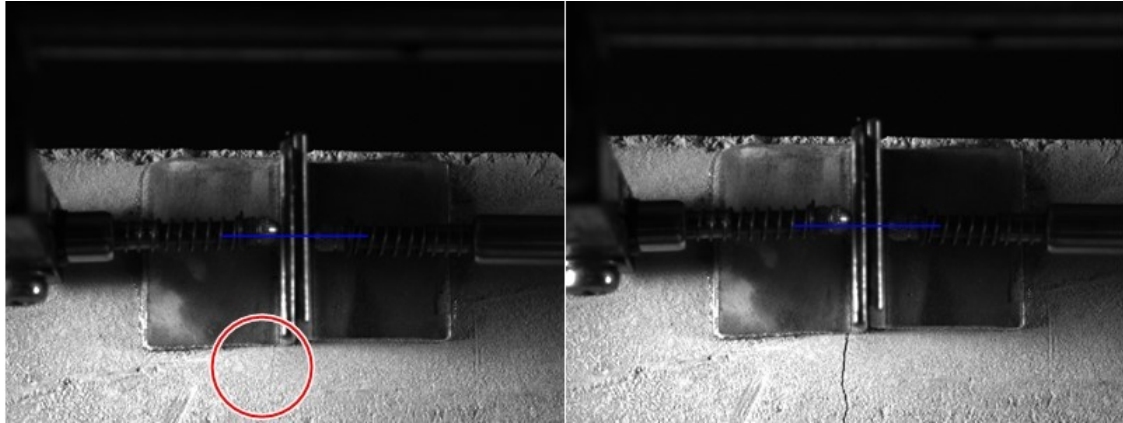
4.2.2 Fissuração

Antes de analisar a perda de rigidez nos espécimes de concretos submetidos à flexão através do modelo teórico-analítico proposto e com base na relação momento-curvatura, fez-se necessário verificar o padrão de fissuração nos espécimes, para que assim fosse escolhida de maneira adequada a equação para estimativa da perda de rigidez baseada na integridade do espécime. A escolha adequada da formulação foi estabelecida com base nos gráficos “Tempo x Deslocamento”, conforme exemplifica as Figuras 4.3 e 4.4, por meio dos gráficos “Carga x Abertura de fissura” e através das imagens adquiridas durante o procedimento experimental, tendo-se assim um indicativo do início do processo de fissuração.

Analisando a Figura 4.2 percebe-se que a Viga MON V1, por volta dos 800 segundos apresentou uma inclinação significativa. A Equação proposta pela EN 14651 (2007) para estimativa do deslocamento vertical corresponde a uma equação de primeiro grau, sendo assim, composta de dois termos, onde o termo independente (0,04 mm) proporciona uma baixa variação no resultado final de deslocamento vertical, sendo este diretamente associado a parcela atribuída pelo *CMOD*. Com isso, pode-se inferir que essa viga teve seu início do processo de fissuração por volta dos 800 segundos, o que foi constatado por meio da análise das imagens obtidas durante o ensaio, ver Figura 4.15. A região em vermelho na Figura 4.15 indica uma leve fissura, constatando o que foi inferido, o surgimento da fissura como apontado no gráfico exposto na Figura 4.2, para esta viga V1 de CAARFA. É importante destacar que o Gráfico “Tempo x Deslocamento” obtido por meio do processo de análise de imagens que também está indicado na Figura 4.3 dá indícios de surgimento da fissura aproximadamente neste mesmo tempo.

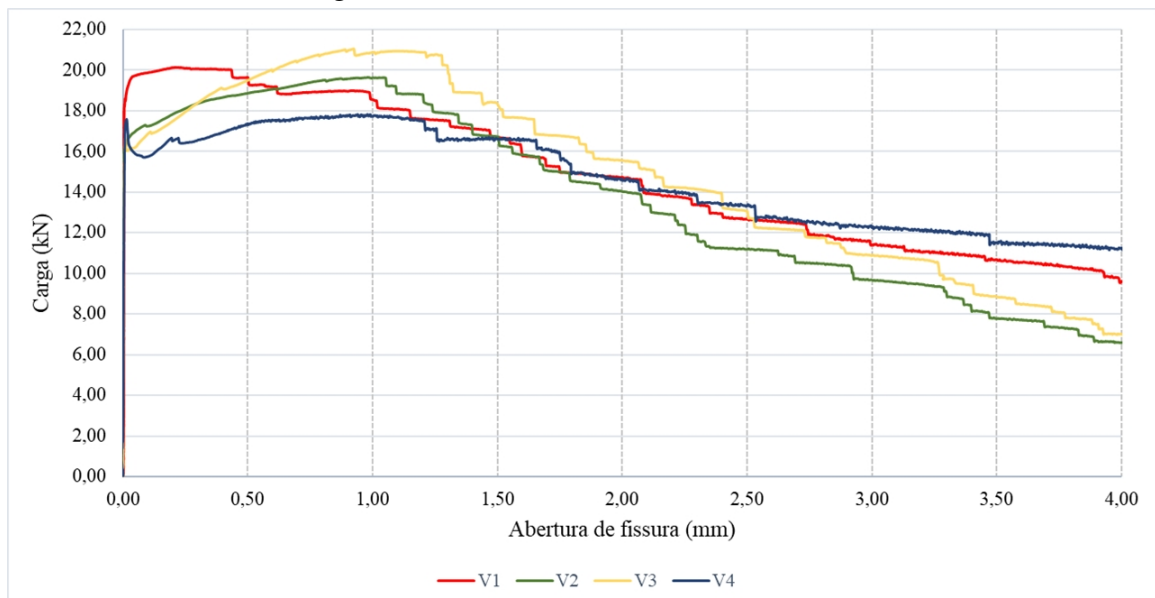
Além dessas informações, por meio do software *Trapezium X* são registrados tempo, carga de aplicação e deslocamento do pistão durante o ensaio de flexão, que podem ser correlacionadas com a abertura de fissura monitorada pelos *LVDT*'s e imagens, fornecendo assim subsídios para determinação das propriedades mecânicas do CAARFA. As Figuras 4.16 e 4.17 apresentam os gráficos “Carga x Abertura de fissura” para os espécimes analisados. Vale frisar que essas curvas poderiam ser geradas com os dados quantificados por meio da análise de imagens (medida de *CMOD*), no entanto o processo ainda é bastante manual, e por isso optou-se por trabalhar com os dados diretos dos *LVDT*'s.

Figura 4.15 – Início do processo de fissuração na viga CON-V1 tempos 800 s (à esquerda) e 900 s (à direita).



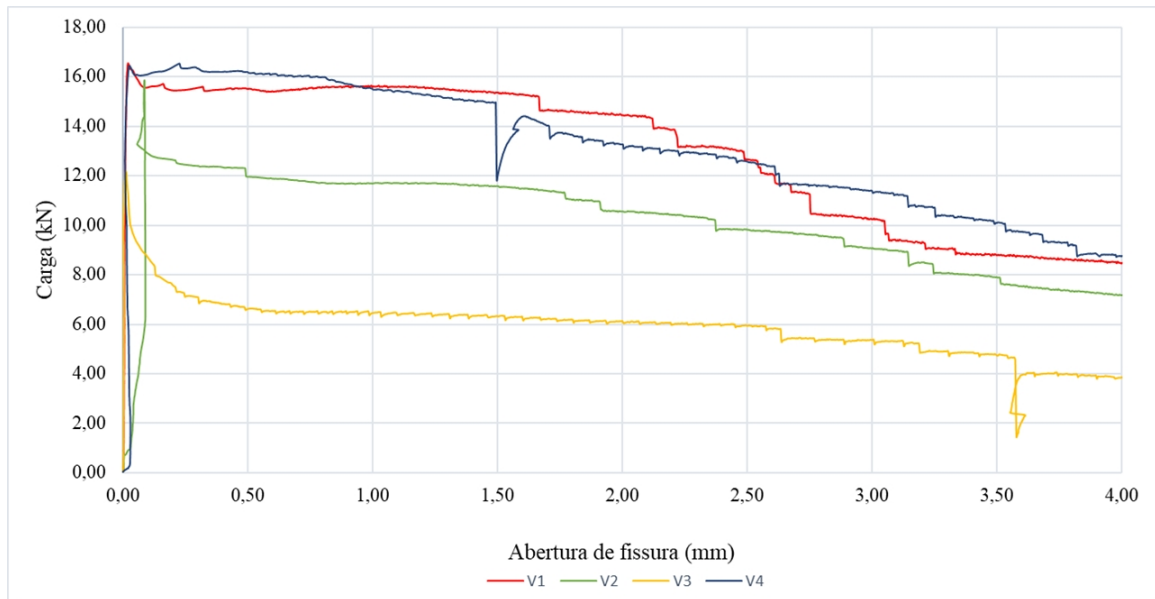
Fonte: Autor, 2020.

Figura 4.16 – Curvas sobrepostas “Carga x Abertura de fissura” para vigas monolíticas.



Fonte: Autor, 2020.

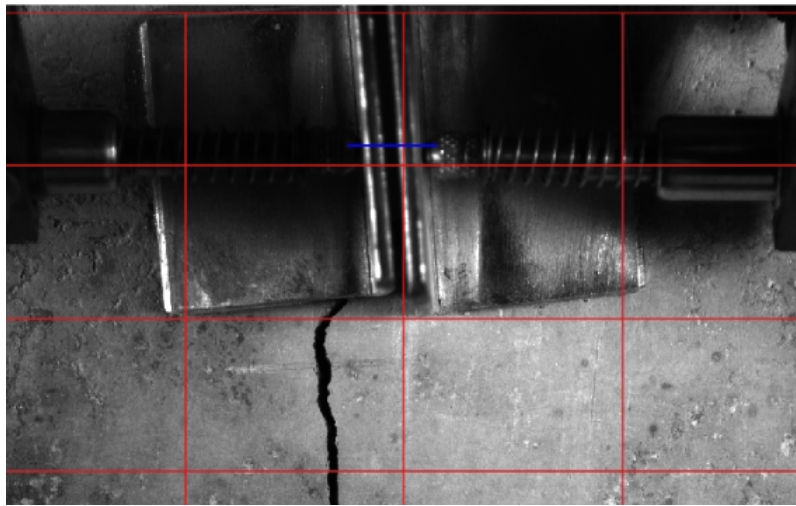
Figura 4.17 – Curvas sobrepostas “Carga x Abertura de fissura” para vigas em dupla camada.



Fonte: Autor, 2020.

No Gráfico presente na Figura 4.17 percebemos uma leve divergência na curva apresentada pela Viga V2 em relação aos demais, onde o trecho correspondente entre 0 e 0,08 milímetros, no eixo horizontal, possui uma leve inclinação, fazendo com que a curva esteja um pouco distante do eixo vertical. Essa variação, deve-se provavelmente ao mal posicionamento das cantoneiras, que estão levemente inclinadas conforme representada na Figura 4.18, causando uma certa inconsistência nas quantificações dos *LVDT's*.

Figura 4.18 – Detalhe da cantoneira na Viga V2 em Dupla camada no tempo 800 segundos.



Fonte: Autor, 2020.

A Tabela 4.6 apresenta um quadro resumo com tempo estimado do início do processo de fissuração baseado nas curvas geradas nas Figuras 4.16 e 4.17 com a respectiva carga de fissuração, incluindo valores médios, desvio padrão (S_d) e coeficiente de variação (CV). Vale ressaltar que a viga V2 em dupla camada foi descartada nesta análise devido ao mau posicionamento dos *LVDT's*, como explicado anteriormente.

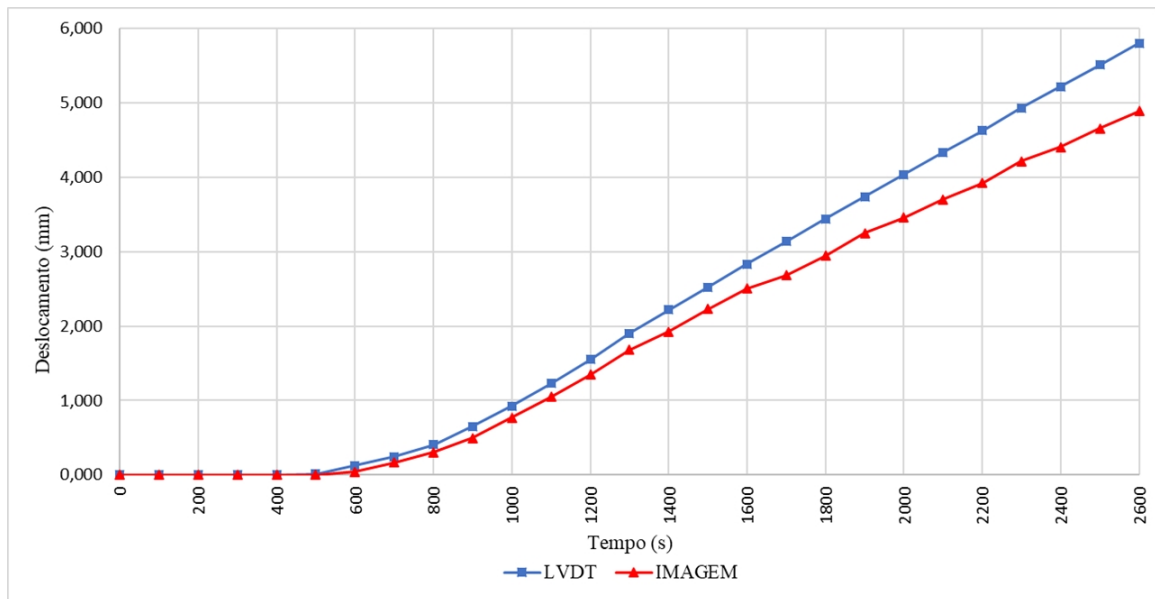
Tabela 4.6 – Tempo e carga estimados para o início do processo de fissuração.

Amostra	Produção 1		Produção 2	
	Tempo (s)	Carga (kN)	Tempo (s)	Carga (kN)
V1	783,7	19,731	403,23	16,53
V2	510,8	16,994	-	-
V3	508,2	16,212	366,23	12,19
V4	558,2	17,575	431,37	16,46
Média	590,22	17,628	400,27	15,06
Sd	131,01	1,509	32,67	6,178
CV (%)	9,69	8,56	8,16	16,5

Fonte: Autor, 2020.

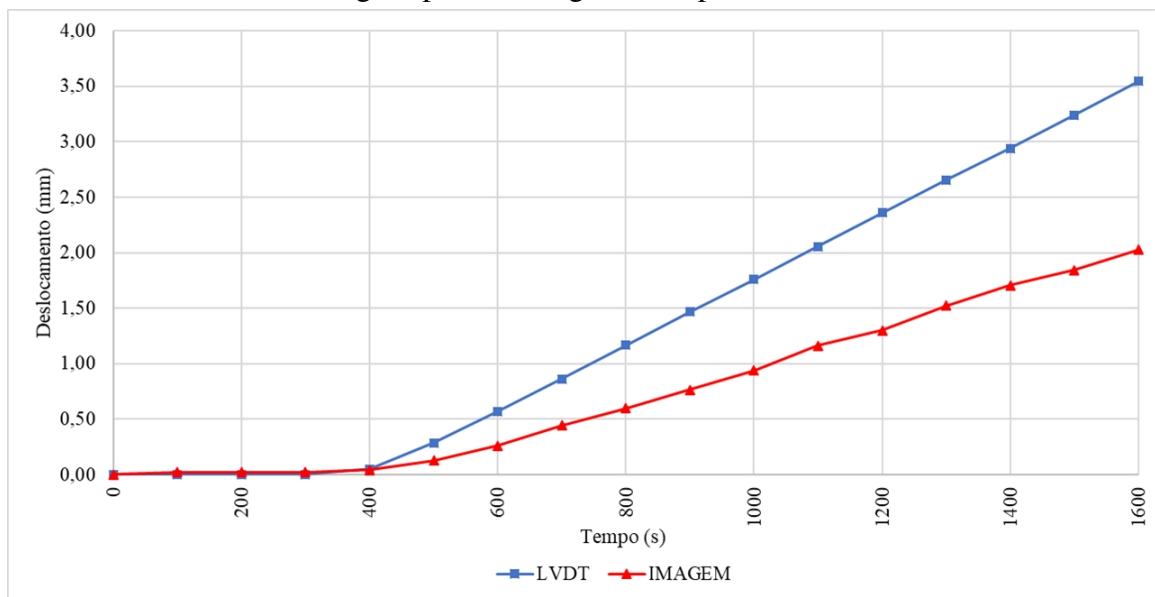
Nas Figuras 4.19 e 4.20 são apresentados graficamente valores médios obtidos para as vigas analisadas na primeira e segunda produção, respectivamente. Nessas figuras têm-se que o tempo médio estimado para o início do processo de fissuração por meio das duas técnicas utilizadas é por volta dos 600 e 400 segundos para espécime monolíticos e em dupla camada, respectivamente, sendo estes valores próximos ao indicado na Tabela 4.6.

Figura 4.19 – Análise gráfica dos deslocamentos médios obtidos em função do tempo por meio de LVDT's e de análise de imagens para as 4 vigas do primeiro grupo.



Fonte: Autor, 2020.

Figura 4.20 – Análise gráfica dos deslocamentos médios obtidos em função do tempo por meio de LVDT's e de análise de imagens para as 4 vigas em dupla camada.



Fonte: Autor, 2020.

Avaliando as cargas indicadas na Tabela 4.6 para início do processo de fissuração percebemos que todos os elementos de concreto em dupla camada apresentaram valores inferiores aos monolíticos, onde para os valores médios obtidos (17,63 kN – monolíticos e 15,06 kN – dupla camada) há uma redução significativa de carga de aproximadamente 14,57%. Além disso, os elementos em dupla camada apresentam um coeficiente de variação acima dos espécimes de referência. De acordo com Freitas *et al.* (2019), essas divergências podem ser explicadas pela variação do número de fibras na seção de ruptura composto no corpo de prova, devido à dificuldade de dispersão das mesmas, o que pode ser constatado nas curvas “Carga x Abertura de fissura” tanto nos espécimes monolíticos (ver Figura 4.16), só que em menor variação por possuírem uma melhor distribuição de fibras na zona de fratura, como em elementos em dupla camada (ver Figura 4.17) com maior incidência devido a variação de concretos (CAA e CAARFA).

Freitas *et al.* (2019) verificaram o comportamento mecânico desses espécimes prismáticos em dupla camada por meio de parâmetros como limites de proporcionalidade e resistências residuais em 0,5 mm e 2,5 mm de abertura de fissura, utilizando as Equações 3.6 e 3.7. Além disso, também foram analisadas as relações $f_{R,1k}/LOP_k$ e $f_{R,3k}/f_{R,1k}$ a fim de verificar se o teor ou o tipo de fibras está adequado para o tipo de aplicação analisada. A Tabela 4.7 além de apresentar esses dados de Freitas *et al.* (2019), também expõe os parâmetros de resistência para elementos monolíticos. Para a viga V2 em dupla camada, Freitas *et al.* (2019) definiram a carga para o limite de proporcionalidade entre o intervalo 0 e 0,08 mm (16,14 kN), visto o comportamento da curva carga por abertura de fissura (ver Figura 4.17).

Como pode-se observar a partir da Tabela 4.7, nota-se que todas as amostras ensaiadas apresentaram relações $f_{R,1k}/LOP_k$ e $f_{R,3k}/f_{R,1k}$ superiores a 0,4 e 0,5, respectivamente. Isso permite, segundo o fib Model Code 2010 (2013), de acordo com a finalidade, a substituição parcial ou total da armadura de flexão para esses níveis de solicitação. Os espécimes ainda foram classificados quanto ao seu desempenho à flexão, conforme os parâmetros definidos na Tabela 3.3, onde os valores médios definidos por “VM” tiveram desempenho de “5a” e “4b”.

A Tabela 4.8 apresenta com maiores detalhes a diferença entre os valores médios em termos percentuais para os parâmetros de resistência em estado limite de serviço e estado limite último, $f_{R,1k}$ e $f_{R,3k}$, respectivamente, enfatizando a redução desses valores nos elementos em dupla camada frente aos monolíticos.

De acordo com os dados apresentados na Tabela 4.7 e com base nos gráficos de carga x abertura de fissura das Figuras 4.16 e 4.17, é possível observar que os espécimes monolíticos apresentaram um comportamento “hardening”, isso significa que, após a ruptura da matriz, há uma redistribuição de esforços propiciado pelas fibras, promovendo um aumento de resistência de pós-fissuração do compósito, fazendo com que a carga resistida pelo compósito seja maior que a carga necessária para romper a matriz, gerando assim um “enrijecimento” ao CAARFA. Já os elementos em dupla camada apresentaram um comportamento “softening”, ou seja, após

Tabela 4.7 – Resultados obtidos com as curvas carga por abertura de fissura, segundo a EN 14651:2007.

Amostra	LOP_k	$f_{R,1k}$	$f_{R,3k}$	$f_{R,1k}/LOP_k$	$f_{R,3k}/f_{R,1k}$	Desempenho
V1 MON	5,15	6,04	3,59	1,17	0,59	6a
V2 MON	4,92	5,26	4,56	1,07	0,87	5a
V3 MON	5,13	4,70	3,13	0,92	0,67	4a
V4 MON	5,33	5,56	4,25	1,04	0,76	5a
VM MON	5,13	5,39	3,88	1,05	0,72	5a
<i>Sd</i>	0,17	0,56	0,64	0,11	0,12	-
<i>CV (%)</i>	3,30	10,40	41,50	9,80	16,70	-
V1 DC	5,29	4,96	4,05	0,94	0,82	4b
V2 DC	4,25	3,83	3,15	0,90	0,82	3b
V3 DC	4,15	2,12	1,91	0,51	0,90	2b
V4 DC	5,26	5,18	4,02	0,98	0,78	5a
VM DC	4,74	4,02	3,28	0,85	0,82	4b
<i>Sd</i>	0,62	1,40	1,01	0,22	0,05	-
<i>CV (%)</i>	13,10	34,80	30,60	26,10	6,10	-

Fonte: Adaptado de Freitas et al. (2019).

Tabela 4.8 – Comparativo entre parâmetros de resistência.

Parâmetros de resistência	VM MON	VM DC	Variação (%)
LOP_k (MPa)	5,13	4,74	7,65
$f_{R,1k}$ (MPa)	5,39	4,02	25,42
$f_{R,3k}$ (MPa)	3,88	3,28	15,53

Fonte: Adaptado de Freitas et al. (2019).

atingir a carga de pico, o compósito apresenta perda gradual da rigidez da matriz.

Após a avaliação da resistência residual do compósito, outra propriedade verificada foi a tenacidade, sendo esta definida a partir da área sob a curva carga por abertura de fissura das Figuras 4.16 e 4.17. A Tabela 4.9 apresenta os valores de tenacidade até os 4 mm de abertura de fissura às amostras analisadas, incluindo média, desvio padrão (S_d) e coeficiente de variação (CV).

Com base na Tabela 4.9 percebe-se que houve uma redução de tenacidade para os espécimes em dupla camada quando comparados aos monolíticos, cerca de 31,51% para valores médios “VM”.

A tenacidade é influenciada pelo teor de fibras e como os espécimes em dupla camada

Tabela 4.9 – Tenacidade (kN.mm) nos espécimes até os 4 mm de abertura de fissura.

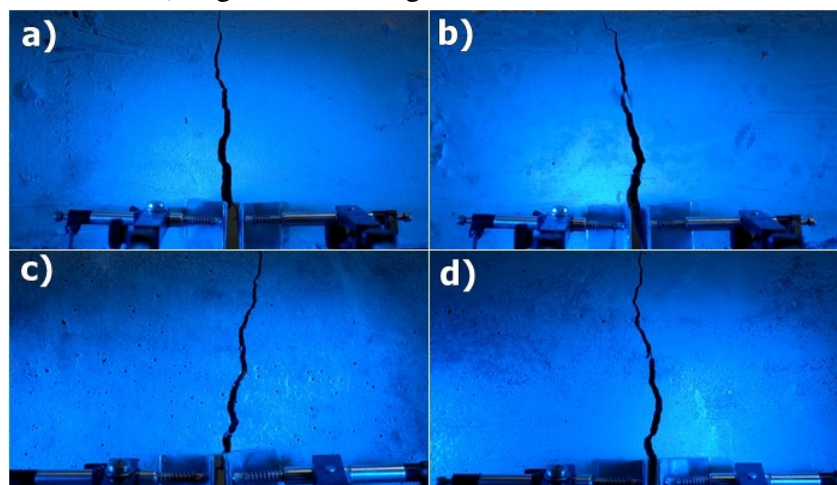
Amostra	MON	DC
V1	59,349	51,394
V2	54,954	38,127
V3	59,542	23,720
V4	64,935	50,305
VM	59,695	40,886
S_d	4,086	12,928
CV (%)	6,480	31,601

Fonte: Autor, 2020.

possuíam menor teor de fibras (apenas 50% do teor de fibras das vigas CON MON), há uma redução desta propriedade. Freitas *et al.* (2019) ainda explicam que há dificuldades durante o processo de moldagem dos espécimes multicamadas, onde a divisória utilizada sofria uma leve torção durante o lançamento dos concretos nas fôrmas, ocasionando variações nessa interface de camadas, o que somado ao menor volume de fibras nesses elementos e à variação de fibras na região de fratura ocasionou um comportamento mecânico abaixo dos elementos monolíticos, apresentando ainda coeficientes de variações maiores como observado nas análises mencionadas.

Por fim, durante a realização dos ensaios ficou claro uma padronização na fissuração das vigas conforme indicado na Figura 4.21. Esse comportamento já era esperado, uma vez que as vigas possuíam entalhes, garantindo assim que a fissura acontecesse nesta região.

Figura 4.21 – Padrão de fissuração: a) Viga V1 CON, b) Viga V3 CON, c) Viga V1 DC e Viga V3 DC



Fonte: Autor, 2020.

4.2.3 Acurácia das medições de deslocamentos

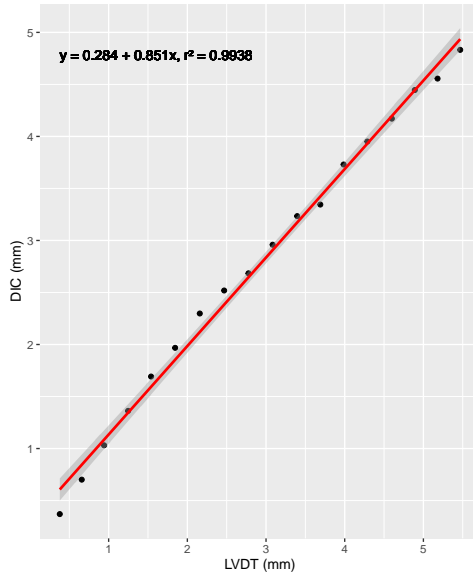
Como mencionado nos subtópicos 4.2.1 e 4.2.2, ocorreram variações nos valores de deslocamentos quantificados pelas técnicas em análise. Também foi discutido que a variável de interesse, o deslocamento, foi estimada pela medida de abertura de fissura. Dessa forma, os valores de deslocamentos só tiveram alterações significativas quando constatado o surgimento da mesma. Antes da fissuração, o que estava sendo quantificado pelo processo de CID era o espaçamento das cantoneiras, e por isso há alta variação dos resultados quando confrontados com as informações coletadas dos LVDT's.

Nas Tabelas 4.3 e 4.4 são apresentados o erro relativo entre as medições. Como forma de complementação, foi averiguada a linearidade dos resultados por meio de uma regressão linear. Na regressão linear, é fornecido o coeficiente de *Pearson*, que consiste num valor adimensional situado entre -1 e 1, em que 1 indica uma correlação perfeita positiva e -1 uma correlação negativa perfeita. Já valores próximos de 0 indicam que não há dependência linear entre as variáveis.

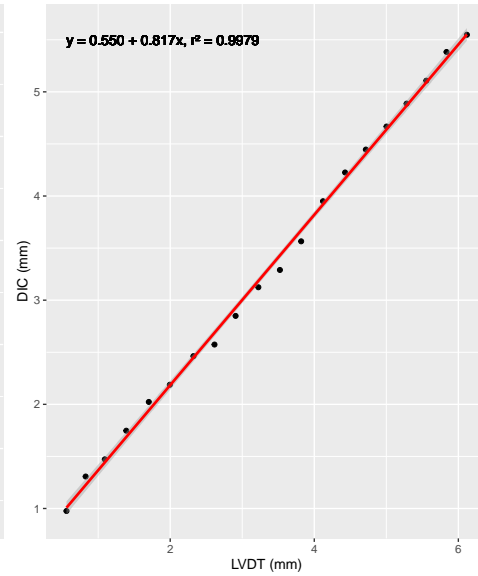
Nas Figuras 4.22 e 4.23 são apresentados os gráficos para cada viga ensaiada, incluindo Coeficiente de Pearson e Equação Linear para o modelo. Já a Tabela 4.10 apresenta de forma resumida coeficiente angular do ajuste linear, coeficiente de *Pearson*, o p-valor que indica aceitação ou não da hipótese em análise e o erro médio fornecido pelo modelo linear proposto e os deslocamentos quantificados pelo processo CID.

Figura 4.22 – Correlação entre os deslocamentos obtidos através dos LVDT's e por análise de imagens para vigas monolíticas.

(a) Viga MON V1.



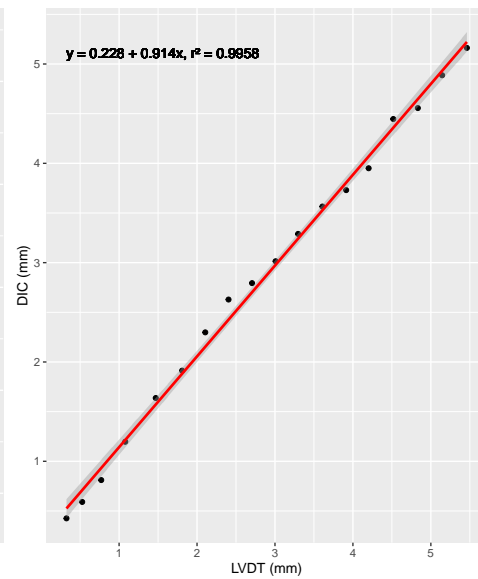
(b) Viga MON V2.



(c) Viga MON V3.

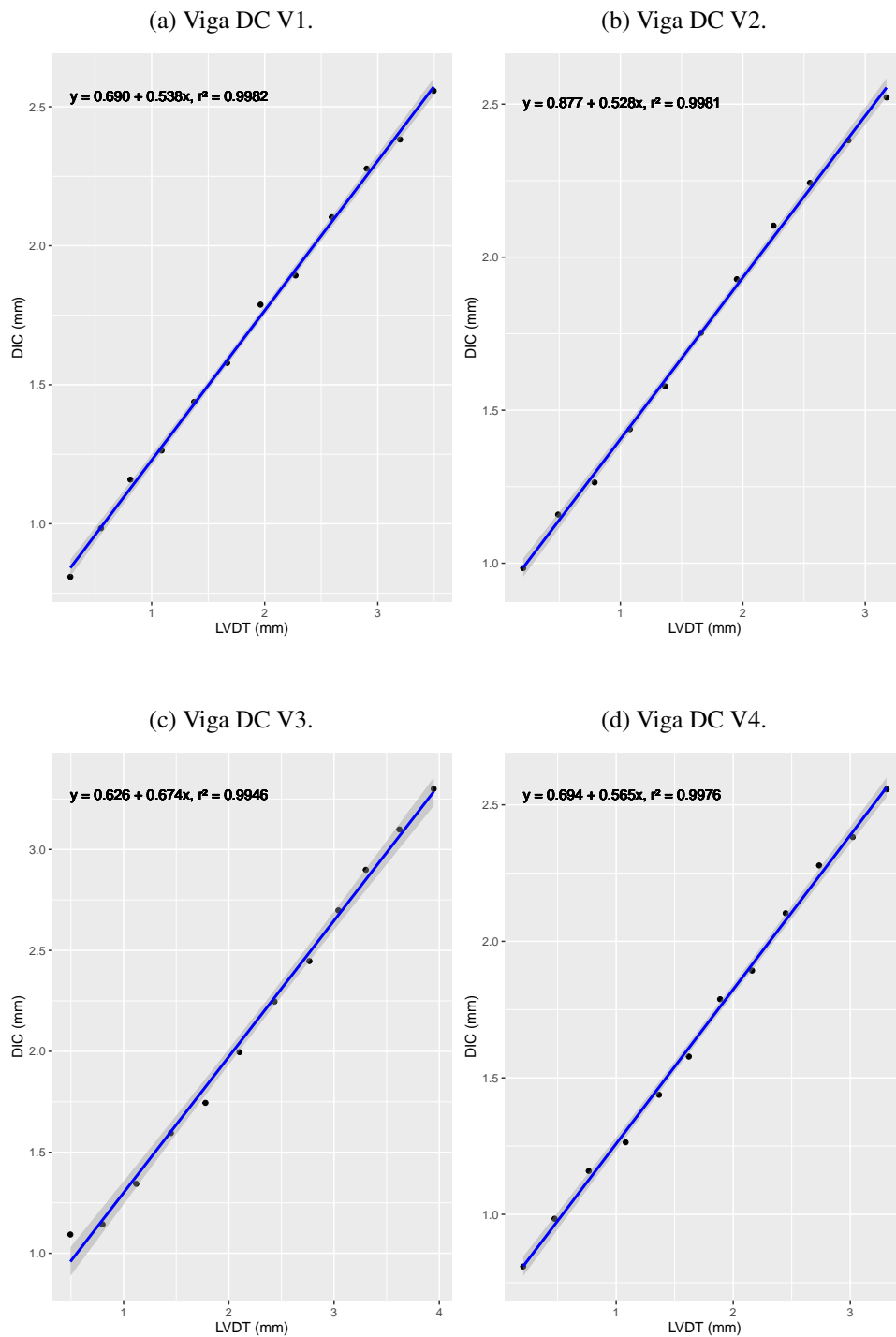


(d) Viga MON V4.



Fonte: Autor, 2020.

Figura 4.23 – Correlação entre os deslocamentos obtidos através dos LVDT's e por análise de imagens para vigas em dupla camada.



Fonte: Autor, 2020.

Tabela 4.10 – Resumo da análise via regressão linear.

Espécime	Coef. Angular	Coef. de Pearson	P-valor	Erro (%)
V1 MON	0,851	0,9938	$2,2e^{-16}$	7,24
V2 MON	0,817	0,9979	$2,2e^{-16}$	2,11
V3 MON	0,803	0,9984	$2,2e^{-16}$	2,25
V4 MON	0,914	0,9958	$2,2e^{-16}$	5,43
V1 DC	0,538	0,9982	$4,4e^{-15}$	1,34
V2 DC	0,528	0,9981	$1,5e^{-13}$	1,11
V3 DC	0,674	0,9946	$1,1e^{-12}$	2,57
V4 DC	0,565	0,9976	$2,1e^{-14}$	1,58

Fonte: Autor, 2020.

A correlação de *Pearson* ainda fornece um p-valor que avalia se a correlação é estatisticamente significativa ou não, quando comparado, para esse estudo, à um nível de significância de 0,05. Com base na Tabela 4.10 é possível constatar que todos os p-valores são abaixo de 0,05, indicando uma correlação estatística significativa entre as duas variáveis. Fato que fica mais evidente quando analisado graficamente as Figuras 4.22 e 4.23 e os Coeficiente de Pearson próximos a 100%.

Ainda na Tabela 4.10 temos os coeficientes angulares para o ajuste linear, onde para espécimes monolíticos temos uma aproximação entre 80,3% e 91,4% em relação aos LVDT's, apresentando uma boa aproximação das medições e indicando que os valores quantificados pela CID são um pouco abaixo dos LVDT's. Para os elementos em dupla camada a situação foi diferente, apresentando coeficientes angulares com uma aproximação entre 52,8% e 67,4%, indicando na pior das situações que o deslocamento quantificado pela CID era de aproximadamente metade do fornecido pelos LVDT's, isso de acordo com o ajuste linear.

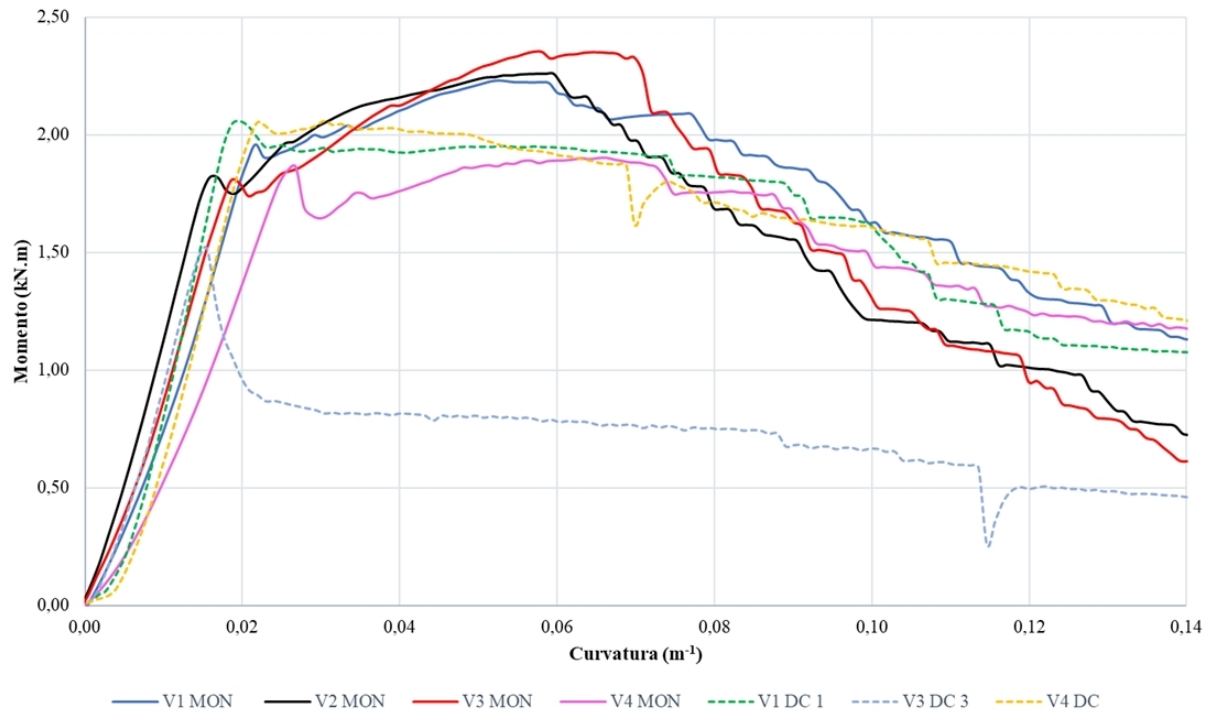
4.3 RIGIDEZ À FLEXÃO

Após a análise do processo de fissuração, a próxima propriedade verificada foi a perda de rigidez à flexão. A rigidez à flexão consiste no produto entre módulo de elasticidade do material que compõe o elemento estrutural e momento de inércia da seção dele, podendo ser estimada, como neste estudo, por meio da equação diferencial de curvatura, como consta no Anexo A.

Quando há tensões solicitantes de tração superiores às de resistência, ocorre o aparecimento de fissuras de flexão, e à medida que o carregamento aumenta surgem novas fissuras na região tracionada, tanto devido aos esforços de flexão quanto de cisalhamento. A tendência é que com o aumento do número de fissuras o elemento estrutural sofra uma perda progressiva de rigidez devido à variação significativa do momento de inércia, sendo este dependente das dimensões da seção transversal em análise.

Na Figura 4.24 constam gráficos momento-curvatura para os espécimes analisados, sendo a curvatura estimada com base na Equação A.21 no Anexo A. É importante destacar que foi constatado na análise do processo de fissuração que a viga V2 em Dupla camada estava com as cantoneiras levemente inclinadas (ver Figura 4.18), o que ocasionou uma variação na curva carga-abertura de fissura, como indicado na Figura 4.17, por isso não foi incluída nesta análise.

Figura 4.24 – Curvas momento-curvatura para espécimes monolíticos (constante) e em dupla camada (tracejado).



Fonte: Autor, 2020.

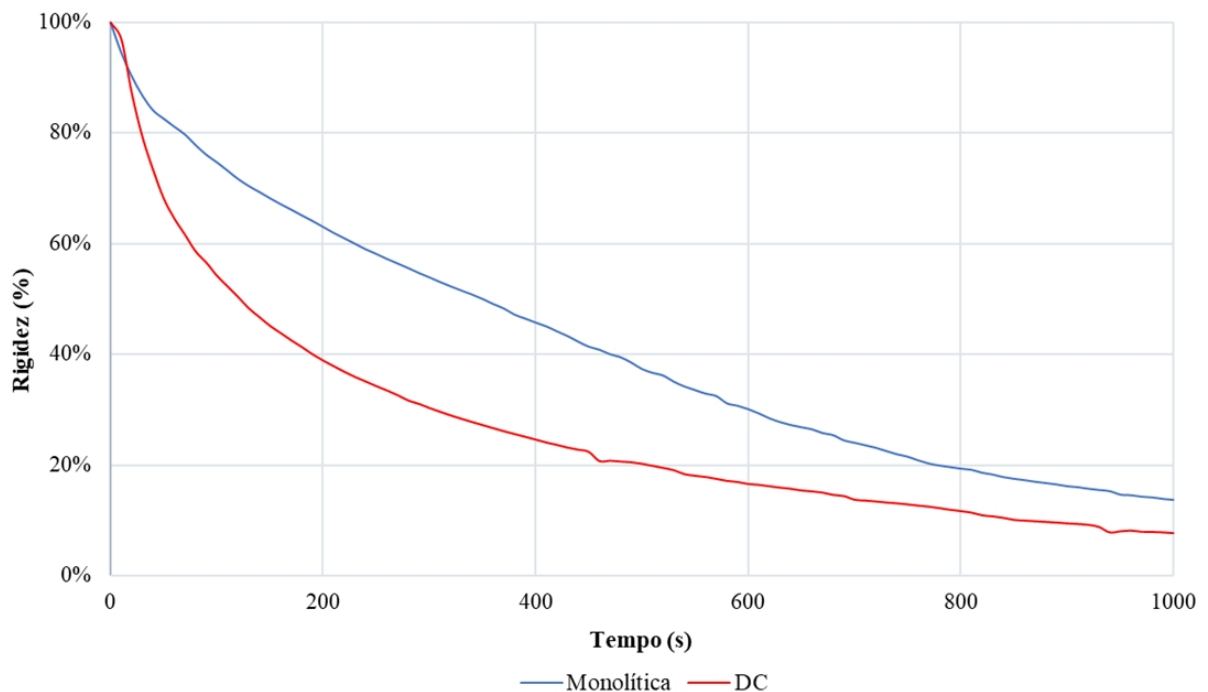
Como discutido, os elementos em dupla camada apresentam um comportamento “*softening*”, indicando que sua carga de fissuração corresponde à carga máxima, já os elementos monolíticos apresentam um comportamento “*hardening*”, tendo sua carga máxima um pouco acima da carga de fissuração. Logo, diante desse comentário temos na Figura 4.24 que o momento máximo indicado para elementos em dupla camada representa o início de fissuração da peça. Em contrapartida, os espécimes monolíticos tem sua ruptura antes do momento máximo atuante, como indicado na mesma figura, isso deve-se a redistribuição de esforços propiciado pelas fibras no comportamento “*hardening*”.

Ainda na Figura 4.24, temos um comportamento semelhante no que tange a análise da rigidez antes à ruptura, dando indícios de que a proposta de utilização de elementos multicamadas, com a configuração adotada neste estudo, apresenta rigidez similar aos elementos monolíticos, utilizando menos consumo de fibras, porém com um posicionamento ótimo na região que demanda maiores esforços de tração.

Na Figura 4.25 é avaliado a perda relativa de rigidez em função do tempo com base nas curvas médias geradas a partir da Figura 4.24 após ocorrência de fissuras. Observamos que os ele-

mentos em dupla camada apresentam uma queda de rigidez mais acentuada, quando comparado aos monolíticos. Esse decaimento mais acentuado deve-se ao comportamento “*softening*” dos elementos em dupla camada. Além disso, a presença de camadas com diferentes materiais em sua composição e também o menor volume de fibras, já que umas das camadas desses elementos é composta apenas de CAA, são pontos que devem ser levados em consideração nessa análise, uma vez que a formulação teórica da flexão em vigas empregado neste trabalho, considera o módulo de elasticidade constante. Ainda na Figura 4.25, temos que os elementos monolíticos, que apresentam comportamento “*hardening*”, com módulo de elasticidade homogeneizado, tendem a possuir uma perda de rigidez mais controlada.

Figura 4.25 – Perda de rigidez relativa média para os espécimes monolíticos e em dupla camada.



Fonte: Autor, 2020.

Através do modelo teórico proposto para estimativa de rigidez, que consta no Anexo A, e com base nos tempos de fissuração definidos anteriormente, foram estimados a rigidez à flexão para esses espécimes em momentos antes e após a ruptura, com o objetivo de avaliar se houve ou não variação significativa de rigidez, e assim indicar um possível dano à estrutura. Nas Tabelas 4.11 e 4.12 temos valores estimados de rigidez para esses espécimes em instantes antes e após a ruína. Os valores de tempo identificados com um asterisco (*) indicam tempo próximo a ruptura do espécime.

Tabela 4.11 – Estimativa de rigidez ($kN.m^2$) para espécimes monolíticos.

V1		V2		V3		V4	
Tempo (s)	Rigidez	Tempo (s)	Rigidez	Tempo (s)	Rigidez	Tempo (s)	Rigidez
750	89,807	480	112,425	480	95,058	530	70,448
760	91,415	490	114,386	490	96,550	540	71,592
770	92,772	500	115,840	500	96,923	550	72,527
780*	92,806	510*	117,238	510*	97,063	560*	73,025
790	81,234	520	106,618	520	82,963	570	61,000
800	78,383	530	97,055	530	79,585	580	57,471
810	75,604	540	90,801	540	76,301	590	55,074

Fonte: Autor, 2020.

Tabela 4.12 – Estimativa de rigidez ($kN.m^2$) para espécimes em dupla camada.

V1		V3		V4	
Tempo (s)	Rigidez	Tempo (s)	Rigidez	Tempo (s)	Rigidez
370	106,327	320	94,239	400	93,759
380	109,348	330	97,709	410	95,019
390	111,315	340	100,683	420	95,245
400*	109,656	350*	102,568	430*	93,964
410	104,236	360	102,692	440	88,886
420	97,765	370	98,037	450	83,747
430	90,916	380	92,448	460	80,103

Fonte: Autor, 2020.

Nas Tabelas 4.11 e 4.12, podemos observar que o tempo estimado para início do processo de fissuração está coerente com as análises anteriores, uma vez que temos para instantes bem próximos a ruptura valores de rigidez máxima, e após a ruína há uma diminuição da mesma.

Na Figura 4.24 podemos identificar que os espécimes em dupla camada para uma mesma curvatura dos monolíticos, antes à ruína, apresentaram valores de momento superiores, indicando assim serem mais rígidos, o que podemos constatar nos valores estimados nas Tabelas 4.11 e 4.12. Carvalho *et al.* (2019) explica que o CAARFA quando lançado em fôrmas de dupla camada tendem a ter uma orientação das fibras, fazendo com que as mesmas fiquem alinhadas na dimensão maior do elemento devido a redução da largura proporcionada pela inserção da divisória, proporcionando assim um maior ganho de rigidez ao elemento devido ao maior proveito das fibras quando orientadas desta forma.

Após a verificação da perda de rigidez em função do tempo, foram aplicados testes estatísticos, de acordo com o roteiro definido por Carvalho (2015a), com o intuito de avaliar se existiram diferenças significativas desta variável antes e após a ruína dos espécimes. Os dados analisados nesse procedimento foram os obtidos nas Tabelas 4.11 e 4.12. Tendo como exemplo a Viga V1 MON, inicialmente foi avaliado se os valores de rigidez em função do tempo provêm de uma distribuição normal com base no teste de Shapiro-Wilk (ver Tabela 4.13).

Tabela 4.13 – Verificação de normalidade com o teste de Shapiro-Wilk para Viga MON V1.

	Antes da ruptura		Após a ruptura
Estatística	0,9974	Estatística	0,9999
P-valor	0,9032	P-valor	0,9863

Fonte: Autor, 2020.

Desta forma, é possível afirmar, com um nível de significância de 5%, que os valores de rigidez, antes e após a ruína, provêm de uma distribuição normal ($P\text{-valor} > \alpha = 0,05$). Em seguida, antes de aplicar o teste T , que possui como hipótese nula que não há alteração da rigidez antes e após a ruína, e hipótese alternativa de que há redução de rigidez após a ruptura do espécime, é verificado se as variâncias são iguais a partir do teste F . A Tabela 4.14 contém os resultados obtidos nesta etapa, incluindo os parâmetros adotados para análise como graus de liberdade (gl), nível de significância (α) e valores críticos (F_{cr} e t_{cr}) que são tabelados.

Tabela 4.14 – Valores calculados e críticos (Tabelados) para testes F e T , na Viga MON V1.

α	F_{cal}	F_{cr}	gl	t_{cal}	t_{cr}
5%	0,278	19	4	7,03	2,132

Fonte: Autor, 2020.

Na Tabela 4.14, temos $F_{cal} < F_{cr}$, logo a hipótese nula não deve ser rejeitada, e as variâncias são consideradas iguais. Desta forma, o t_{cal} foi obtido através do método já citado que considera variâncias iguais. Ainda nessa tabela, podemos observar que $t_{cal} > t_{cr}$, o que indica que a hipótese nula do teste T deve ser rejeitada, e a alternativa, aceita. Sendo assim, constata-se que houve uma variação da rigidez após a ruptura do espécime na Viga MON V1. Nas Tabelas 4.15 e 4.16 são apresentados os resultados obtidos para as demais vigas, onde podemos verificar a partir da análise estatística que há redução da rigidez após a ruptura do espécime em todos os casos.

Tabela 4.15 – Verificação de normalidade com o teste de Shapiro-Wilk.

Viga		Antes da ruptura	Após a ruptura
MON V2	Estatística	0,9926	0,9857
	P-valor	0,8355	0,7711
MON V3	Estatística	0,8922	0,9999
	P-valor	0,3610	0,9844
MON V4	Estatística	0,9969	0,9879
	P-valor	0,8941	0,7902
DC V1	Estatística	0,9853	0,9987
	P-valor	0,7681	0,9322
DC V3	Estatística	0,9980	0,9972
	P-valor	0,9152	0,8996
DC V4	Estatística	0,8180	0,9904
	P-valor	0,1583	0,8129

Fonte: Autor, 2020.

Tabela 4.16 – Valores calculados e críticos (Tabelados) para testes F e T

Viga	α	F_{cal}	F_{cr}	gl	t_{cal}	t_{cr}
MON V2	5%	0,046	19	4	3,14	2,132
MON V3	5%	0,088	19	4	8,26	2,132
MON V4	5%	0,122	19	4	7,50	2,132
DC V1	5%	0,151	19	4	4,45	2,132
DC V3	5%	0,037	19	4	4,97	2,132
DC V4	5%	0,033	19	4	4,03	2,132

Fonte: Autor, 2020.

A Tabela 4.17 apresenta valores máximos de rigidez indicados a partir das Tabelas 4.11 e 4.12. Nela, percebemos que os valores médios de rigidez dos espécimes monolíticos estão um pouco abaixo das vigas em dupla camada, aproximadamente 6,89%. Além disso, também estão incluídos desvio padrão (S_d) e coeficiente de variação (CV).

Tabela 4.17 – Valores máximos de estimativa de rigidez ($kN.m^2$).

Espécime	MON	DC
V1	92,81	109,66
V2	117,24	-
V3	97,06	102,57
V4	73,03	93,96
VM	95,03	102,06
S_d	18,13	7,86
CV (%)	19,61	7,70

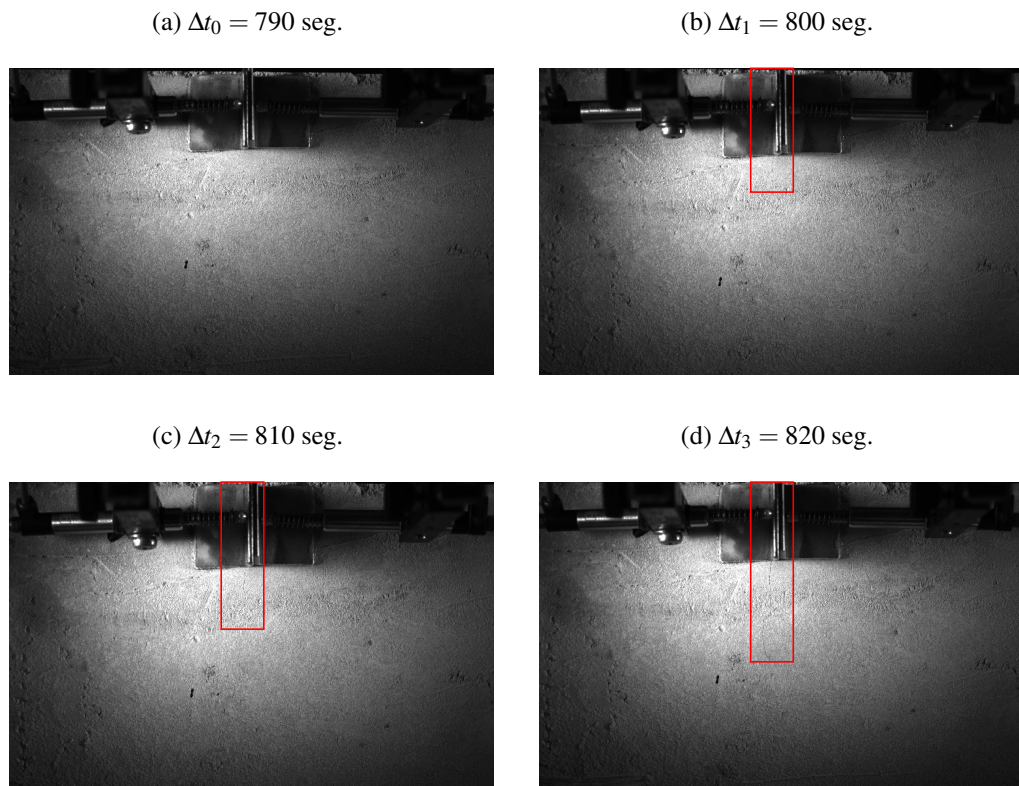
Fonte: Autor, 2020.

4.3.1 Campos cinemáticos

Além da obtenção dos deslocamentos estimados pela abertura de fissura com base na análise das imagens, foram obtidos deslocamentos e deformações nodais para a malha designada no processo, conforme exemplificado na Figura 3.17. Essas informações de campos cinemáticos foram obtidas através de pares de imagens, tendo como referência a imagem com 10 segundos antes do tempo indicado de início de fissuração, e as três seguintes, sempre num intervalo de 10 segundos uma da outra. Como a análise foi realizada em pares e foram escolhidas 4 imagens que acompanha o processo evolutivo dos campos cinemáticos no instante de início de fissuração, teve-se então 3 iterações.

A Figura 4.26 apresenta as imagens utilizadas para acompanhamento da evolução dos campos cinemáticos para Viga MON V1, onde a região sinalizada em vermelho corresponde à fissura durante a captura. A iteração 1 foi gerada a partir das Figuras 4.26a e 4.26b (intervalo de 10 segundos). Já a iteração 2 corresponde ao par de Figuras 4.26a e 4.26c (intervalo de 20 segundos). E por fim, a iteração 3, Figuras 4.26a e 4.26d (intervalo de 30 segundos). Foram testadas iterações

Figura 4.26 – Imagens utilizadas para geração dos campos cinemáticos na Viga MON V1.

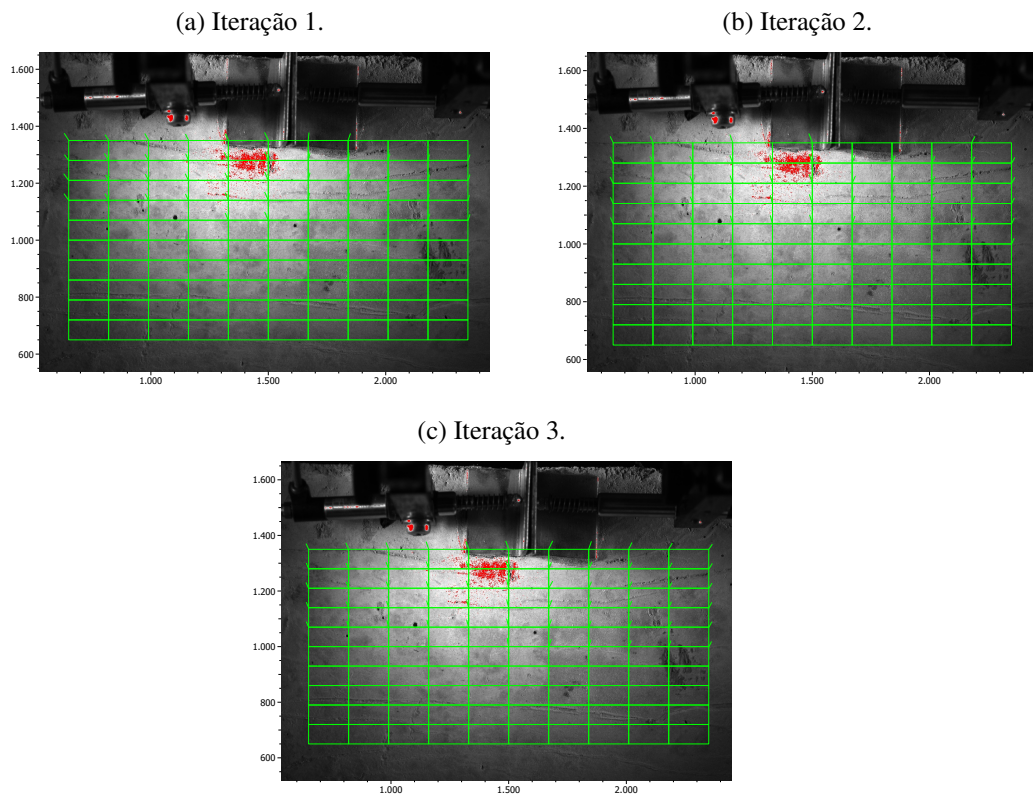


Fonte: Autor, 2020.

com maior intervalo de tempo (40 segundos), mas o *ITOM* apresentou descorrelação, o que deve-se a variação de deslocamento, que pra o algoritmo implementado ainda é considerável.

Os valores nodais fornecidos em cada iteração, tanto para deslocamentos como deformações, são em *pixels*, e foram convertidos em milímetros utilizando o fator de magnificação. O *ITOM* ainda não possui implementado a geração dos mapas de cores em função dos valores nodais para os deslocamentos, apenas é representado após o processamento, vetores na malha sinalizando o deslocamento sofrido (ver Figura 4.27).

Figura 4.27 – Malha gerada pelo *ITOM* representando deslocamentos nodais em *pixels*.



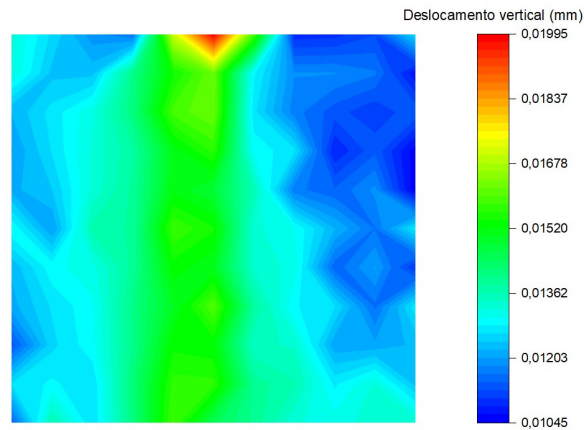
Fonte: Autor, 2020.

Buscando avaliar graficamente esses campos, foram geradas a parte com auxílio do *Origin®* (versão 2020b), mapas de cores de deslocamentos nas direções principais em função dos deslocamentos nodais. As Figuras 4.28 a 4.33 apresentam os campos de deslocamentos com base nas imagens apresentadas na Figura 4.26.

As Figuras 4.28, 4.29 e 4.30 representam a evolução dos deslocamentos na direção y , vertical, com base nos pares de imagens analisados. Nelas pode-se observar que os deslocamentos máximos estão localizados na região central da malha, conforme esperado para esse modelo experimental. Já nas Figuras 4.31, 4.32 e 4.33 constam os deslocamentos na direção x , horizontal, onde optou-se por trabalhar com os valores de deslocamentos reais, e não em módulo, para facilitar a visualização da orientação dos vetores de deslocamentos conforme representado na Figura 4.27.

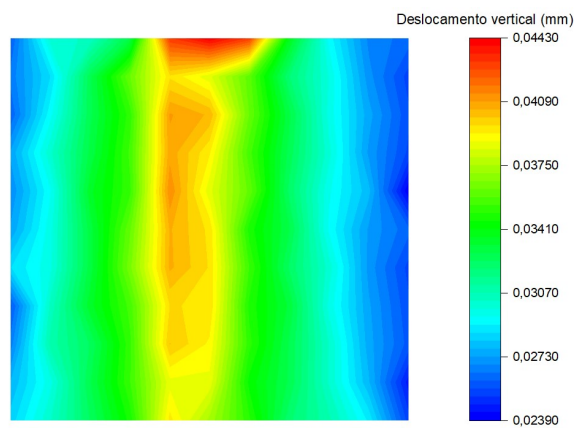
Os deslocamentos da célula de carga durante todo o ensaio de flexão foram controlados, onde nos primeiros 5 minutos de ensaio a célula de carga se deslocou a uma velocidade de 0,05mm/min, e em 0,20mm/min até o final do mesmo. A adoção de uma menor velocidade no trecho inicial tem a função de minimizar a ocorrência da instabilidade pós-pico. Como o início do processo de fissuração em todas as vigas ocorreu após os 5 primeiros minutos de ensaio, temos uma variação de 0,20mm/min.

Figura 4.28 – Mapa de cores de deslocamentos na direção y: Viga MON V1 – Iteração 1.



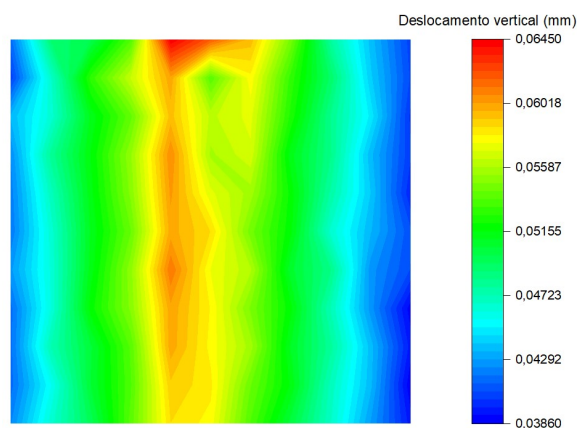
Fonte: Autor, 2020.

Figura 4.29 – Mapa de cores de deslocamentos na direção y: Viga MON V1 – Iteração 2.



Fonte: Autor, 2020.

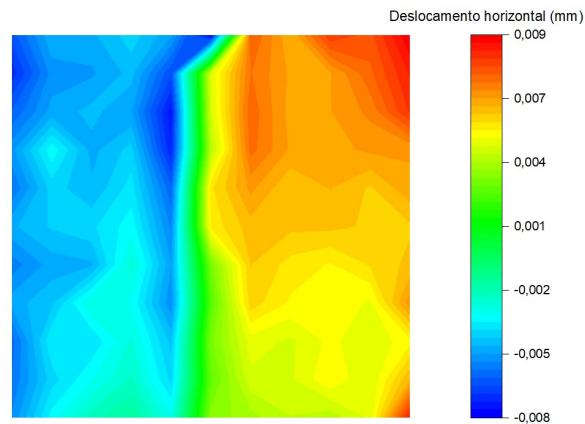
Figura 4.30 – Mapa de cores de deslocamentos na direção y: Viga MON V1 – Iteração 3.



Fonte: Autor, 2020.

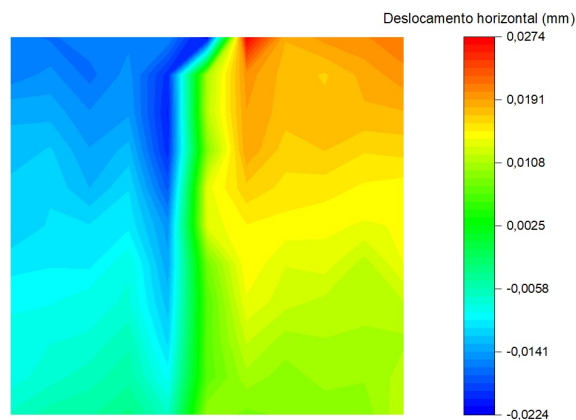
Em seguida foram geradas mapas de cores de deformação nas direções principais ($\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}$) no próprio *ITOM*, conforme representada na Figura 4.34. Avaliando comparativamente esses

Figura 4.31 – Mapa de cores de deslocamentos na direção x: Viga MON V1 – Iteração 1.



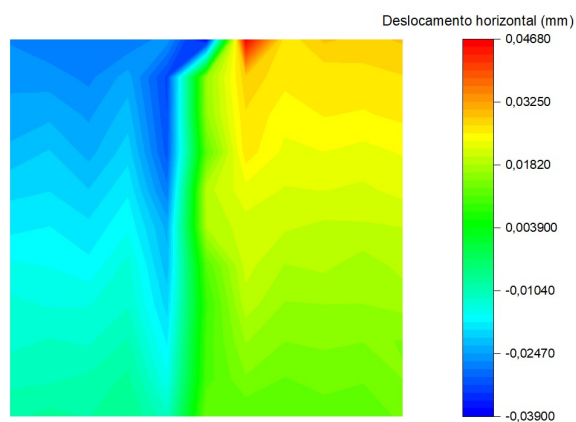
Fonte: Autor, 2020.

Figura 4.32 – Mapa de cores de deslocamentos na direção x: Viga MON V1 – Iteração 2.



Fonte: Autor, 2020.

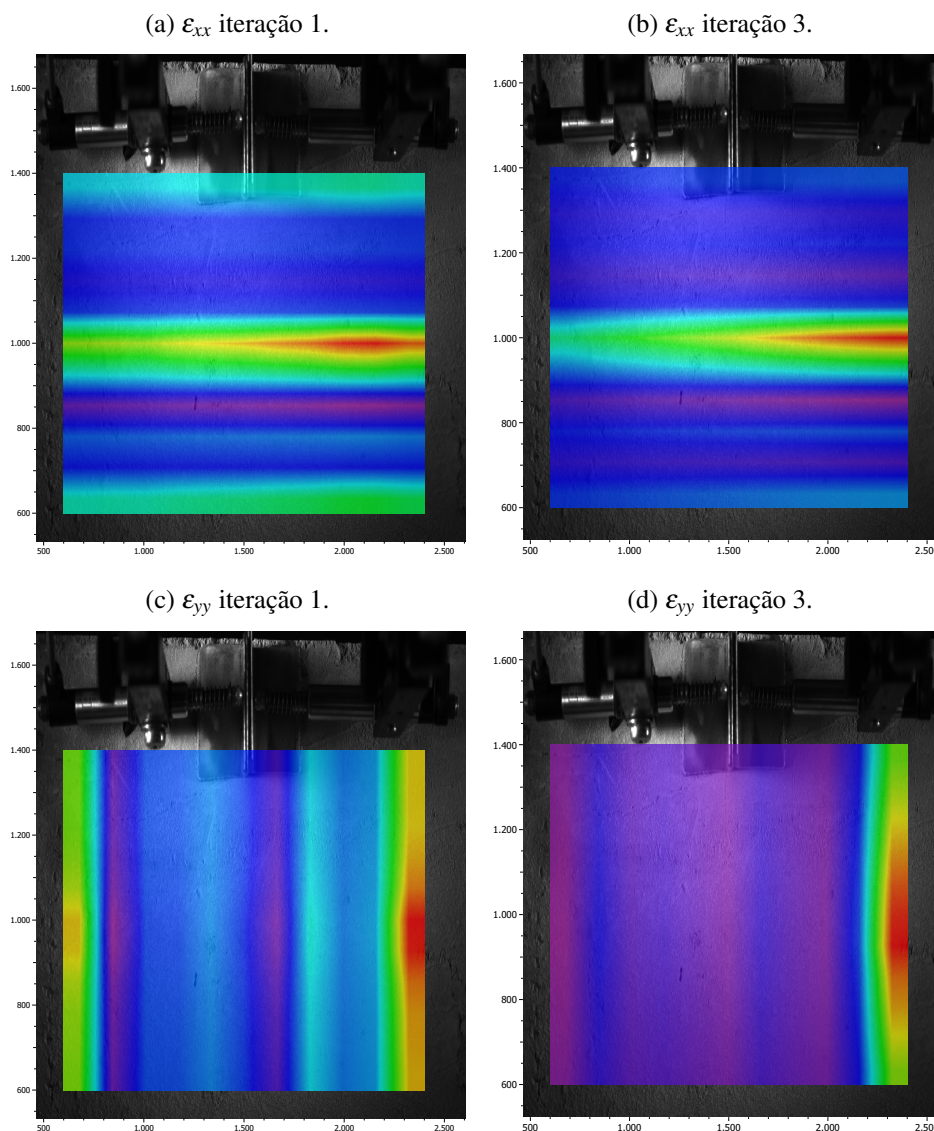
Figura 4.33 – Mapa de cores de deslocamentos na direção x: Viga MON V1 – Iteração 3.



Fonte: Autor, 2020.

mapas de deformação, foram gerados campos em função dos valores nodais, semelhante ao realizado nos deslocamentos com auxílio do *Origin* (ver Figura 4.35).

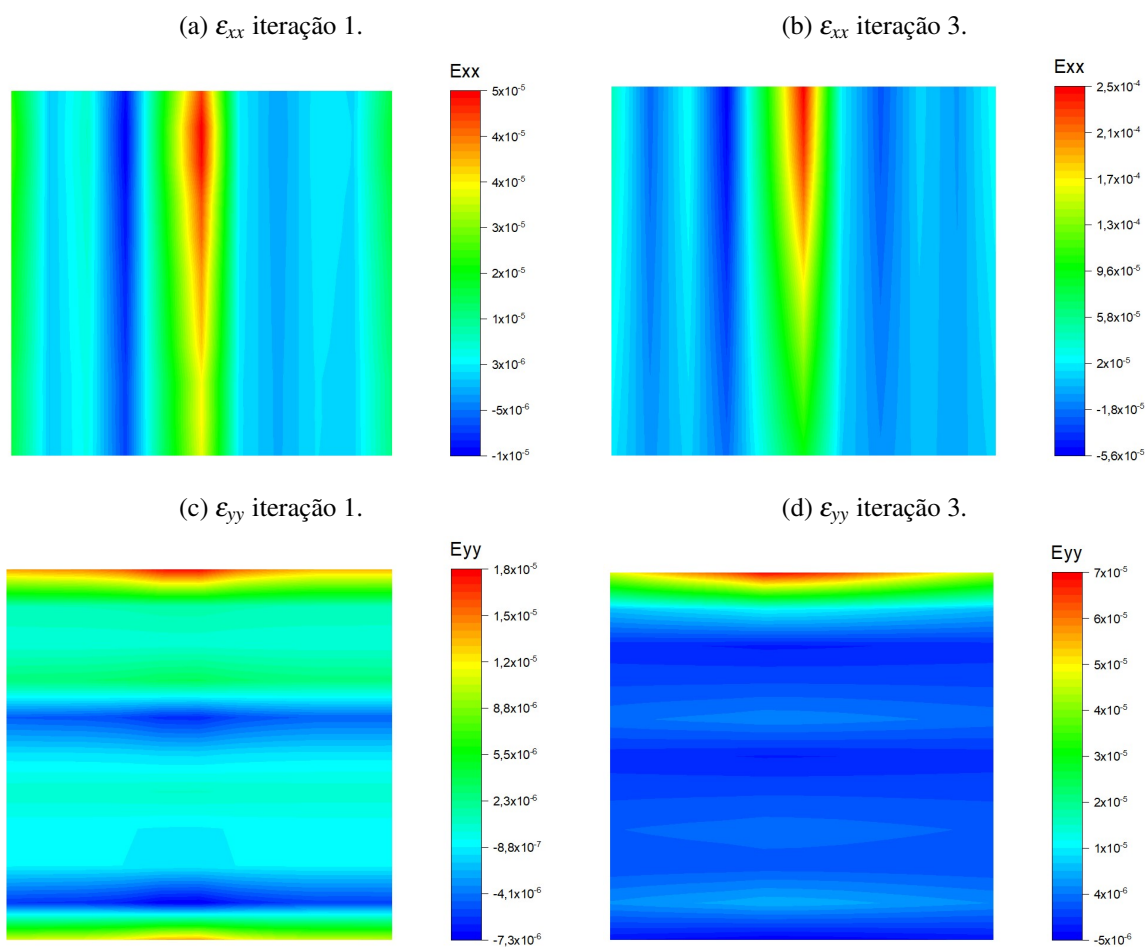
Figura 4.34 – Mapas de cores de deformação geradas no *ITOM*: Viga MON V1



Fonte: Autor, 2020.

Quando comparados os mapas gerados no *ITOM* com os do *Origin* percebemos que existe uma diferença na representação desses campos. Estando os mapas de cores representadas na Figura 4.34 rotacionadas 90° no sentido horário, quando comparadas a distribuição presente na Figura 4.35.

No Anexo B estão presentes os valores nodais em milímetros para cada iteração adotada. Além disso são apresentadas as imagens utilizadas no procedimento de CID, incluindo a malha adotada, e a malha gerada no *ITOM* representando a variação dos deslocamentos nodais entre os pares de imagens. Além disso, constam também os demais mapas de cores de deslocamentos, gerados a parte, com auxílio do *Origin*. Como apresentou divergência nos resultados de campos de deformação, optou-se por não incluí-los.

Figura 4.35 – Mapas de cores de deformação geradas no *Origin*: Viga MON V1

Fonte: Autor, 2020.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A CID é uma técnica já consolidada no ramo da mecânica experimental, no entanto boa parte das soluções apresentadas no mercado são comerciais, e assim faz-se necessário o desenvolvimento de ferramentas de código aberto que auxiliem nas atividades laboratoriais. Sendo assim, o Grupo de Pesquisa em Estruturas e Materiais do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil desta Instituição vem desenvolvendo o *ITOM*.

Os objetivos desta dissertação estavam pautados na possibilidade de empregar a CID na detecção de danos em vigas de concreto. Além disso, foram avaliados comparativamente os valores mensurados pelas técnicas de análise, e em seguida verificado estatisticamente essas variações.

O dano considerado nesse trabalho foi a perda de rigidez devido à fissuras de flexão, sendo avaliada com base em um modelo analítico e em função dos gráficos momento-curvatura, a medida que eram confrontadas com os campos cinemáticos gerados pelo processo de CID. Antes de avaliar diretamente essa perda de rigidez foi necessário verificar a acurácia dos valores de deslocamentos obtidos pelas imagens, e para isso foram empregados LVDT's como forma de validação para abertura de fissura que posteriormente foi transformada em deslocamento. No tópico 4.2.3 foi analisado a relação entre as duas técnicas de monitoramento através de uma regressão linear. Todos os espécimes apresentaram uma correlação elevada, com coeficiente de Pearson (R) acima de 0,99, e p -valor abaixo de 0,05, o que indica uma correlação estatística significativa entre as duas variáveis.

Outro ponto ainda avaliado nas equações fornecidas pelo ajuste linear foram os coeficientes angulares, responsáveis pela verificação da linearidade entre deslocamentos quantificados pelos LVDT's e processamento de imagens. Nos espécimes monolíticos, os coeficientes angulares das funções de ajuste apresentaram uma aproximação de 80,3% à 91,4% em relação aos valores de deslocamentos quantificados pelos LVDT's. Já os elementos em dupla camada, apresentaram valores entre 52,8% e 67,4%. Quando comparados diretamente os valores de deslocamentos fornecidos pelas imagens a partir da função linear de ajuste, o erro médio ficou entre 1,11% e 7,24%. Sendo assim, esses coeficientes podem ser tidos como parâmetros de ajuste do modelo.

A variação entre esses resultados de deslocamentos pode ser explicada devido à sensibilidade da CID. Apesar de possuir um procedimento experimental pré-definido, e utilizando o mesmo aparato técnico durante os ensaios, essa divergência pode ser associada a uma incerteza relacionada ao operador, uma vez que foi executado por técnicos distintos com níveis de experiência diferentes, e ao processo de calibração, refletindo nos fatores de magnificação que se dão, entre outros aspectos, em função do ajuste focal das lentes e na variação da distância focal. Além disso, nos elementos em DC, foram constatadas outras variações durante o procedimento

experimental, como uma má iluminação da região de análise e um maior braço de alavanca para posicionamento dos LVDT's, que para medições na casa dos milésimos de milímetros acaba influenciando na quantificação (ver Figura 3.7). Vale lembrar que a função de ajuste proposta pela EN 14651 (2007) é uma relação obtida experimentalmente e talvez não seja o melhor modelo para estimativa de deslocamento em elementos de DC.

Em ambos os conjuntos amostrais a análise por imagens permitiu a estimativa do início do processo de fissuração, tendo resultados mais consistentes nos elementos monolíticos devido ao melhor ajuste na regressão linear. Além da análise direta nas imagens, o *ITOM* permite a geração de campos cinemáticos com base em pares de imagens. No entanto, os valores apresentados são fornecidos em *pixels* e necessitam do fator de magnificação para conversão em milímetros.

O *ITOM* possui implementado uma malha que representa os deslocamentos nodais, em *pixels*, entre os pares de imagens (ver Figura 4.27). Mesmo sendo capaz de gerar os campos cinemáticos com base em pares de imagens, o *ITOM* ainda não possui um processo automatizado para análise. Porém, uma forma comumente empregada para representar as variações de deslocamentos em análises com elementos finitos é através de mapas de cores de deslocamentos, o que ainda não está implementado, e por isso foi utilizado o *Origin*. Na geração dos campos de deformação, o programa consegue representar mapas de cores nas direções principais, porém foi constatado que elas estão rotacionadas (ver Figura 4.34), quando comparadas a distribuição real dos nós no programa, indicada no *Origin*.

Para a medição direta de abertura de fissura, as imagens que foram captadas a cada 10 segundos, foram agrupadas em intervalos de 100 segundos durante a análise, uma vez que o tratamento é feito imagem por imagem, e avaliá-las uma a uma não é intuitivo, visto que os ensaios quando menos apresentaram foram em média 160 fotos. Por isso, optou-se em trabalhar com os dados dos LVDT's na avaliação analítica da perda de rigidez, já que as leituras são realizadas a cada segundo.

Constatada a eficiência da utilização da CID, e tendo incorporado um processo automatizado de análise das imagens para medição de abertura de fissura neste ensaio de flexão, esses transdutores poderiam ser substituídos, o que resultaria num ganho em relação à instrumentação visto que os equipamentos utilizados neste processo de CID são tecnicamente uma câmera de alta resolução (análise bidimensional) e um computador para processamento e análise das imagens, que no geral são equipamentos que podem ser reaproveitados e que não foram projetados apenas para essa aplicação.

Outra limitação apresentada no *ITOM* foi no processo de geração de campos cinemáticos, onde o tempo máximo no intervalo analisado foi de 30 segundos, acima disso ocorria descorrelação em função da variação do deslocamento, que apesar de ser pequeno, para o processo de CID é suficiente para caracterizá-lo como uma grande variação com base no algoritmo implementado. Por isso, na geração dos campos cinemáticos, os intervalos ficaram fixados em 10, 20 e 30 segundos. Algumas soluções comerciais que utilizam o processo de CID são capazes de

gerar campos cinemáticos desde o início do ensaio, a exemplo dos softwares fornecidos pela *GOM Correlate*. E o *ITOM* caminha neste sentido, com o intuito de gerar esses campos e assim acompanhar todo o processo deformacional no decorrer do ensaio, dando mais detalhes para análises mais precisas no ELS e ELU, e não apenas em um intervalo curto de tempo.

Com base nos valores de rigidez obtidos, tem-se que os espécimes MON e em DC possuem, antes da ruptura, valores máximos de rigidez bem próximos. Essa constatação ainda é reforçada com base na análise gráfica momento-curvatura, devido a similaridade da inclinação no trecho linear (antes à ruptura). Essa proximidade deve-se ao fato da indução do direcionamento das fibras devido ao fluxo de lançamento no elemento em dupla camada, orientando-as para um maior aproveitamento de suas características mecânicas no compósito.

Após a ruptura, os espécimes em dupla camada apresentam uma perda de rigidez relativa mais acentuada que os monolíticos, fato este explicado devido ao comportamento “*softening*” e “*hardening*” desses respectivos conjuntos. A presença de camadas com diferentes materiais em sua composição e também o menor volume de fibras, já que umas das camadas desses elementos é composta apenas de CAA, são pontos que requerem um estudo mais aprofundado, uma vez que a formulação teórica da flexão em vigas empregado neste trabalho, considera o módulo de elasticidade constante. Mas a princípio, o emprego de elementos prismáticos de concreto em DC, mostra-se um campo promissor, uma vez que para a configuração adotada neste estudo, apresenta rigidez similar aos elementos monolíticos antes da ruptura, utilizando menos consumo de fibras, porém com um posicionamento ótimo na região que demanda maiores esforços de tração.

Diante desses apontamentos, a tecnologia desenvolvida nesse estudo se mostra promissora no campo da análise experimental, principalmente por se tratar de uma ferramenta de código em aberto. Enquadrada como um ensaio não destrutivo e não invasivo, pode se tornar adequada para o monitoramento de estruturas já executadas, detectando e quantificando informações cinemáticas da estrutura ao longo de sua vida útil. Vale ressaltar que para isso importantes aprimoramentos devem ser feitos no *ITOM*, principalmente no processo de automatização na análise dos resultados.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Aprimoramento do processo de automatização da medição direta em imagens e dos campos cinemáticos no *script* para o *ITOM*;
- Análise comparativa baseada no tipo de elemento finito;
- Desenvolvimento de um manual explicando o funcionamento, configuração de ensaio e execução do *ITOM* para fins laboratoriais;

- Capacitação para uso da ferramenta, onde juntamente com o manual buscará diminuir, através de uma padronização, o erro humano associado a análise.
- Realizar uma investigação mais aprofundada a partir de um conjunto amostral maior.

REFERÊNCIAS

- ABREU, W. G. *Identificação de práticas sustentáveis aplicadas às edificações*. Tese (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2012. Disponível em: <<http://poscivil.sites.uff.br/wp-content/uploads/sites/461/2018/10/disseracaoformatada.pdf>>.
- AGOSTINHO, S. L. *Inspecção e monitorização de estruturas em engenharia civil – Utilização de UAV na Inspecção e Monitorização*. Tese (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade da Madeira, Funchal, 2012. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10400.13/570>>.
- AGRA, R. R. *Influência do tipo de fibra no comportamento à flexão de vigas de concreto fluido*. 115 p. Tese (Monografia em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Alagoas, Maceió, AL, 2017.
- ALVES, V. N. *Estudo de novas estratégias para identificação de danos estruturais a partir de dados vibracionais*. Tese (Dissertação de Mestrado em Ciências da Engenharia Civil) — Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. *ACI 228.2R: Nondestructive test methods for evaluation of concrete in structures*. Farmington Hills, 1998. 62 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. *ASTM C597-16: Standard test method for pulse velocity through concrete*. West Conshohocken, 2016. 4 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. *ASTM C805: Standard test method for rebound number of hardened concrete*. West Conshohocken, 2018. 4 p.
- ANDRADE, G. M. R. *Avaliação do desempenho da prescrição de diferentes equipamentos para realização dos ensaios não destrutivos de pacometria*. Tese (Monografia em Engenharia Civil) — Centro Universitário de Brasília, Brasília, 2017.
- ANDREUCCI, R. *Radiologia Industrial*. [s.n.], 2014. Disponível em: <www.abendi.org.br>.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15530: Fibras de aço para concreto - especificações*. Rio de Janeiro, 2007. 7 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7222: Concreto – determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, 2011. 5 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5674: Manutenção de edificações — requisitos para o sistema de gestão de manutenção*. Rio de Janeiro, 2012. 25 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7584: Concreto endurecido — avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão — método de ensaio*. Rio de Janeiro, 2012. 10 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto — procedimento*. Rio de Janeiro, 2014. 238 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12655*: Concreto de cimento portland - preparo, controle, recebimento e aceitação - procedimento. Rio de Janeiro, 2015. 23 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15823*: Concreto autoadensável parte 2: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual - método do cone de abrams. Rio de Janeiro, 2017. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15823*: Concreto – determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual - método do cone de abrams. Rio de Janeiro, 2017. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5739*: Concreto – ensaios de compressão de corpo de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8802*: Concreto endurecido - determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2019. 11 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9452*: Inspeção de pontes, viadutos e passarelas de concreto - procedimento. Rio de Janeiro, 2019. 48 p.

AYDİN, F.; SARIBIYIK, M. Correlation between schmidt hammer and destructive compressions testing for concretes in existing buildings. *Scientific research and essays*, v. 5, 07 2010.

BARRETO JÚNIOR, E. *Utilização do método de correlação de imagens na caracterização de materiais metálicos e poliméricos*. Tese (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Fluminense, Niterói, 2008. Disponível em: <<http://www.mec.uff.br/pdfteses/ErlyBarretoJunior2008.pdf>>.

BRITISH STANDARD. *BS 1881: Part 204*: Recommendations on the use of electromagnetic covermeters. [S.l.], 1988. 14 p.

BRITO, L. D. *Patologias em estruturas de madeira: metodologia de inspeção e técnicas de reabilitação*. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) — Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014. Disponível em: <http://www.set.eesc.usp.br/static/media/producao/2014DO_LeandroDussarratBrito.pdf>.

BUNGEY, J. H.; GRANTHAM, M. G. *Testing of concrete in structures*. [S.l.]: Crc Press, 2006.

CARRILLO, O. J. B. *Detecção de dano a partir da resposta dinâmica da estrutura: estudo analítico com aplicação a estruturas do tipo viga*. Tese (Dissertação de Mestrado em Engenharia de Estruturas) — Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2004. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-05042016-135235/>>.

CARVALHO, I. Q. F. *et al.* Análise comportamental de peças de crfa com dupla camada através do método indutivo. In: . Fortaleza: 61º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2019. p. 14.

CARVALHO, P. P. M. d. *Estudo Teórico-Experimental do Dano em Vigas de Concreto*. 156 p. Tese (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Alagoas, Maceió, AL, 2015. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufal.br/handle/riufal/2974>>.

CARVALHO, T. G. B. *Propriedades dos solos transparentes e técnicas de correlação de imagens digitais para aplicação em modelagem física geotécnica*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) — Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campo dos Goytacazes, 2015. Disponível em: <<http://uenf.br/posgraduacao/engenharia-civil/wp-content/uploads/sites/3/2016/12/Teses-de-Doutorado-2015-TIAGO-GOMES-BARROSO-CARVALHO.pdf>>.

CAWLEY, P.; ADAMS, R. The location of defects in structures from measurements of natural frequencies. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design - J STRAIN ANAL ENG DESIGN*, v. 14, p. 49–57, 04 1979.

CHU, T.; RANSON, W.; SUTTON, M. Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics. *Experimental Mechanics*, v. 25, p. 232–244, 09 1985.

COÍÁS, V. *Inspecções e Ensaios na Reabilitação de Edifícios*. 2rd. ed. [S.l.]: IST Press, 2009. 448 p. ISBN 978-972-8469-53-5.

CORREIA, C. E. R. *Processamento de imagens para a obtenção de dados em escoamento bifásico gás-líquido*. Tese (Doutorado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil, 2015. Disponível em: <http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/Busca_etds.php?strSecao=resultado&nrSeq=25640@1>.

CRAVEIRO, R. L.; SOUZA, E. M. *Análise exploratória de dados biológicos*. 2014.

CURT, J. *et al.* Optimal digital color image correlation. *Optics and Lasers in Engineering*, v. 127, 01 2019.

EBENSPERGER, L.; DONOSO, J. Metodología integral de diagnóstico de estructuras de concreto reforzado. In: . [S.l.: s.n.], 2019.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. *EN 14651: Test method for metallic fiber-reinforced concrete –measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (lop), residual)*. London, 2007. 15 p.

FARRAR, C.; WORDEN, K. *Structural Health Monitoring A Machine Learning Perspective*. [S.l.: s.n.], 2013. ISBN 978-1-119-99433-6.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON – FIB. *Fib Model Code 2010: Fib model code for concrete structures 2010*. Switzerland, 2013.

FERRAZ, D. H. S. *Obtenção de campos de deslocamentos e deformações através de técnicas de correlação de imagens digitais*. 113 p. Tese (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Alagoas, Maceió, AL, 2013. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufal.br/handle/riufal/3484>>.

FERREIRA, F. M. M. *Influência da incorporação de ar em concreto autoadensável para paredes de concreto moldadas no local*. Tese (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil (Estruturas)) — Universidade de São Paulo, São Carlos, 07 2019. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-24062019-095210/>>.

FIGUEIREDO, A. Concreto com fibras. In: _____. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1327–1365. ISBN 9788598576206.

FREITAS, D. J. P. *et al.* Análise do comportamento de elementos estruturais em dupla camada de concreto por meio de ensaio a flexão. In: . Fortaleza: 61º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2019. p. 16.

GERE, J. M.; GOODNO, B. J. *Mecânica dos Materiais*. 7. ed. [S.l.: s.n.], 2011.

GOMES, P. C. C. *Optimization and characterization of high-strength self-compacting concrete*. Tese (Doutorado em Engenharia) — Universidad Politécnica de Catalunya, Catalunya, 2002.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. *Digital Image Processing*. 2nd. ed. USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 2001. ISBN 0201180758.

HAACK, M. *Aplicação de técnicas de inspeção em pontes de madeira do município de Cunha Porã*. 103 p. Tese (Monografia em Engenharia Civil) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2015.

HELAL, J.; SOFI, M.; MENDIS, P. Non-destructive testing of concrete: A review of methods. *Electronic Journal of Structural Engineering*, v. 14, p. 97–105, 01 2015.

HIBBELER, R. C. *Resistência dos Materiais*. 7. ed. [S.l.: s.n.], 2010.

HOLA, J.; SCHABOWICZ, K. State-of-the-art non-destructive methods for diagnostic testing of building structures – anticipated development trends. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, v. 10, n. 3, p. 5 – 18, 2010. ISSN 1644-9665. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1644966512601332>>.

KHOO, S. W.; KARUPPANAN, S.; TAN, C. A review of surface deformation and strain measurement using two-dimensional digital image correlation. *Metrology and Measurement Systems*, v. 23, 09 2016.

KOH, B.; DYKE, S. Structural health monitoring for flexible bridge structures using correlation and sensitivity of modal data. *Computers & Structures*, v. 85, n. 3, p. 117 – 130, 2007. ISSN 0045-7949. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045794906003063>>.

KUMAR, S.; SANTHANAM, M. Detection of concrete damage using ultrasonic pulse velocity method. 05 2020.

LAW, S.-S.; ZHU, X. *Damage Models and Algorithms for Assessment of Structures under Operating Conditions*. [S.l.: s.n.], 2009. ISBN 978-0-415-45264-9.

LECOMPTE, D. *et al.* Analysis of speckle patterns for deformation measurements by dic. In: . [S.l.: s.n.], 2006. v. 6341, p. 63410E–63410E.

LEITÃO, A. C. C. *Aplicação de um método de correlação de imagem para a determinação da tenacidade à fratura em corte de adesivos estruturais*. 129 p. Tese (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica) — Instituto Superior de Engenharia do Porto, Maceió, AL, 2015.

LOURENÇO, C. S. *Os ensaios não destrutivos como ferramenta indispensável na garantia total da qualidade nos projetos de engenharia de tecnologia militar da Marinha do Brasil*. 165 p. Tese (Monografia em Engenharia de Produção) — Universidade Candido Mendes, Rio de Janeiro, 2012.

MALHOTRA, V. Surface hardness methods. In: _____. [S.l.: s.n.], 2003. p. 1–1.

MEHTA, P.; MONTEIRO, P. *Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*. [S.l.: s.n.], 2014. ISBN 978-85-98576-21-3.

MOREIRA, P. G. M. O. *Desenvolvimento de algoritmo de correlação digital de imagem para avaliação de grandes deformações*. Tese (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade de Porto, Porto, 2015. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/79471/2/35649.pdf>>.

MUDASSAR, A. A.; BUTT, S. Improved digital image correlation method. *Optics and Lasers in Engineering*, v. 87, p. 156 – 167, 2016. ISSN 0143-8166. Digital optical & Imaging methods in structural mechanics. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143816615002158>>.

NEVILLE, A.; BROOKS, J. *Tecnologia Do Concreto*. [S.l.]: Bookman Companhia Ed, 2013. 468 p. ISBN 9788582600719.

NÓBREGA, P. G. B. *Análise dinâmica de estruturas de concreto: estudo experimental e numérico das condições de contorno de estruturas pré-moldadas*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, dec 2004. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-08032005-085551/>>.

OLIVEIRA, K. C. S. *Aplicação da correlação digital de imagens na análise de abertura de fissuras do CAARFA*. 157 p. Tese (Monografia em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Alagoas, Maceió, AL, 2019.

OLIVEIRA, M. A. *Monitoramento de integridade estrutural baseada em sensores piezométricos e análise de sinais no domínio do tempo*. 129 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, SP, 2013. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/100292>>.

PALECHOR, E. U. L. *Identificação de danos em vigas metálicas utilizando Wavelets e dados numéricos e experimentais*. Tese (Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil) — Universidade de Brasília, Brasília, 2013. Disponível em: <<http://repositorio.unb.br/handle/10482/14814>>.

PAN, B. Recent Progress in Digital Image Correlation. *Experimental Mechanics*, v. 51, n. 7, p. 1223–1235, sep 2011. ISSN 0014-4851. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s11340-010-9418-3>>.

PAN, B. Digital image correlation for surface deformation measurement: Historical developments, recent advances and future goals. *Measurement Science and Technology*, v. 29, p. 082001, 08 2018.

PAN, B. *et al.* Digital image correlation using iterative least squares and pointwise least squares for displacement field and strain field measurements. *Optics and Lasers in Engineering*, v. 47, p. 865–874, 07 2009.

PAN, B. *et al.* Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review. *Measurement Science and Technology*, IOP Publishing, v. 20, n. 6, p. 062001, 2009. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0957-0233/20/6/062001>>.

PETERS, W.; RANSON, W. Digital imaging techniques in experiment stress analysis. v. 21, 07 1982.

PINTO, T. L. F. d. C. *Medição óptica, comparação e sinalização de superfícies com forma livre de grande extensão*. Tese (Tese (doutorado): Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/94376>>.

RAMÍREZ, F. C. *Detecção de danos em estruturas de concreto por meio de tomografia ultrassônica*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, apr 2015. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-27052015-171423/>>.

SANTOS, J. M. M. N. d. *Avaliação da integridade estrutural de pontes de betão: o caso da Ponte Nossa Senhora da Guia*. Tese (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade de Porto, Porto, 2008. Disponível em: <<https://hdl.handle.net/10216/12388>>.

SATO, M. *et al.* Dual boundary element applied to 2d fatigue crack propagation in a thin aluminum plate. 2009.

SCHABOWICZ, K. Non-Destructive Testing of Materials in Civil Engineering. *Materials (Basel, Switzerland)*, MDPI, v. 12, n. 19, p. 3237, oct 2019. ISSN 1996-1944. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6804297/>>.

SCHREIER, H.; SUTTON, M. Systematic errors in digital image correlation due to undermatched subset shape functions. *Experimental Mechanics*, v. 42, p. 303–310, 09 2002.

SHULL, P. *Nondestructive evaluation: Theory, techniques, and applications*. [S.l.: s.n.], 2016. 1-806 p.

SILVA, R. L. *Identificação e localização de danos em estruturas de concreto por meio de análise modal, experimental e numérica*. Tese (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, na área de Estruturas e Geotécnica) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2018. Disponível em: <<http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/33175>>.

SILVA, R. N. F. *Monitoramento de Integridade Estrutural Utilizando a Técnica da Impedância Eletromecânica Aplicada em Estruturas de Concreto*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, nov 2017. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/20889>>.

SILVA, R. S. Y. R. C. *Monitoramento e identificação numérico e experimental de danos em vigas e pontes de aço e concreto utilizando transformadas de Wavelet*. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) — Universidade de Brasília, Brasília, 2015. Disponível em: <<https://repositorio.unb.br/handle/10482/20499>>.

SKARZYNSKI, L.; SYROKA-KOROL, E.; TEJCHMAN, J. Measurements and calculations of the width of the fracture process zones on the surface of notched concrete beams. *Strain*, v. 47, p. e319 – e332, 03 2009.

SMITH, R. Nondestructive testing: Radiography, ultrasonics, liquid penetrant, magnetic particle, eddy current. l. cartz, asm international, materials park, oh 44073-0002, usa. 1995. 229pp. illustrated. £84. *The Aeronautical Journal (1968)*, Cambridge University Press, v. 100, n. 993, p. 108–109, 1996.

SOHN, H. *et al.* *A Review of Structural Health Monitoring Literature: 1996–2001*. 2004.

SPEIGHT, B. A. *Maintenance policy, programming and information feedback*. [S.l.]: Butterworths, 1980.

SUTTON, M.; ORTEU, J.-J.; SCHREIER, H. *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements. Basic Concepts, Theory and Applications*. Boston, MA: Springer US, 2009. 322 p. ISBN 978-0-387-78746-6. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-0-387-78747-3>>.

VALLUZZI, M. *et al.* A contribution to the characterization of masonry typologies by using sonic waves investigations. 05 2020.

VÁRADY FILHO, C. A. F. *Um ambiente computacional de alto desempenho para cálculo de deslocamento usando correlação de imagens digitais*. 116 p. Tese (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Alagoas, Maceió, AL, 2016. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufal.br/handle/riufal/1502>>.

VECCA, C. R.; LUCERO, R. S. Parámetros que influyen em los resultados de los ensayos no destructivos de esclerometría y ultrasonido. In: . Asunción, Paraguay: 1er Congreso Nacional de Ingeniería Civil, 2010.

WANG, X. *et al.* Structural damage identification using static test data and changes in frequencies. *Engineering Structures*, v. 23, n. 6, p. 610 – 621, 2001. ISSN 0141-0296. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029600000869>>.

WORDEN, K.; DULIEU-BARTON, J. M. An Overview of Intelligent Fault Detection in Systems and Structures. *Structural Health Monitoring: An International Journal*, v. 3, n. 1, p. 85–98, mar 2004. ISSN 1475-9217. Disponível em: <<http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1475921704041866>>.

Apêndices

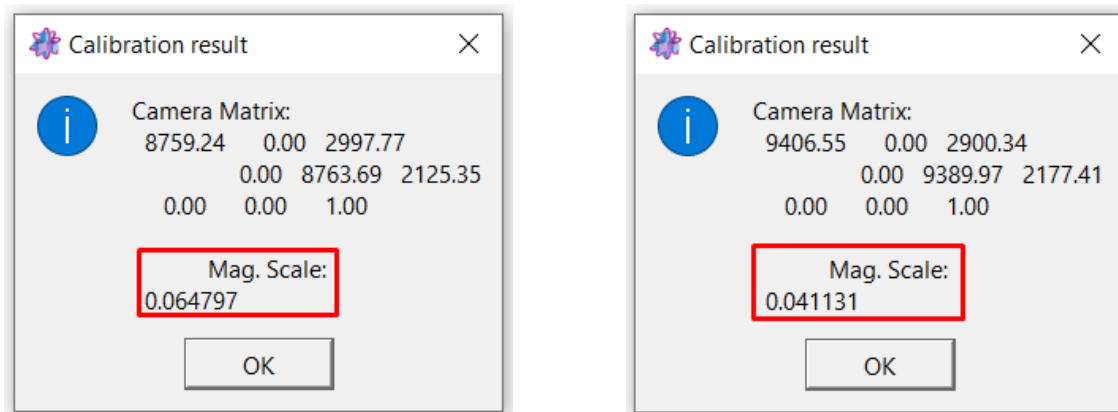
APÊNDICE A – DADOS CALIBRAÇÃO

A.1 FATOR DE MAGNIFICAÇÃO

Figura A.1 – Parâmetros de calibração.

(a) Fator de magnificação: Vigas MON, em pixel/mm.

(b) Fator de magnificação: Vigas DC, em pixel/mm.



Fonte: Autor, 2020.

A.2 CURVAS DE CALIBRAÇÃO DOS LVDT'S

Tabela A.1 – Resumo da análise dos LVDT's via regressão linear.

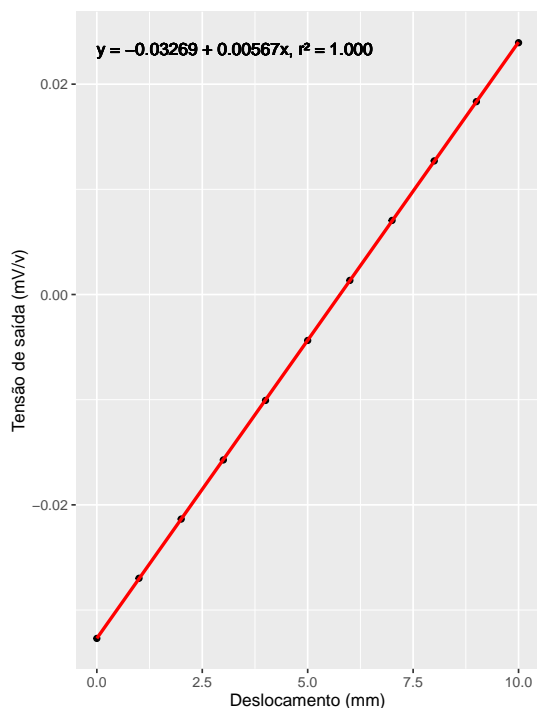
	Coef. de Pearson	P-valor	* Erro Médio(%)
MON ESQ	0,9999978	$2,2e^{-16}$	2,30
MON DIR	0,9999974	$2,2e^{-16}$	3,16
DC ESQ	0,9999974	$2,2e^{-16}$	1,04
DC DIR	0,9999953	$2,2e^{-16}$	1,26

Fonte: Autor, 2020.

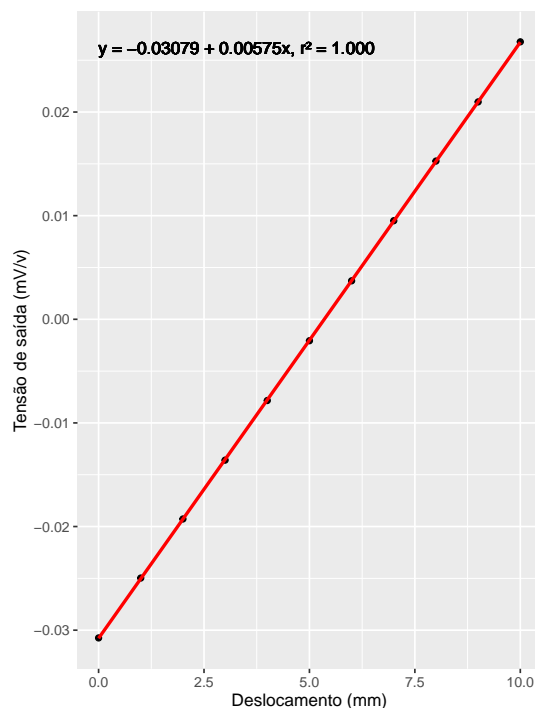
* Erro médio entre valores quantificados pelos LVDT's e a função de ajuste.

Figura A.2 – Calibração dos LVDT's para espécimes monolíticos.

(a) Curva de calibração LVDT esquerdo.



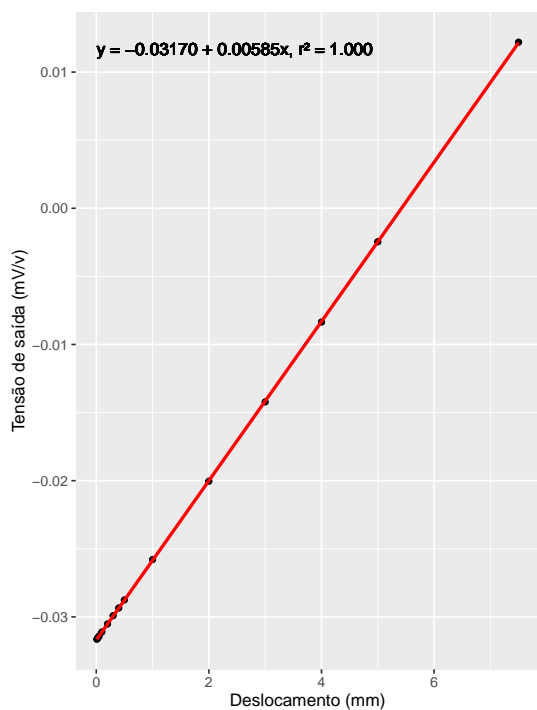
(b) Curva de calibração LVDT direito.



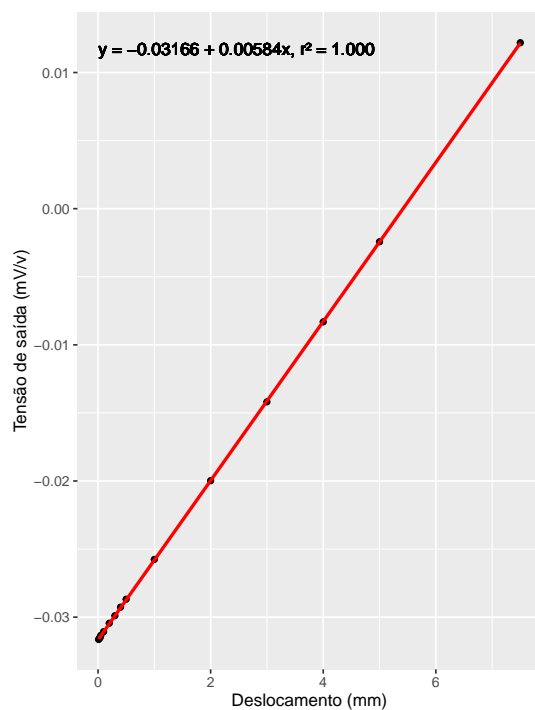
Fonte: Autor, 2020.

Figura A.3 – Calibração dos LVDT's para espécimes em dupla camada.

(a) Curva de calibração LVDT esquerdo.



(b) Curva de calibração LVDT direito.



Fonte: Autor, 2020.

APÊNDICE B – CAMPOS CINEMÁTICOS: DESLOCAMENTOS

B.1 VALORES NODAIS: DESLOCAMENTOS

Tabela B.1 – Viga MON V1

Nó	<i>Iteração 1</i>		<i>Iteração 2</i>		<i>Iteração 3</i>	
	<i>Ux (mm)</i>	<i>Uy (mm)</i>	<i>Ux (mm)</i>	<i>Uy (mm)</i>	<i>Ux (mm)</i>	<i>Uy (mm)</i>
1	-0,00497	0,01146	-0,00669	0,02835	-0,00913	0,04232
2	-0,00310	0,01365	-0,00526	0,03025	-0,00802	0,04645
3	-0,00200	0,01263	-0,00495	0,03243	-0,00873	0,04962
4	-0,00144	0,01410	-0,00338	0,03471	-0,00671	0,05392
5	-0,00280	0,01584	-0,00671	0,03936	-0,01171	0,05856
6	0,00325	0,01450	0,00963	0,03736	0,01301	0,05779
7	0,00365	0,01395	0,00840	0,03504	0,01122	0,05366
8	0,00414	0,01326	0,00895	0,03209	0,01191	0,05027
9	0,00393	0,01311	0,00896	0,03082	0,01153	0,04673
10	0,00459	0,01334	0,00912	0,02890	0,01179	0,04289
11	0,00888	0,01335	0,01181	0,02539	0,01319	0,03941
12	-0,00533	0,01265	-0,00838	0,02777	-0,01090	0,04160
13	-0,00377	0,01287	-0,00731	0,02970	-0,01077	0,04555
14	-0,00294	0,01265	-0,00623	0,03280	-0,01001	0,05048
15	-0,00216	0,01420	-0,00521	0,03536	-0,00820	0,05363
16	-0,00371	0,01568	-0,00935	0,03864	-0,01542	0,05899
17	0,00265	0,01566	0,00700	0,03864	0,01024	0,05820
18	0,00441	0,01392	0,01044	0,03437	0,01442	0,05428
19	0,00445	0,01364	0,00921	0,03274	0,01272	0,05147
20	0,00518	0,01278	0,01023	0,03022	0,01384	0,04705
21	0,00451	0,01325	0,00988	0,02779	0,01300	0,04362
22	0,00625	0,01238	0,01127	0,02455	0,01464	0,03867
23	-0,00555	0,01135	-0,00824	0,02667	-0,01273	0,04168
24	-0,00328	0,01257	-0,00795	0,03086	-0,01203	0,04721
25	-0,00356	0,01296	-0,00778	0,03244	-0,01250	0,05038
26	-0,00251	0,01401	-0,00604	0,03526	-0,01027	0,05383
27	-0,00408	0,01534	-0,01136	0,04007	-0,01783	0,05997
28	0,00301	0,01525	0,00706	0,03911	0,00997	0,05783
29	0,00470	0,01347	0,01205	0,03510	0,01658	0,05560
30	0,00444	0,01339	0,01040	0,03277	0,01467	0,05095
31	0,00496	0,01209	0,01078	0,03026	0,01489	0,04795

Continuação da Tabela B.1

	<i>Iteração 1</i>		<i>Iteração 2</i>		<i>Iteração 3</i>	
32	0,00458	0,01209	0,01042	0,02750	0,01468	0,04374
33	0,00508	0,01228	0,01062	0,02585	0,01461	0,03945
34	-0,00449	0,01215	-0,00926	0,02592	-0,01351	0,04165
35	-0,00405	0,01266	-0,00904	0,03040	-0,01421	0,04614
36	-0,00257	0,01298	-0,00821	0,03351	-0,01417	0,05184
37	-0,00296	0,01405	-0,00775	0,03555	-0,01245	0,05494
38	-0,00495	0,01499	-0,01258	0,03964	-0,02014	0,06003
39	0,00242	0,01600	0,00680	0,03959	0,00899	0,05798
40	0,00576	0,01383	0,01376	0,03482	0,01926	0,05468
41	0,00515	0,01285	0,01226	0,03316	0,01633	0,05172
42	0,00519	0,01265	0,01155	0,02970	0,01646	0,04720
43	0,00479	0,01159	0,01150	0,02739	0,01645	0,04267
44	0,00683	0,01276	0,01184	0,02569	0,01708	0,03883
45	-0,00521	0,01227	-0,01030	0,02856	-0,01544	0,04277
46	-0,00451	0,01296	-0,01006	0,02974	-0,01584	0,04623
47	-0,00438	0,01314	-0,01024	0,03303	-0,01705	0,05128
48	-0,00242	0,01389	-0,00799	0,03652	-0,01337	0,05514
49	-0,00465	0,01531	-0,01378	0,04057	-0,02223	0,06121
50	0,00300	0,01504	0,00825	0,03958	0,01129	0,05746
51	0,00593	0,01337	0,01478	0,03537	0,02067	0,05596
52	0,00543	0,01315	0,01294	0,03235	0,01812	0,05066
53	0,00518	0,01151	0,01342	0,03009	0,01864	0,04838
54	0,00560	0,01206	0,01136	0,02714	0,01723	0,04265
55	0,00603	0,01102	0,01392	0,02545	0,01881	0,04072
56	-0,00439	0,01301	-0,01204	0,02738	-0,01804	0,04192
57	-0,00392	0,01203	-0,01082	0,02970	-0,01746	0,04637
58	-0,00369	0,01366	-0,01090	0,03303	-0,01880	0,05109
59	-0,00307	0,01385	-0,01019	0,03616	-0,01606	0,05422
60	-0,00509	0,01579	-0,01464	0,04053	-0,02347	0,05992
61	0,00532	0,01543	0,01322	0,03950	0,01824	0,05855
62	0,00611	0,01328	0,01489	0,03475	0,02095	0,05448
63	0,00601	0,01302	0,01453	0,03287	0,02022	0,05171
64	0,00602	0,01224	0,01418	0,02935	0,01953	0,04655
65	0,00586	0,01163	0,01376	0,02723	0,01970	0,04352
66	0,00586	0,01275	0,01403	0,02616	0,01997	0,04087
67	-0,00535	0,01217	-0,01153	0,02694	-0,01984	0,04208
68	-0,00379	0,01243	-0,01118	0,02939	-0,01941	0,04695

Continuação da Tabela B.1

	<i>Iteração 1</i>		<i>Iteração 2</i>		<i>Iteração 3</i>	
69	-0,00426	0,01327	-0,01307	0,03355	-0,02104	0,05134
70	-0,00346	0,01387	-0,01105	0,03529	-0,01789	0,05493
71	-0,00565	0,01515	-0,01757	0,04125	-0,02772	0,06032
72	0,00547	0,01478	0,01355	0,03850	0,01929	0,05712
73	0,00673	0,01360	0,01672	0,03609	0,02291	0,05560
74	0,00593	0,01171	0,01564	0,03228	0,02162	0,05190
75	0,00629	0,01147	0,01540	0,02951	0,02182	0,04766
76	0,00587	0,01189	0,01475	0,02787	0,02144	0,04399
77	0,00652	0,01049	0,01440	0,02396	0,02236	0,03973
78	-0,00478	0,01202	-0,01287	0,02741	-0,02223	0,04244
79	-0,00301	0,01265	-0,01186	0,03017	-0,02094	0,04796
80	-0,00444	0,01325	-0,01402	0,03295	-0,02354	0,05158
81	-0,00383	0,01379	-0,01269	0,03550	-0,02012	0,05526
82	-0,00676	0,01508	-0,01992	0,04075	-0,03087	0,06069
83	0,00397	0,01566	0,00898	0,03925	0,01195	0,05574
84	0,00747	0,01295	0,01891	0,03553	0,02637	0,05681
85	0,00657	0,01269	0,01648	0,03265	0,02304	0,05125
86	0,00649	0,01085	0,01705	0,02999	0,02355	0,04836
87	0,00670	0,01139	0,01608	0,02721	0,02289	0,04365
88	0,00668	0,01053	0,01638	0,02550	0,02372	0,04031
89	-0,00570	0,01225	-0,01316	0,02610	-0,02462	0,04355
90	-0,00454	0,01271	-0,01345	0,02929	-0,02337	0,04636
91	-0,00421	0,01317	-0,01505	0,03272	-0,02502	0,05115
92	-0,00463	0,01412	-0,01426	0,03518	-0,02205	0,05409
93	-0,00699	0,01588	-0,02049	0,04095	-0,03181	0,05936
94	0,00444	0,01619	0,01142	0,04040	0,01614	0,05627
95	0,00758	0,01269	0,01906	0,03620	0,02692	0,05715
96	0,00647	0,01173	0,01751	0,03296	0,02431	0,05249
97	0,00661	0,01133	0,01734	0,02969	0,02545	0,04829
98	0,00708	0,01107	0,01790	0,02748	0,02516	0,04491
99	0,00845	0,01140	0,01798	0,02569	0,02580	0,04007
100	-0,00663	0,01323	-0,01582	0,02663	-0,02476	0,04043
101	-0,00489	0,01237	-0,01479	0,02859	-0,02558	0,04657
102	-0,00474	0,01236	-0,01654	0,03270	-0,02700	0,05284
103	-0,00419	0,01403	-0,01469	0,03623	-0,02387	0,05646
104	-0,00604	0,01539	-0,01985	0,03954	-0,03237	0,06003
105	0,00455	0,01620	0,01079	0,03849	0,01639	0,05383

Continuação da Tabela B.1

	<i>Iteração 1</i>		<i>Iteração 2</i>		<i>Iteração 3</i>	
106	0,00735	0,01287	0,01963	0,03597	0,02841	0,05786
107	0,00655	0,01185	0,01759	0,03200	0,02595	0,05299
108	0,00660	0,01185	0,01689	0,02982	0,02575	0,04922
109	0,00759	0,01167	0,01843	0,02705	0,02642	0,04414
110	0,00878	0,01069	0,01978	0,02541	0,02701	0,04067
111	-0,00594	0,01327	-0,01574	0,02598	-0,02678	0,04162
112	-0,00434	0,01258	-0,01634	0,03008	-0,02800	0,04892
113	-0,00440	0,01192	-0,01553	0,03036	-0,02783	0,04988
114	-0,00377	0,01159	-0,01544	0,03292	-0,02809	0,05363
115	-0,00460	0,01702	-0,01518	0,04299	-0,02551	0,06450
116	-0,00746	0,01994	-0,02238	0,04426	-0,03891	0,06196
117	0,00774	0,01591	0,02737	0,04295	0,04671	0,05943
118	0,00631	0,01092	0,01813	0,03379	0,02587	0,05462
119	0,00835	0,01096	0,01955	0,02925	0,02931	0,04786
120	0,00791	0,01123	0,02004	0,02675	0,02838	0,04377
121	0,00945	0,01259	0,02101	0,02625	0,02919	0,04044

Tabela B.2 – Viga MON V2

<i>Nó</i>	<i>Iteração 1</i>		<i>Iteração 2</i>		<i>Iteração 3</i>	
	<i>Ux (mm)</i>	<i>Uy (mm)</i>	<i>Ux (mm)</i>	<i>Uy (mm)</i>	<i>Ux (mm)</i>	<i>Uy (mm)</i>
1	-0,01648	0,02122	-0,01260	0,03252	-0,01443	0,04467
2	-0,01363	0,02364	-0,01529	0,03456	-0,01355	0,04261
3	-0,00943	0,02206	-0,00789	0,03950	-0,00639	0,05371
4	-0,01358	0,02345	-0,01290	0,04016	-0,01168	0,05515
5	-0,00859	0,02354	-0,00941	0,04357	-0,01336	0,06239
6	-0,00963	0,02419	-0,00677	0,04503	0,00701	0,06100
7	0,00429	0,02328	0,01268	0,04160	0,01916	0,05961
8	0,00593	0,02169	0,01109	0,03910	0,01702	0,05447
9	0,01049	0,02288	0,01399	0,03596	0,01956	0,04749
10	0,01182	0,02234	0,01724	0,03383	0,02084	0,04259
11	0,01184	0,02151	0,01563	0,02951	0,02071	0,04375
12	-0,01601	0,02025	-0,01581	0,03449	-0,01394	0,04264
13	-0,01419	0,02175	-0,01235	0,03576	-0,01237	0,04796
14	-0,01108	0,02129	-0,01179	0,03853	-0,01104	0,05314
15	-0,01105	0,02301	-0,01134	0,04200	-0,00913	0,05687
16	-0,01306	0,02275	-0,01270	0,04237	-0,01953	0,05939
17	-0,01365	0,02634	-0,01391	0,04493	0,00845	0,05793

Continuação da Tabela B.2

	<i>Iteração 1</i>		<i>Iteração 2</i>		<i>Iteração 3</i>	
18	0,00752	0,02192	0,01622	0,04034	0,02324	0,05647
19	0,00650	0,02136	0,01254	0,03907	0,01837	0,05418
20	0,00391	0,01942	0,01145	0,03603	0,01797	0,05225
21	0,00697	0,01902	0,01391	0,03361	0,02036	0,04790
22	0,00660	0,02033	0,01341	0,03290	0,01904	0,04376
23	-0,01120	0,01809	-0,01082	0,03170	-0,01122	0,04489
24	-0,01136	0,02021	-0,01332	0,03635	-0,01250	0,05083
25	-0,01261	0,02051	-0,01393	0,03902	-0,01384	0,05386
26	-0,00917	0,02087	-0,01020	0,04165	-0,00893	0,05926
27	-0,00996	0,02269	-0,01115	0,04601	-0,01401	0,05937
28	-0,00960	0,02536	-0,00887	0,04744	0,00137	0,05947
29	0,00377	0,02101	0,01537	0,04265	0,02294	0,06177
30	0,00251	0,02039	0,01128	0,03942	0,01816	0,05718
31	0,00320	0,01882	0,01260	0,03664	0,02031	0,05248
32	0,00750	0,01977	0,01411	0,03351	0,02207	0,04697
33	0,01153	0,01773	0,01769	0,03051	0,02263	0,04300
34	-0,01878	0,02365	-0,01882	0,03597	-0,01997	0,04681
35	-0,01221	0,01859	-0,01254	0,03566	-0,01353	0,04920
36	-0,01473	0,02286	-0,01722	0,03838	-0,01771	0,05194
37	-0,01097	0,02181	-0,01271	0,04152	-0,01205	0,05789
38	-0,01082	0,02339	-0,01353	0,04616	-0,01902	0,06216
39	-0,01065	0,02417	-0,00843	0,04628	0,00432	0,06056
40	0,00562	0,02233	0,01889	0,04221	0,02652	0,05896
41	0,00378	0,02105	0,01341	0,04045	0,02108	0,05795
42	0,00596	0,01976	0,01537	0,03710	0,02230	0,05213
43	0,00578	0,02033	0,01490	0,03427	0,02143	0,04753
44	0,00698	0,01830	0,01459	0,03246	0,02212	0,04302
45	-0,01526	0,02097	-0,01646	0,03400	-0,01856	0,04463
46	-0,01532	0,02102	-0,01672	0,03534	-0,01788	0,04872
47	-0,01253	0,02071	-0,01533	0,03970	-0,01668	0,05499
48	-0,01340	0,02215	-0,01483	0,04147	-0,01472	0,05697
49	-0,01051	0,02260	-0,01192	0,04562	-0,01759	0,06266
50	-0,01245	0,02531	-0,01796	0,04975	-0,01073	0,06246
51	0,00473	0,02240	0,01617	0,04164	0,03054	0,06226
52	0,00481	0,02042	0,01483	0,04018	0,02111	0,05629
53	0,00492	0,02025	0,01572	0,03710	0,02384	0,05270
54	0,00397	0,01638	0,01425	0,03231	0,02294	0,04851

Continuação da Tabela B.2

	<i>Iteração 1</i>		<i>Iteração 2</i>		<i>Iteração 3</i>	
55	0,00725	0,01934	0,01661	0,03101	0,02534	0,04271
56	-0,01583	0,02062	-0,01759	0,03313	-0,01787	0,04456
57	-0,01355	0,02020	-0,01665	0,03578	-0,01852	0,04945
58	-0,01237	0,02023	-0,01585	0,03816	-0,01674	0,05423
59	-0,01229	0,02094	-0,01511	0,04182	-0,01657	0,05860
60	-0,01127	0,02273	-0,01460	0,04594	-0,01740	0,06278
61	-0,01283	0,02521	-0,01472	0,04925	-0,01585	0,06248
62	0,00485	0,02219	0,01767	0,04216	0,02746	0,06219
63	0,00395	0,01997	0,01511	0,03976	0,02369	0,05759
64	0,00436	0,01867	0,01608	0,03659	0,02511	0,05292
65	0,00397	0,01835	0,01481	0,03444	0,02357	0,05018
66	0,00642	0,01866	0,01593	0,03008	0,02512	0,04174
67	-0,01591	0,02065	-0,01840	0,03461	-0,02228	0,04659
68	-0,01336	0,01838	-0,01755	0,03646	-0,01812	0,05127
69	-0,01143	0,01869	-0,01486	0,03865	-0,01787	0,05702
70	-0,01077	0,02060	-0,01595	0,04321	-0,01768	0,06025
71	-0,01151	0,02204	-0,01588	0,04559	-0,01934	0,06354
72	-0,01405	0,02531	-0,01792	0,05006	-0,02118	0,06414
73	0,00349	0,02247	0,01824	0,04294	0,02862	0,06474
74	0,00522	0,02009	0,01690	0,03955	0,02556	0,05591
75	0,00348	0,01921	0,01684	0,03733	0,02668	0,05521
76	0,00596	0,01772	0,01821	0,03337	0,02761	0,04693
77	0,00607	0,01728	0,01716	0,03174	0,02747	0,04640
78	-0,01694	0,01953	-0,01891	0,03447	-0,02276	0,04535
79	-0,01385	0,02030	-0,01751	0,03706	-0,02227	0,05131
80	-0,01202	0,01903	-0,01700	0,03759	-0,01912	0,05458
81	-0,01087	0,01949	-0,01635	0,04293	-0,01971	0,06064
82	-0,01210	0,02279	-0,01591	0,04505	-0,02088	0,06264
83	-0,01399	0,02500	-0,02081	0,05025	-0,02097	0,06164
84	0,00423	0,02166	0,01736	0,04306	0,03213	0,05949
85	0,00512	0,02048	0,01839	0,04111	0,02592	0,05734
86	0,00455	0,01856	0,01824	0,03602	0,02904	0,05441
87	0,00569	0,01834	0,01793	0,03434	0,02846	0,04969
88	0,00495	0,01588	0,01640	0,02997	0,02748	0,04548
89	-0,01778	0,01993	-0,02051	0,03446	-0,02543	0,04721
90	-0,01056	0,01652	-0,01619	0,03527	-0,02237	0,05217
91	-0,01165	0,01905	-0,01805	0,03873	-0,02247	0,05544

Continuação da Tabela B.2

	<i>Iteração 1</i>		<i>Iteração 2</i>		<i>Iteração 3</i>	
92	-0,01164	0,02015	-0,01775	0,04183	-0,02167	0,05845
93	-0,01307	0,02286	-0,01858	0,04576	-0,02344	0,06201
94	-0,01375	0,02510	-0,02064	0,04857	-0,02102	0,06106
95	0,00668	0,02246	0,02255	0,04090	0,04092	0,06011
96	0,00606	0,02043	0,01831	0,03994	0,02748	0,05599
97	0,00475	0,01909	0,02024	0,03780	0,03171	0,05423
98	0,00603	0,01702	0,01938	0,03309	0,03067	0,04896
99	0,00613	0,01745	0,01977	0,03142	0,03099	0,04267
100	-0,01533	0,01766	-0,01962	0,03414	-0,02288	0,04688
101	-0,01531	0,02102	-0,02074	0,03629	-0,02587	0,04887
102	-0,01309	0,01933	-0,02073	0,03806	-0,02564	0,05544
103	-0,01044	0,01968	-0,01806	0,04250	-0,02387	0,06094
104	-0,01425	0,02411	-0,01927	0,04377	-0,02309	0,06351
105	-0,01260	0,02536	-0,01958	0,05008	-0,02845	0,06228
106	0,00615	0,02204	0,01787	0,04273	0,02869	0,05639
107	0,00483	0,02014	0,02071	0,03993	0,03163	0,05815
108	0,00656	0,01946	0,02039	0,03790	0,03187	0,05369
109	0,00553	0,01740	0,02014	0,03366	0,03185	0,05082
110	0,00663	0,01712	0,01975	0,03064	0,03268	0,04554
111	-0,01636	0,02093	-0,01982	0,03326	-0,02515	0,04617
112	-0,01230	0,01675	-0,01879	0,03428	-0,02664	0,05282
113	-0,01354	0,01964	-0,02120	0,04032	-0,02560	0,05665
114	-0,01067	0,01819	-0,01947	0,04343	-0,02550	0,06331
115	-0,01109	0,01922	-0,02111	0,04682	-0,02732	0,05998
116	-0,01332	0,02368	-0,02408	0,05107	-0,03107	0,06116
117	0,00269	0,02276	0,02412	0,04860	0,04123	0,06235
118	0,00859	0,02013	0,01912	0,04816	0,02763	0,06472
119	0,00483	0,01877	0,02111	0,03684	0,03384	0,05449
120	0,00652	0,01669	0,02172	0,03332	0,03480	0,04966
121	0,01124	0,01916	0,02253	0,03036	0,03333	0,04062

Tabela B.3 – Viga MON V3

	<i>Iteração 1</i>		<i>Iteração 2</i>		<i>Iteração 3</i>	
<i>Nó</i>	<i>Ux (mm)</i>	<i>Uy (mm)</i>	<i>Ux (mm)</i>	<i>Uy (mm)</i>	<i>Ux (mm)</i>	<i>Uy (mm)</i>
1	-0,00758	0,01623	-0,01139	0,03483	-0,01973	0,05171
2	-0,00830	0,01793	-0,01115	0,03650	-0,01966	0,05567
3	-0,00750	0,01788	-0,01137	0,03933	-0,01931	0,05842

Continuação da Tabela B.3

	<i>Iteração 1</i>		<i>Iteração 2</i>		<i>Iteração 3</i>	
4	-0,00841	0,01958	-0,01224	0,04294	-0,02199	0,06439
5	-0,00719	0,01972	-0,01141	0,04153	-0,01998	0,06135
6	-0,00759	0,01920	-0,01107	0,04068	-0,02012	0,06130
7	-0,00570	0,01867	-0,00716	0,04111	-0,01437	0,06236
8	-0,00552	0,01757	-0,00740	0,03858	-0,01517	0,05984
9	-0,00634	0,01656	-0,00780	0,03626	-0,01534	0,05560
10	-0,00586	0,01443	-0,00722	0,03175	-0,01527	0,05059
11	-0,00636	0,01357	-0,00851	0,02945	-0,01698	0,04659
12	-0,00877	0,01599	-0,01269	0,03397	-0,02186	0,05119
13	-0,00928	0,01689	-0,01269	0,03662	-0,02154	0,05666
14	-0,00881	0,01877	-0,01261	0,03885	-0,02181	0,05894
15	-0,00926	0,01931	-0,01378	0,04154	-0,02363	0,06249
16	-0,00867	0,02070	-0,01397	0,04439	-0,02406	0,06164
17	-0,00718	0,01862	-0,01030	0,04043	-0,01857	0,06079
18	-0,00501	0,01952	-0,00632	0,04235	-0,01212	0,06309
19	-0,00602	0,01745	-0,00760	0,03820	-0,01401	0,05811
20	-0,00493	0,01651	-0,00624	0,03526	-0,01289	0,05487
21	-0,00592	0,01483	-0,00709	0,03214	-0,01424	0,05060
22	-0,00611	0,01413	-0,00730	0,03050	-0,01544	0,04719
23	-0,00846	0,01536	-0,01367	0,03368	-0,02395	0,05093
24	-0,00921	0,01725	-0,01365	0,03621	-0,02342	0,05500
25	-0,00933	0,01791	-0,01447	0,03955	-0,02415	0,06003
26	-0,00919	0,01895	-0,01471	0,04075	-0,02455	0,06187
27	-0,01029	0,02098	-0,01741	0,04469	-0,02957	0,06095
28	-0,00521	0,02040	-0,00695	0,04331	-0,01300	0,06141
29	-0,00405	0,01927	-0,00472	0,04128	-0,01023	0,06125
30	-0,00428	0,01700	-0,00523	0,03852	-0,01124	0,05958
31	-0,00424	0,01601	-0,00577	0,03549	-0,01173	0,05434
32	-0,00527	0,01466	-0,00608	0,03226	-0,01273	0,05062
33	-0,00517	0,01329	-0,00511	0,02921	-0,01278	0,04581
34	-0,00570	0,01510	-0,01084	0,03281	-0,02062	0,05211
35	-0,01028	0,01666	-0,01579	0,03625	-0,02589	0,05480
36	-0,00967	0,01767	-0,01573	0,03892	-0,02624	0,05842
37	-0,00920	0,01964	-0,01545	0,04119	-0,02592	0,06178
38	-0,01048	0,02099	-0,01857	0,04504	-0,03180	0,06010
39	-0,00438	0,02098	-0,00548	0,04391	-0,01054	0,06052
40	-0,00307	0,01908	-0,00363	0,04147	-0,00865	0,06094

Continuação da Tabela B.3

	<i>Iteração 1</i>		<i>Iteração 2</i>		<i>Iteração 3</i>	
41	-0,00337	0,01643	-0,00410	0,03825	-0,00956	0,05878
42	-0,00338	0,01544	-0,00423	0,03467	-0,01002	0,05458
43	-0,00494	0,01435	-0,00544	0,03188	-0,01108	0,05031
44	-0,00357	0,01292	-0,00340	0,02959	-0,00961	0,04710
45	-0,00953	0,01436	-0,01730	0,03359	-0,02871	0,05136
46	-0,00971	0,01609	-0,01605	0,03498	-0,02707	0,05462
47	-0,00990	0,01764	-0,01658	0,03933	-0,02720	0,05935
48	-0,00960	0,01866	-0,01713	0,04101	-0,02839	0,06106
49	-0,01041	0,02048	-0,01896	0,04425	-0,03306	0,06021
50	-0,00306	0,02077	-0,00339	0,04353	-0,00719	0,06072
51	-0,00320	0,01835	-0,00377	0,04079	-0,00784	0,06123
52	-0,00310	0,01706	-0,00356	0,03802	-0,00778	0,05776
53	-0,00276	0,01509	-0,00346	0,03429	-0,00760	0,05394
54	-0,00298	0,01444	-0,00248	0,03201	-0,00819	0,05064
55	-0,00455	0,01288	-0,00450	0,02958	-0,01134	0,04630
56	-0,00939	0,01418	-0,01689	0,03254	-0,02818	0,05034
57	-0,01034	0,01594	-0,01748	0,03530	-0,02897	0,05371
58	-0,00992	0,01762	-0,01770	0,03843	-0,02923	0,05873
59	-0,01015	0,01897	-0,01869	0,04035	-0,03057	0,06056
60	-0,00924	0,02078	-0,01697	0,04476	-0,02998	0,06197
61	-0,00197	0,02058	-0,00110	0,04297	-0,00303	0,06338
62	-0,00253	0,01874	-0,00360	0,04085	-0,00686	0,06133
63	-0,00227	0,01683	-0,00281	0,03711	-0,00620	0,05741
64	-0,00213	0,01508	-0,00220	0,03439	-0,00629	0,05375
65	-0,00298	0,01408	-0,00283	0,03241	-0,00717	0,04973
66	-0,00269	0,01296	-0,00225	0,02885	-0,00686	0,04667
67	-0,00977	0,01331	-0,01885	0,03140	-0,03112	0,04985
68	-0,01027	0,01488	-0,01856	0,03400	-0,03113	0,05397
69	-0,00957	0,01740	-0,01833	0,03794	-0,03117	0,05826
70	-0,01149	0,01921	-0,02131	0,04033	-0,03417	0,06014
71	-0,00946	0,02095	-0,01737	0,04461	-0,02932	0,06143
72	-0,00010	0,02023	0,00250	0,04268	0,00190	0,06272
73	-0,00218	0,01823	-0,00262	0,03940	-0,00578	0,06156
74	-0,00179	0,01697	-0,00169	0,03712	-0,00461	0,05737
75	-0,00154	0,01485	-0,00217	0,03376	-0,00521	0,05344
76	-0,00190	0,01441	-0,00104	0,03159	-0,00500	0,04988
77	-0,00177	0,01350	-0,00031	0,02937	-0,00599	0,04533

Continuação da Tabela B.3

	<i>Iteração 1</i>		<i>Iteração 2</i>		<i>Iteração 3</i>	
78	-0,00985	0,01319	-0,02035	0,03139	-0,03353	0,04972
79	-0,01092	0,01558	-0,02047	0,03420	-0,03300	0,05387
80	-0,00980	0,01676	-0,01900	0,03809	-0,03213	0,05815
81	-0,01157	0,01854	-0,02249	0,03985	-0,03634	0,06009
82	-0,00935	0,02079	-0,01733	0,04389	-0,02967	0,05912
83	0,00173	0,02022	0,00573	0,04330	0,00883	0,05981
84	-0,00164	0,01817	-0,00217	0,04002	-0,00481	0,06049
85	-0,00120	0,01649	-0,00094	0,03683	-0,00307	0,05705
86	-0,00140	0,01564	-0,00062	0,03507	-0,00316	0,05399
87	-0,00153	0,01400	-0,00051	0,03091	-0,00397	0,04955
88	-0,00064	0,01391	0,00018	0,02831	-0,00441	0,04507
89	-0,01017	0,01292	-0,02075	0,03038	-0,03489	0,04963
90	-0,01129	0,01528	-0,02165	0,03419	-0,03534	0,05404
91	-0,01045	0,01617	-0,02116	0,03674	-0,03491	0,05804
92	-0,01128	0,01835	-0,02136	0,04045	-0,03528	0,06030
93	-0,01182	0,01958	-0,02326	0,04367	-0,03807	0,06469
94	0,00158	0,02008	0,00534	0,04327	0,00714	0,06263
95	-0,00068	0,01830	-0,00015	0,03931	-0,00290	0,06058
96	-0,00055	0,01641	0,00021	0,03666	-0,00140	0,05726
97	-0,00099	0,01581	0,00026	0,03426	-0,00192	0,05310
98	-0,00109	0,01422	0,00065	0,03189	-0,00189	0,05054
99	0,00047	0,01370	0,00204	0,02927	-0,00281	0,04529
100	-0,00971	0,01171	-0,02198	0,03033	-0,03727	0,04948
101	-0,01160	0,01440	-0,02213	0,03369	-0,03670	0,05394
102	-0,01117	0,01626	-0,02252	0,03704	-0,03698	0,05765
103	-0,01120	0,01757	-0,02199	0,03944	-0,03631	0,06072
104	-0,01316	0,01925	-0,02620	0,04285	-0,04385	0,06422
105	0,00150	0,02006	0,00468	0,04221	0,00575	0,06411
106	0,00001	0,01804	0,00118	0,03895	-0,00032	0,06009
107	-0,00019	0,01686	0,00154	0,03699	-0,00045	0,05698
108	-0,00055	0,01545	0,00132	0,03417	0,00009	0,05304
109	-0,00037	0,01470	0,00109	0,03162	-0,00013	0,04958
110	0,00042	0,01377	0,00212	0,02932	-0,00033	0,04609
111	-0,00856	0,01007	-0,01869	0,02938	-0,04112	0,05535
112	-0,01035	0,01322	-0,02373	0,03362	-0,03858	0,05459
113	-0,01129	0,01576	-0,02399	0,03687	-0,03944	0,05793
114	-0,01180	0,01744	-0,02265	0,03959	-0,03712	0,06049

Continuação da Tabela B.3

	<i>Iteração 1</i>		<i>Iteração 2</i>		<i>Iteração 3</i>	
115	-0,01383	0,01844	-0,02835	0,04301	-0,04710	0,06409
116	0,00021	0,01938	0,00097	0,04168	0,00073	0,06324
117	0,00159	0,01715	0,00292	0,04019	0,00296	0,06115
118	0,00071	0,01637	0,00248	0,03709	0,00069	0,05728
119	0,00041	0,01544	0,00235	0,03462	0,00049	0,05323
120	0,00061	0,01417	0,00154	0,03155	0,00025	0,04970
121	0,00177	0,01341	0,00484	0,02969	0,00028	0,04573

Tabela B.4 – Viga MON V4

<i>Nó</i>	<i>Iteração 1</i>		<i>Iteração 2</i>		<i>Iteração 3</i>	
	<i>Ux (mm)</i>	<i>Uy (mm)</i>	<i>Ux (mm)</i>	<i>Uy (mm)</i>	<i>Ux (mm)</i>	<i>Uy (mm)</i>
1	-0,01939	0,02133	-0,01601	0,03568	-0,02467	0,04745
2	-0,01258	0,02258	-0,01870	0,03599	-0,02369	0,05309
3	-0,01360	0,01942	-0,01665	0,03916	-0,02157	0,05528
4	-0,01142	0,01992	-0,01486	0,04245	-0,02157	0,05923
5	-0,00897	0,01971	-0,01407	0,04410	-0,02186	0,05992
6	-0,00733	0,02145	-0,01184	0,04321	-0,01768	0,06061
7	-0,00560	0,02028	-0,01165	0,04229	-0,01929	0,06144
8	-0,00763	0,02053	-0,01315	0,03976	-0,01624	0,05762
9	0,01459	0,02011	-0,01695	0,03763	-0,02283	0,05313
10	0,00942	0,02081	-0,01740	0,03495	-0,02132	0,04821
11	0,01306	0,02063	-0,01369	0,03402	-0,02370	0,04557
12	-0,01615	0,01656	-0,01906	0,03476	-0,02352	0,05160
13	-0,01310	0,01895	-0,01919	0,03683	-0,02303	0,05381
14	-0,00954	0,02003	-0,01705	0,04017	-0,02243	0,05866
15	-0,00742	0,01915	-0,01514	0,04218	-0,02032	0,06050
16	-0,00670	0,02144	-0,01659	0,04447	-0,02268	0,06062
17	-0,00591	0,01940	-0,01243	0,04323	-0,01659	0,05920
18	-0,00535	0,02008	-0,01120	0,04178	-0,01589	0,06074
19	-0,00889	0,01974	-0,01228	0,03993	-0,01638	0,05973
20	0,00573	0,02057	-0,01415	0,03787	-0,01596	0,05492
21	0,00872	0,01908	-0,01542	0,03535	-0,01827	0,05173
22	0,00351	0,01783	-0,01295	0,03564	-0,01587	0,05352
23	-0,01049	0,01921	-0,01761	0,03636	-0,02325	0,05369
24	-0,01216	0,01910	-0,01866	0,03788	-0,02385	0,05619
25	-0,00947	0,01822	-0,01672	0,04019	-0,02227	0,05938
26	-0,00596	0,01887	-0,01503	0,04260	-0,02113	0,06289

Continuação da Tabela B.4

	<i>Iteração 1</i>		<i>Iteração 2</i>		<i>Iteração 3</i>	
27	-0,00615	0,01964	-0,01730	0,04477	-0,02395	0,06163
28	-0,00326	0,02150	-0,01075	0,04445	-0,01423	0,05778
29	-0,00272	0,02043	-0,00869	0,04419	-0,01132	0,05908
30	-0,00481	0,01967	-0,00945	0,04078	-0,01287	0,06038
31	-0,01033	0,01715	-0,01011	0,03899	-0,01260	0,05882
32	0,00507	0,01986	-0,01271	0,03657	-0,01527	0,05395
33	0,00986	0,01953	-0,01200	0,03524	-0,01847	0,04756
34	-0,01251	0,01761	-0,01886	0,03685	-0,02500	0,05467
35	-0,00800	0,01758	-0,01806	0,03889	-0,02368	0,05932
36	-0,00839	0,01869	-0,01737	0,04090	-0,02397	0,06113
37	-0,00638	0,01888	-0,01630	0,04296	-0,02291	0,06316
38	-0,00697	0,02068	-0,01860	0,04397	-0,02572	0,06214
39	-0,00649	0,02220	-0,01577	0,04563	-0,02032	0,05652
40	-0,00303	0,02038	-0,00625	0,04337	-0,00708	0,05842
41	0,00378	0,02065	-0,00881	0,04065	-0,01170	0,06032
42	0,00282	0,01957	-0,00865	0,03788	-0,01060	0,05816
43	0,00637	0,01710	-0,01142	0,03574	-0,01292	0,05489
44	0,00520	0,01814	-0,01056	0,03384	-0,01299	0,04987
45	-0,01036	0,01745	-0,01887	0,03600	-0,02480	0,05474
46	-0,01193	0,01862	-0,02060	0,03892	-0,02737	0,05737
47	-0,01030	0,01923	-0,01971	0,03956	-0,02638	0,05879
48	-0,00764	0,01944	-0,01833	0,04330	-0,02464	0,06310
49	-0,00731	0,02078	-0,01994	0,04358	-0,02695	0,06094
50	-0,00877	0,02132	-0,01706	0,04615	-0,02275	0,06201
51	0,00403	0,02095	-0,00616	0,04421	-0,00538	0,06290
52	0,00237	0,01858	-0,00827	0,04140	-0,00881	0,06112
53	0,00462	0,01816	-0,00728	0,03851	-0,00880	0,05751
54	0,00325	0,01767	-0,00991	0,03592	-0,01038	0,05379
55	0,00571	0,01685	-0,00746	0,03499	-0,00970	0,05267
56	-0,01508	0,01796	-0,02021	0,03693	-0,02810	0,05184
57	-0,01090	0,01876	-0,02113	0,03879	-0,02802	0,05746
58	-0,00967	0,01867	-0,02066	0,04024	-0,02721	0,06079
59	-0,00749	0,01868	-0,01851	0,04415	-0,02646	0,06387
60	-0,00729	0,01920	-0,01993	0,04433	-0,02718	0,06233
61	-0,00952	0,02168	-0,02018	0,04751	-0,02777	0,06233
62	0,00300	0,02026	-0,00464	0,04363	-0,00307	0,06233
63	0,00262	0,01911	-0,00614	0,04155	-0,00688	0,06152

Continuação da Tabela B.4

	<i>Iteração 1</i>		<i>Iteração 2</i>		<i>Iteração 3</i>	
64	0,00154	0,01716	-0,00512	0,03929	-0,00560	0,05932
65	0,00003	0,01583	-0,00396	0,03664	-0,00416	0,05678
66	0,00093	0,01603	-0,00517	0,03503	-0,00541	0,05335
67	-0,01158	0,01758	-0,02122	0,03766	-0,02878	0,05426
68	-0,00882	0,01700	-0,02037	0,03872	-0,02857	0,05921
69	-0,00676	0,01757	-0,01937	0,04160	-0,02831	0,06340
70	-0,00699	0,01862	-0,01955	0,04487	-0,02823	0,06442
71	-0,00691	0,01988	-0,01912	0,04528	-0,02794	0,06391
72	-0,00944	0,02122	-0,02284	0,04820	-0,03259	0,06391
73	0,00055	0,01970	-0,00258	0,04599	-0,00122	0,06005
74	0,00272	0,01861	-0,00424	0,04205	-0,00449	0,06117
75	0,00161	0,01752	-0,00373	0,03950	-0,00413	0,05893
76	0,00091	0,01551	-0,00277	0,03688	-0,00311	0,05653
77	0,00005	0,01494	-0,00497	0,03396	-0,00235	0,05363
78	-0,00965	0,01785	-0,02152	0,03920	-0,03041	0,05648
79	-0,00786	0,01754	-0,02289	0,03916	-0,03150	0,05922
80	-0,00911	0,01814	-0,02185	0,04033	-0,03023	0,06098
81	-0,00763	0,01905	-0,02072	0,04427	-0,02953	0,06366
82	-0,00776	0,01980	-0,02124	0,04532	-0,02924	0,06010
83	-0,00886	0,02107	-0,02238	0,04817	-0,03485	0,06273
84	0,00084	0,02025	-0,00071	0,04502	0,00373	0,06188
85	0,00251	0,01797	-0,00202	0,04159	-0,00385	0,06180
86	0,00149	0,01733	-0,00167	0,03982	-0,00153	0,05874
87	0,00116	0,01600	-0,00215	0,03679	-0,00116	0,05571
88	0,00544	0,01624	-0,00564	0,03307	-0,00621	0,05003
89	-0,00891	0,01725	-0,02216	0,03878	-0,03249	0,05562
90	-0,00905	0,01768	-0,02327	0,03918	-0,03268	0,05853
91	-0,00855	0,01788	-0,02248	0,04147	-0,03171	0,06211
92	-0,00712	0,01719	-0,02132	0,04338	-0,03135	0,06032
93	-0,00847	0,01948	-0,02243	0,04593	-0,03393	0,06032
94	-0,00655	0,02042	-0,01763	0,04671	-0,02718	0,06032
95	0,00401	0,02034	0,00377	0,04554	0,00808	0,06068
96	0,00079	0,01929	-0,00173	0,04273	-0,00199	0,06105
97	0,00096	0,01637	0,00059	0,04012	0,00168	0,05983
98	0,00173	0,01580	-0,00148	0,03616	0,00096	0,05576
99	0,00235	0,01528	-0,00262	0,03346	0,00281	0,05273
100	-0,01139	0,01749	-0,02378	0,03818	-0,03636	0,05745

Continuação da Tabela B.4

	<i>Iteração 1</i>		<i>Iteração 2</i>		<i>Iteração 3</i>	
101	-0,00907	0,01734	-0,02388	0,03859	-0,03360	0,05750
102	-0,00862	0,01733	-0,02384	0,04092	-0,03434	0,06166
103	-0,00870	0,01878	-0,02248	0,04210	-0,03240	0,06129
104	-0,00734	0,01831	-0,02298	0,04561	-0,03464	0,06147
105	-0,00852	0,02062	-0,02078	0,04836	-0,03273	0,06147
106	0,00310	0,01939	0,00364	0,04513	0,00746	0,06147
107	0,00109	0,01875	0,00005	0,04253	-0,00034	0,06172
108	0,00139	0,01721	0,00039	0,03951	0,00166	0,05924
109	0,00152	0,01618	0,00058	0,03739	0,00282	0,05676
110	0,00252	0,01452	0,00105	0,03337	0,00377	0,05267
111	-0,00773	0,01673	-0,02343	0,03887	-0,03637	0,05699
112	-0,00989	0,01726	-0,02400	0,03931	-0,03741	0,05878
113	-0,00715	0,01742	-0,02311	0,04119	-0,03568	0,06253
114	-0,00764	0,01667	-0,02294	0,04243	-0,03525	0,06438
115	-0,00780	0,01882	-0,02245	0,04574	-0,03634	0,06346
116	-0,00607	0,02110	-0,01736	0,04796	-0,02972	0,06346
117	0,00248	0,02074	0,00391	0,04632	0,00913	0,06346
118	0,00109	0,01841	-0,00016	0,04183	0,00085	0,06256
119	0,00128	0,01684	0,00071	0,04000	0,00335	0,05894
120	0,00131	0,01581	0,00069	0,03599	0,00292	0,05572
121	0,00416	0,01680	0,00265	0,03230	0,00509	0,05082

Tabela B.5 – Viga DC V1

<i>Nó</i>	<i>Iteração 1</i>		<i>Iteração 2</i>		<i>Iteração 3</i>	
	<i>Ux (mm)</i>	<i>Uy (mm)</i>	<i>Ux (mm)</i>	<i>Uy (mm)</i>	<i>Ux (mm)</i>	<i>Uy (mm)</i>
1	-0,01254	0,01357	-0,02022	0,01965	-0,02029	0,01972
2	-0,00999	0,01144	-0,01892	0,02176	-0,01899	0,02184
3	-0,00947	0,01213	-0,01892	0,02348	-0,01899	0,02357
4	-0,00953	0,01292	-0,01910	0,02547	-0,01917	0,02556
5	-0,00891	0,01334	-0,01834	0,02764	-0,01841	0,02775
6	-0,00920	0,01452	-0,01902	0,02806	-0,01909	0,02816
7	-0,00856	0,01538	-0,01820	0,03089	-0,01827	0,03100
8	-0,00935	0,01691	-0,01353	0,02541	-0,01358	0,02550
9	-0,00592	0,01355	-0,01294	0,02756	-0,01299	0,02766
10	-0,00708	0,01387	-0,01235	0,02318	-0,01240	0,02327
11	-0,00989	0,01330	-0,01410	0,02216	-0,01415	0,02225
12	-0,01166	0,01088	-0,02121	0,01888	-0,02128	0,01895

Continuação da Tabela B.5

	<i>Iteração 1</i>		<i>Iteração 2</i>		<i>Iteração 3</i>	
13	-0,01078	0,01272	-0,02044	0,02214	-0,02051	0,02222
14	-0,01060	0,01220	-0,01950	0,02366	-0,01957	0,02375
15	-0,00969	0,01264	-0,02023	0,02543	-0,02030	0,02553
16	-0,00882	0,01294	-0,01989	0,02716	-0,01996	0,02726
17	-0,00900	0,01356	-0,02084	0,02997	-0,02092	0,03008
18	-0,00717	0,01453	-0,01771	0,03140	-0,01778	0,03152
19	-0,00535	0,01421	-0,00962	0,02872	-0,00966	0,02883
20	-0,00619	0,01352	-0,01247	0,02725	-0,01252	0,02736
21	-0,00498	0,01202	-0,01158	0,02465	-0,01163	0,02474
22	-0,00896	0,01442	-0,01463	0,02368	-0,01468	0,02377
23	-0,01197	0,01219	-0,02076	0,02029	-0,02084	0,02037
24	-0,01178	0,01163	-0,02166	0,02211	-0,02174	0,02220
25	-0,01024	0,01275	-0,02092	0,02396	-0,02100	0,02404
26	-0,00996	0,01199	-0,02174	0,02586	-0,02182	0,02596
27	-0,00880	0,01286	-0,02097	0,02794	-0,02105	0,02804
28	-0,01017	0,01397	-0,02401	0,03010	-0,02410	0,03021
29	-0,00481	0,01459	-0,01307	0,03259	-0,01311	0,03271
30	-0,00334	0,01412	-0,00870	0,02985	-0,00873	0,02996
31	-0,00451	0,01324	-0,01127	0,02688	-0,01131	0,02698
32	-0,00317	0,01158	-0,00964	0,02492	-0,00967	0,02502
33	-0,00462	0,01334	-0,01039	0,02321	-0,01043	0,02329
34	-0,01092	0,01016	-0,02328	0,01957	-0,02337	0,01964
35	-0,01058	0,01120	-0,02246	0,02271	-0,02254	0,02279
36	-0,01040	0,01191	-0,02201	0,02376	-0,02210	0,02384
37	-0,01001	0,01207	-0,02328	0,02682	-0,02337	0,02692
38	-0,00934	0,01279	-0,02185	0,02865	-0,02193	0,02875
39	-0,00974	0,01356	-0,02505	0,03150	-0,02514	0,03162
40	-0,00420	0,01442	-0,01176	0,03270	-0,01180	0,03282
41	-0,00139	0,01372	-0,00741	0,03012	-0,00744	0,03023
42	-0,00285	0,01240	-0,00907	0,02820	-0,00911	0,02830
43	-0,00207	0,01162	-0,00875	0,02517	-0,00878	0,02526
44	-0,00524	0,01257	-0,01012	0,02377	-0,01016	0,02386
45	-0,01083	0,01002	-0,02475	0,02000	-0,02484	0,02008
46	-0,01137	0,01089	-0,02407	0,02228	-0,02416	0,02237
47	-0,01075	0,01128	-0,02400	0,02409	-0,02409	0,02418
48	-0,00976	0,01222	-0,02404	0,02635	-0,02412	0,02645
49	-0,00963	0,01276	-0,02310	0,02901	-0,02318	0,02912

Continuação da Tabela B.5

	<i>Iteração 1</i>		<i>Iteração 2</i>		<i>Iteração 3</i>	
50	-0,01046	0,01424	-0,02578	0,03093	-0,02588	0,03105
51	-0,00191	0,01506	-0,00596	0,03273	-0,00598	0,03285
52	-0,00140	0,01342	-0,00757	0,03075	-0,00760	0,03086
53	-0,00142	0,01296	-0,00747	0,02791	-0,00750	0,02801
54	-0,00141	0,01185	-0,00744	0,02636	-0,00746	0,02646
55	-0,00176	0,01188	-0,00696	0,02423	-0,00698	0,02432
56	-0,01066	0,00992	-0,02589	0,02009	-0,02598	0,02016
57	-0,01110	0,01034	-0,02579	0,02219	-0,02588	0,02227
58	-0,01079	0,01118	-0,02493	0,02455	-0,02502	0,02464
59	-0,01019	0,01186	-0,02484	0,02683	-0,02493	0,02693
60	-0,00963	0,01313	-0,02393	0,02886	-0,02402	0,02897
61	-0,01066	0,01404	-0,02633	0,03179	-0,02643	0,03191
62	-0,00220	0,01469	-0,00758	0,03348	-0,00760	0,03361
63	-0,00092	0,01364	-0,00575	0,03035	-0,00577	0,03046
64	-0,00121	0,01268	-0,00673	0,02851	-0,00676	0,02862
65	-0,00054	0,01142	-0,00542	0,02659	-0,00544	0,02669
66	-0,00198	0,01150	-0,00711	0,02353	-0,00714	0,02362
67	-0,01131	0,00991	-0,02656	0,02059	-0,02666	0,02067
68	-0,01127	0,01006	-0,02636	0,02302	-0,02645	0,02310
69	-0,01111	0,01158	-0,02619	0,02487	-0,02629	0,02497
70	-0,01095	0,01188	-0,02623	0,02718	-0,02633	0,02728
71	-0,01044	0,01285	-0,02547	0,02975	-0,02556	0,02986
72	-0,01052	0,01319	-0,02854	0,03165	-0,02864	0,03177
73	-0,00114	0,01485	-0,00603	0,03276	-0,00605	0,03288
74	-0,00083	0,01383	-0,00478	0,03133	-0,00479	0,03145
75	-0,00067	0,01301	-0,00562	0,02866	-0,00564	0,02876
76	-0,00040	0,01161	-0,00449	0,02685	-0,00450	0,02695
77	-0,00230	0,01096	-0,00603	0,02462	-0,00605	0,02471
78	-0,01225	0,01000	-0,02794	0,02027	-0,02805	0,02035
79	-0,01201	0,01043	-0,02822	0,02228	-0,02833	0,02237
80	-0,01192	0,01149	-0,02717	0,02496	-0,02728	0,02505
81	-0,01121	0,01233	-0,02692	0,02766	-0,02702	0,02777
82	-0,01130	0,01298	-0,02667	0,02898	-0,02677	0,02909
83	-0,01097	0,01386	-0,02729	0,03246	-0,02739	0,03258
84	0,00117	0,01473	0,00026	0,03267	0,00026	0,03279
85	-0,00034	0,01363	-0,00479	0,03106	-0,00481	0,03117
86	-0,00019	0,01262	-0,00363	0,02927	-0,00365	0,02938

Continuação da Tabela B.5

	<i>Iteração 1</i>		<i>Iteração 2</i>		<i>Iteração 3</i>	
87	-0,00010	0,01174	-0,00371	0,02718	-0,00372	0,02728
88	-0,00093	0,01134	-0,00489	0,02379	-0,00491	0,02388
89	-0,01224	0,01010	-0,02922	0,02152	-0,02933	0,02160
90	-0,01220	0,01034	-0,02881	0,02293	-0,02892	0,02301
91	-0,01195	0,01104	-0,02863	0,02526	-0,02874	0,02536
92	-0,01218	0,01212	-0,02778	0,02702	-0,02788	0,02712
93	-0,01177	0,01275	-0,02833	0,02944	-0,02843	0,02955
94	-0,01036	0,01441	-0,02638	0,03207	-0,02647	0,03219
95	0,00193	0,01476	0,00275	0,03342	0,00276	0,03354
96	-0,00077	0,01355	-0,00438	0,03084	-0,00440	0,03095
97	0,00071	0,01357	-0,00261	0,02872	-0,00262	0,02883
98	0,00033	0,01209	-0,00339	0,02638	-0,00340	0,02648
99	-0,00004	0,01019	-0,00237	0,02530	-0,00238	0,02539
100	-0,01187	0,00801	-0,03049	0,02112	-0,03060	0,02119
101	-0,01297	0,01104	-0,02958	0,02364	-0,02969	0,02373
102	-0,01225	0,01082	-0,02972	0,02577	-0,02983	0,02586
103	-0,01239	0,01169	-0,02911	0,02862	-0,02922	0,02872
104	-0,01200	0,01330	-0,02889	0,02945	-0,02900	0,02956
105	-0,01186	0,01371	-0,02920	0,03207	-0,02930	0,03219
106	0,00192	0,01461	0,00250	0,03327	0,00251	0,03339
107	0,00036	0,01378	-0,00258	0,03134	-0,00259	0,03145
108	0,00107	0,01265	-0,00152	0,02919	-0,00153	0,02930
109	0,00074	0,01211	-0,00237	0,02668	-0,00238	0,02678
110	0,00127	0,01090	-0,00212	0,02461	-0,00213	0,02470
111	-0,01332	0,00984	-0,03065	0,02108	-0,03076	0,02115
112	-0,01197	0,00920	-0,03200	0,02452	-0,03212	0,02461
113	-0,01298	0,01088	-0,03068	0,02567	-0,03080	0,02577
114	-0,01293	0,01248	-0,02960	0,02816	-0,02971	0,02826
115	-0,01301	0,01286	-0,03103	0,03032	-0,03114	0,03043
116	-0,00840	0,01443	-0,02128	0,03363	-0,02136	0,03376
117	0,00503	0,01587	0,00942	0,03395	0,00946	0,03407
118	-0,00007	0,01411	-0,00354	0,03052	-0,00355	0,03064
119	0,00182	0,01363	-0,00034	0,02882	-0,00034	0,02893
120	0,00056	0,01134	0,00006	0,02735	0,00006	0,02745
121	0,00193	0,01181	-0,00111	0,02458	-0,00111	0,02467

Tabela B.6 – Viga DC V2

<i>Nó</i>	<i>Iteração 1</i>		<i>Iteração 2</i>		<i>Iteração 3</i>	
	<i>Ux (mm)</i>	<i>Uy (mm)</i>	<i>Ux (mm)</i>	<i>Uy (mm)</i>	<i>Ux (mm)</i>	<i>Uy (mm)</i>
1	0,02075	0,02708	-0,02213	0,02990	-0,02230	0,03013
2	0,01506	0,02534	-0,01899	0,03799	-0,01914	0,03829
3	0,01882	0,02587	-0,02096	0,03356	-0,02113	0,03383
4	0,00878	0,02681	-0,01472	0,04343	-0,01484	0,04377
5	0,01258	0,02548	-0,01536	0,04078	-0,01548	0,04110
6	0,00734	0,02766	-0,00853	0,04762	-0,00859	0,04799
7	0,00709	0,02553	-0,00895	0,04071	-0,00902	0,04103
8	0,00718	0,02509	-0,00918	0,04186	-0,00926	0,04219
9	0,01998	0,02501	-0,01973	0,03602	-0,01988	0,03630
10	0,01693	0,02193	-0,01744	0,03546	-0,01758	0,03574
11	0,02445	0,02660	-0,02574	0,03237	-0,02594	0,03262
12	0,01819	0,02497	-0,02055	0,03333	-0,02072	0,03359
13	0,01260	0,02563	-0,01861	0,03637	-0,01876	0,03665
14	0,00549	0,02421	-0,01361	0,04284	-0,01372	0,04318
15	0,00253	0,02421	-0,01268	0,04418	-0,01278	0,04452
16	0,00521	0,02616	-0,01374	0,04914	-0,01385	0,04952
17	0,00575	0,02482	-0,00282	0,04658	-0,00284	0,04694
18	0,00715	0,02433	-0,00743	0,04492	-0,00749	0,04528
19	0,00512	0,02336	-0,00352	0,04327	-0,00355	0,04361
20	0,00881	0,02169	-0,00789	0,03911	-0,00795	0,03942
21	0,02242	0,02383	-0,02290	0,03374	-0,02308	0,03400
22	0,02430	0,02445	-0,02484	0,03387	-0,02504	0,03414
23	-0,01344	0,02409	-0,01635	0,03461	-0,01648	0,03489
24	-0,01138	0,02154	-0,01577	0,04019	-0,01589	0,04051
25	-0,00744	0,02355	-0,01355	0,04381	-0,01365	0,04416
26	-0,00544	0,02337	-0,01189	0,04750	-0,01199	0,04787
27	-0,00541	0,02619	-0,01358	0,05291	-0,01368	0,05333
28	0,00501	0,02544	-0,00421	0,04943	-0,00424	0,04982
29	0,00850	0,02466	-0,00757	0,04424	-0,00763	0,04459
30	0,00527	0,02293	0,00931	0,04338	0,00939	0,04372
31	0,01387	0,02214	-0,01546	0,03869	-0,01559	0,03899
32	0,00858	0,02113	-0,00492	0,03836	-0,00496	0,03866
33	0,01314	0,01836	-0,00930	0,03390	-0,00938	0,03417
34	-0,00719	0,02112	-0,01608	0,03793	-0,01621	0,03823
35	-0,00563	0,02119	-0,01535	0,04189	-0,01547	0,04222
36	-0,00684	0,02360	-0,01621	0,04280	-0,01634	0,04314

Continuação da Tabela B.6

	<i>Iteração 1</i>		<i>Iteração 2</i>		<i>Iteração 3</i>	
37	-0,00345	0,02450	-0,01330	0,04849	-0,01340	0,04887
38	-0,00513	0,02672	-0,01897	0,05153	-0,01912	0,05193
39	0,00530	0,02654	0,00471	0,05178	0,00475	0,05219
40	0,00481	0,02414	0,00449	0,04852	0,00452	0,04890
41	0,00259	0,02181	0,00015	0,04673	0,00015	0,04710
42	0,00638	0,02177	0,00732	0,04019	0,00737	0,04051
43	0,01426	0,01877	-0,00885	0,03846	-0,00892	0,03876
44	0,01533	0,01964	-0,01260	0,03492	-0,01270	0,03520
45	-0,00744	0,01975	-0,01616	0,03944	-0,01629	0,03975
46	-0,00635	0,02114	-0,01654	0,04278	-0,01667	0,04312
47	-0,00320	0,02466	-0,01302	0,04838	-0,01312	0,04876
48	-0,00496	0,02355	-0,01630	0,04965	-0,01643	0,05004
49	-0,00139	0,02749	-0,01271	0,05214	-0,01281	0,05255
50	0,00613	0,02601	0,00754	0,05314	0,00760	0,05355
51	0,00378	0,02445	0,00181	0,04978	0,00182	0,05017
52	0,00526	0,02252	0,00391	0,04627	0,00395	0,04664
53	0,00515	0,02166	0,00379	0,04242	0,00382	0,04276
54	0,00880	0,01960	0,01017	0,03892	0,01026	0,03923
55	0,01828	0,01900	0,02006	0,03617	0,02022	0,03646
56	-0,00595	0,02017	-0,01756	0,04064	-0,01770	0,04096
57	-0,00573	0,02109	-0,01824	0,04276	-0,01838	0,04310
58	-0,00482	0,02389	-0,01654	0,04808	-0,01667	0,04846
59	-0,00490	0,02453	-0,01710	0,04900	-0,01724	0,04939
60	-0,00489	0,02645	-0,01865	0,05242	-0,01880	0,05283
61	0,00753	0,02655	0,00813	0,05143	0,00820	0,05184
62	0,00557	0,02421	0,00496	0,05010	0,00500	0,05049
63	0,00587	0,02224	0,00504	0,04621	0,00508	0,04658
64	0,00607	0,02185	0,00549	0,04392	0,00553	0,04427
65	0,00632	0,01927	0,00497	0,04050	0,00501	0,04082
66	0,01372	0,02045	0,01286	0,03457	0,01296	0,03484
67	-0,00689	0,01976	-0,02069	0,03971	-0,02086	0,04002
68	-0,00666	0,02176	-0,01913	0,04346	-0,01928	0,04380
69	-0,00475	0,02264	-0,01929	0,04717	-0,01944	0,04754
70	-0,00532	0,02511	-0,01753	0,05034	-0,01767	0,05074
71	-0,00370	0,02642	-0,02107	0,05453	-0,02124	0,05496
72	0,00803	0,02678	0,00930	0,05157	0,00937	0,05197
73	0,00711	0,02421	0,00660	0,05015	0,00665	0,05055

Continuação da Tabela B.6

	<i>Iteração 1</i>		<i>Iteração 2</i>		<i>Iteração 3</i>	
74	0,00689	0,02258	0,00676	0,04742	0,00682	0,04779
75	0,00760	0,02165	0,00695	0,04322	0,00700	0,04356
76	0,00973	0,01967	0,01038	0,03855	0,01046	0,03885
77	0,01312	0,02140	0,01453	0,03498	0,01465	0,03525
78	-0,00725	0,02037	-0,02169	0,04032	-0,02186	0,04064
79	-0,00568	0,02099	-0,02102	0,04461	-0,02118	0,04496
80	-0,00627	0,02349	-0,02097	0,04797	-0,02114	0,04835
81	-0,00582	0,02478	-0,02012	0,05132	-0,02027	0,05173
82	-0,00609	0,02669	-0,02383	0,05505	-0,02402	0,05548
83	0,00840	0,02643	0,00853	0,05275	0,00860	0,05316
84	0,00672	0,02436	0,00837	0,05124	0,00844	0,05164
85	0,00914	0,02399	0,00934	0,04781	0,00942	0,04819
86	0,00860	0,02119	0,00972	0,04290	0,00980	0,04324
87	0,00706	0,01946	0,00900	0,04147	0,00907	0,04179
88	0,01203	0,02021	0,01399	0,03598	0,01410	0,03626
89	-0,00582	0,01885	-0,02291	0,04126	-0,02309	0,04158
90	-0,00706	0,02180	-0,02298	0,04435	-0,02316	0,04470
91	-0,00664	0,02249	-0,02352	0,04834	-0,02371	0,04872
92	-0,00603	0,02535	-0,02001	0,04969	-0,02017	0,05008
93	-0,00796	0,02663	-0,02761	0,05393	-0,02783	0,05435
94	0,01259	0,02644	0,00909	0,05106	0,00917	0,05146
95	0,01031	0,02444	0,01243	0,05030	0,01253	0,05070
96	0,00904	0,02159	0,01089	0,04717	0,01098	0,04754
97	0,00951	0,02106	0,01111	0,04386	0,01120	0,04421
98	0,01136	0,02099	0,01327	0,03853	0,01337	0,03883
99	0,01420	0,02128	0,01788	0,03545	0,01802	0,03573
100	-0,00419	0,01902	-0,02513	0,04213	-0,02533	0,04246
101	-0,00683	0,02049	-0,02485	0,04539	-0,02504	0,04575
102	-0,00680	0,02298	-0,02562	0,04832	-0,02582	0,04870
103	-0,00835	0,02379	-0,02326	0,05026	-0,02344	0,05065
104	-0,00685	0,02572	-0,02793	0,05325	-0,02815	0,05367
105	0,01415	0,02684	0,01372	0,05097	0,01383	0,05137
106	0,01051	0,02354	0,01375	0,04983	0,01385	0,05022
107	0,00958	0,02293	0,01263	0,04667	0,01273	0,04704
108	0,01067	0,02093	0,01371	0,04304	0,01382	0,04337
109	0,01184	0,01894	0,01614	0,04052	0,01627	0,04083
110	0,01028	0,02029	0,01403	0,03726	0,01414	0,03755

Continuação da Tabela B.6

	<i>Iteração 1</i>		<i>Iteração 2</i>		<i>Iteração 3</i>	
111	-0,00799	0,01915	-0,02666	0,04035	-0,02687	0,04067
112	-0,00737	0,02144	-0,02642	0,04482	-0,02663	0,04517
113	-0,00811	0,02177	-0,02770	0,04714	-0,02792	0,04751
114	-0,00905	0,02426	-0,02566	0,05126	-0,02586	0,05166
115	-0,00425	0,02733	-0,02992	0,05367	-0,03015	0,05409
116	0,01340	0,02652	0,01650	0,05360	0,01663	0,05402
117	0,01056	0,02417	0,01384	0,04872	0,01395	0,04911
118	0,01261	0,02237	0,01610	0,04708	0,01623	0,04745
119	0,00970	0,02046	0,01385	0,04359	0,01396	0,04394
120	0,01205	0,02079	0,01577	0,03950	0,01590	0,03981
121	0,01911	0,02197	0,01829	0,03441	0,01843	0,03469

Tabela B.7 – Viga DC V3

<i>Nó</i>	<i>Iteração 1</i>		<i>Iteração 2</i>		<i>Iteração 3</i>	
	<i>U_x (mm)</i>	<i>U_y (mm)</i>	<i>U_x (mm)</i>	<i>U_y (mm)</i>	<i>U_x (mm)</i>	<i>U_y (mm)</i>
1	0,01306	0,02013	-0,02225	0,03667	-0,02244	0,03698
2	0,01374	0,02282	-0,02375	0,03727	-0,02395	0,03759
3	0,01070	0,02142	-0,02291	0,04276	-0,02310	0,04312
4	0,01013	0,02300	-0,02200	0,04639	-0,02219	0,04678
5	0,01290	0,02502	-0,02213	0,04801	-0,02232	0,04842
6	0,01509	0,02331	-0,01280	0,04801	-0,01291	0,04842
7	0,01470	0,02154	-0,01349	0,04489	-0,01360	0,04527
8	0,01637	0,02074	-0,01495	0,04184	-0,01508	0,04220
9	0,01647	0,01935	-0,01524	0,03845	-0,01537	0,03878
10	0,01568	0,01625	-0,01580	0,03504	-0,01594	0,03534
11	0,02020	0,01476	-0,01599	0,03286	-0,01613	0,03314
12	0,01063	0,01940	-0,02371	0,03766	-0,02391	0,03798
13	0,00945	0,01964	-0,02429	0,03965	-0,02450	0,03999
14	0,00760	0,02146	-0,02332	0,04500	-0,02351	0,04538
15	0,00733	0,02314	-0,02562	0,04661	-0,02584	0,04700
16	0,01105	0,02527	-0,02050	0,04896	-0,02068	0,04938
17	0,01696	0,02422	-0,00760	0,04894	-0,00766	0,04936
18	0,01557	0,02145	-0,01124	0,04485	-0,01133	0,04523
19	0,01732	0,02037	-0,01249	0,04181	-0,01259	0,04217
20	0,01520	0,01856	-0,01219	0,03856	-0,01230	0,03889
21	0,01700	0,01665	-0,01269	0,03612	-0,01279	0,03643
22	0,01799	0,01539	-0,01548	0,03290	-0,01561	0,03318

Continuação da Tabela B.7

	<i>Iteração 1</i>		<i>Iteração 2</i>		<i>Iteração 3</i>	
23	0,00842	0,01875	-0,02519	0,03746	-0,02541	0,03778
24	0,00728	0,02015	-0,02562	0,04078	-0,02583	0,04113
25	0,00609	0,02100	-0,02566	0,04524	-0,02588	0,04562
26	0,00443	0,02263	-0,02959	0,04834	-0,02984	0,04874
27	0,01168	0,02632	-0,01665	0,05300	-0,01680	0,05345
28	0,01650	0,02471	-0,00515	0,04816	-0,00519	0,04857
29	0,01638	0,02215	-0,00844	0,04551	-0,00851	0,04590
30	0,01532	0,02043	-0,00890	0,04175	-0,00898	0,04210
31	0,01543	0,01832	-0,00870	0,03925	-0,00877	0,03958
32	0,01752	0,01648	-0,01108	0,03554	-0,01117	0,03584
33	0,01879	0,01564	-0,01130	0,03277	-0,01140	0,03304
34	0,00802	0,01921	-0,02749	0,03735	-0,02772	0,03766
35	0,00547	0,01955	-0,02805	0,04114	-0,02828	0,04149
36	0,00483	0,02125	-0,02838	0,04594	-0,02863	0,04633
37	0,00318	0,02311	-0,03125	0,05025	-0,03152	0,05068
38	0,00856	0,02632	-0,02182	0,05483	-0,02200	0,05529
39	0,01876	0,02440	-0,00125	0,04960	-0,00126	0,05002
40	0,01631	0,02254	-0,00685	0,04735	-0,00691	0,04775
41	0,01747	0,01946	-0,00489	0,04378	-0,00493	0,04415
42	0,01699	0,01746	-0,00588	0,04007	-0,00593	0,04041
43	0,01718	0,01646	-0,00747	0,03575	-0,00753	0,03605
44	0,01937	0,01536	-0,00880	0,03351	-0,00887	0,03379
45	0,00463	0,01856	-0,03073	0,03822	-0,03099	0,03854
46	0,00413	0,02007	-0,03080	0,04170	-0,03106	0,04205
47	0,00335	0,02170	-0,03060	0,04633	-0,03086	0,04672
48	0,00281	0,02372	-0,03188	0,05061	-0,03215	0,05104
49	0,00300	0,02538	-0,03303	0,05548	-0,03331	0,05595
50	0,02007	0,02502	0,00389	0,04967	0,00392	0,05009
51	0,01731	0,02244	-0,00372	0,04790	-0,00376	0,04830
52	0,01754	0,01996	-0,00248	0,04454	-0,00251	0,04492
53	0,01776	0,01821	-0,00357	0,04022	-0,00360	0,04056
54	0,01865	0,01639	-0,00453	0,03634	-0,00457	0,03665
55	0,01900	0,01692	-0,00595	0,03454	-0,00600	0,03484
56	0,00312	0,01838	-0,03275	0,03820	-0,03303	0,03853
57	0,00193	0,01943	-0,03268	0,04270	-0,03295	0,04306
58	0,00227	0,02109	-0,03373	0,04617	-0,03402	0,04656
59	0,00201	0,02366	-0,03303	0,05063	-0,03331	0,05106

Continuação da Tabela B.7

	<i>Iteração 1</i>		<i>Iteração 2</i>		<i>Iteração 3</i>	
60	0,00047	0,02600	-0,03805	0,05550	-0,03838	0,05597
61	0,02008	0,02450	0,00102	0,05158	0,00103	0,05202
62	0,01908	0,02165	-0,00117	0,04798	-0,00118	0,04838
63	0,01940	0,01984	-0,00045	0,04448	-0,00046	0,04486
64	0,01927	0,01821	-0,00140	0,04059	-0,00141	0,04093
65	0,01955	0,01610	-0,00190	0,03658	-0,00191	0,03689
66	0,02040	0,01497	-0,00353	0,03376	-0,00356	0,03405
67	0,00089	0,01747	-0,03520	0,03893	-0,03550	0,03926
68	0,00102	0,01926	-0,03543	0,04297	-0,03573	0,04333
69	0,00108	0,02104	-0,03670	0,04633	-0,03701	0,04672
70	0,00100	0,02320	-0,03523	0,05112	-0,03552	0,05155
71	-0,00106	0,02614	-0,04191	0,05549	-0,04227	0,05596
72	0,02181	0,02502	0,00341	0,05261	0,00344	0,05305
73	0,01976	0,02235	0,00043	0,04805	0,00043	0,04846
74	0,02093	0,02006	0,00043	0,04491	0,00044	0,04529
75	0,02076	0,01840	0,00047	0,04090	0,00047	0,04125
76	0,02091	0,01527	0,00034	0,03755	0,00035	0,03786
77	0,02188	0,01557	-0,00085	0,03468	-0,00086	0,03497
78	0,00034	0,01833	-0,03797	0,03864	-0,03830	0,03896
79	0,00018	0,01992	-0,03810	0,04233	-0,03843	0,04268
80	0,00045	0,02207	-0,03887	0,04572	-0,03920	0,04611
81	0,00160	0,02291	-0,03685	0,05044	-0,03716	0,05087
82	-0,00425	0,02589	-0,04700	0,05444	-0,04740	0,05490
83	0,01858	0,02520	-0,00879	0,05350	-0,00887	0,05396
84	0,02257	0,02210	0,00548	0,04919	0,00553	0,04960
85	0,02173	0,02028	0,00159	0,04533	0,00161	0,04572
86	0,02274	0,01836	0,00263	0,04105	0,00265	0,04140
87	0,02173	0,01556	0,00143	0,03737	0,00144	0,03769
88	0,02331	0,01500	0,00286	0,03466	0,00289	0,03495
89	-0,00045	0,01787	-0,04040	0,03836	-0,04074	0,03868
90	-0,00100	0,02035	-0,04047	0,04244	-0,04082	0,04280
91	-0,00121	0,02155	-0,04152	0,04631	-0,04188	0,04670
92	0,00015	0,02337	-0,03916	0,05062	-0,03949	0,05105
93	-0,00507	0,02577	-0,04912	0,05376	-0,04954	0,05422
94	0,02180	0,02449	-0,00458	0,05083	-0,00462	0,05126
95	0,02352	0,02203	0,00768	0,04977	0,00774	0,05019
96	0,02321	0,02007	0,00365	0,04497	0,00368	0,04536

Continuação da Tabela B.7

	<i>Iteração 1</i>		<i>Iteração 2</i>		<i>Iteração 3</i>	
97	0,02405	0,01798	0,00524	0,04170	0,00529	0,04205
98	0,02307	0,01578	0,00476	0,03762	0,00480	0,03793
99	0,02488	0,01562	0,00502	0,03547	0,00506	0,03577
100	-0,00151	0,01816	-0,04303	0,03867	-0,04340	0,03900
101	-0,00208	0,02035	-0,04331	0,04215	-0,04368	0,04251
102	-0,00100	0,02187	-0,04408	0,04702	-0,04445	0,04742
103	-0,00275	0,02298	-0,04240	0,05157	-0,04276	0,05201
104	-0,00029	0,02538	-0,04789	0,05459	-0,04830	0,05506
105	0,02793	0,02415	0,01406	0,05251	0,01418	0,05296
106	0,02340	0,02155	0,00510	0,04864	0,00514	0,04906
107	0,02488	0,01986	0,00773	0,04569	0,00780	0,04608
108	0,02439	0,01778	0,00683	0,04074	0,00689	0,04109
109	0,02476	0,01499	0,00651	0,03733	0,00657	0,03764
110	0,02436	0,01558	0,00762	0,03475	0,00769	0,03505
111	-0,00304	0,01837	-0,04550	0,03914	-0,04589	0,03947
112	-0,00245	0,01988	-0,04633	0,04312	-0,04672	0,04349
113	-0,00329	0,02216	-0,04603	0,04671	-0,04642	0,04711
114	-0,00230	0,02304	-0,04554	0,05132	-0,04593	0,05175
115	-0,00207	0,02509	-0,05187	0,05640	-0,05231	0,05688
116	0,02838	0,02394	0,01220	0,05285	0,01230	0,05330
117	0,02474	0,02400	0,00888	0,04924	0,00896	0,04966
118	0,02599	0,01931	0,00880	0,04525	0,00888	0,04563
119	0,02547	0,01797	0,00869	0,04170	0,00876	0,04206
120	0,02521	0,01493	0,00910	0,03732	0,00917	0,03764
121	0,02925	0,01799	0,00903	0,03586	0,00911	0,03616

Tabela B.8 – Viga DC V4

<i>Nó</i>	<i>Iteração 1</i>		<i>Iteração 2</i>		<i>Iteração 3</i>	
	<i>U_x (mm)</i>	<i>U_y (mm)</i>	<i>U_x (mm)</i>	<i>U_y (mm)</i>	<i>U_x (mm)</i>	<i>U_y (mm)</i>
1	-0,01208	0,01117	-0,01999	0,02115	-0,02019	0,02136
2	-0,01129	0,01234	-0,01910	0,02331	-0,01929	0,02354
3	-0,00968	0,01304	-0,01800	0,02548	-0,01817	0,02573
4	-0,00934	0,01407	-0,01762	0,02651	-0,01780	0,02677
5	-0,00916	0,01458	-0,01863	0,02918	-0,01882	0,02947
6	-0,00701	0,01536	-0,01517	0,03018	-0,01532	0,03048
7	-0,00527	0,01473	-0,01261	0,02846	-0,01273	0,02875
8	-0,00479	0,01302	-0,01309	0,02754	-0,01321	0,02781

Continuação da Tabela B.8

	<i>Iteração 1</i>		<i>Iteração 2</i>		<i>Iteração 3</i>	
9	-0,00473	0,01212	-0,01342	0,02492	-0,01355	0,02516
10	-0,00745	0,01267	-0,01460	0,02440	-0,01474	0,02464
11	-0,00711	0,01216	-0,01569	0,02154	-0,01584	0,02175
12	-0,01271	0,01224	-0,02012	0,02133	-0,02032	0,02155
13	-0,01109	0,01235	-0,01943	0,02422	-0,01962	0,02446
14	-0,01004	0,01239	-0,01945	0,02524	-0,01964	0,02549
15	-0,00976	0,01382	-0,01866	0,02803	-0,01884	0,02831
16	-0,00953	0,01500	-0,01986	0,02896	-0,02006	0,02924
17	-0,00725	0,01554	-0,01622	0,03128	-0,01638	0,03159
18	-0,00427	0,01441	-0,00968	0,02891	-0,00978	0,02920
19	-0,00496	0,01374	-0,01216	0,02694	-0,01228	0,02721
20	-0,00460	0,01266	-0,01105	0,02574	-0,01116	0,02599
21	-0,00673	0,01260	-0,01281	0,02320	-0,01294	0,02343
22	-0,00693	0,01208	-0,01315	0,02227	-0,01328	0,02249
23	-0,01172	0,01016	-0,02203	0,02119	-0,02225	0,02140
24	-0,01168	0,01153	-0,02121	0,02343	-0,02142	0,02366
25	-0,01045	0,01278	-0,02040	0,02605	-0,02060	0,02631
26	-0,00958	0,01324	-0,02012	0,02772	-0,02031	0,02799
27	-0,00952	0,01424	-0,02100	0,03016	-0,02121	0,03046
28	-0,00646	0,01515	-0,01660	0,03287	-0,01677	0,03320
29	-0,00297	0,01400	-0,00818	0,03004	-0,00826	0,03034
30	-0,00353	0,01287	-0,01048	0,02775	-0,01058	0,02803
31	-0,00356	0,01190	-0,01029	0,02515	-0,01039	0,02540
32	-0,00355	0,01138	-0,00999	0,02431	-0,01009	0,02455
33	-0,00375	0,01011	-0,01023	0,02124	-0,01033	0,02145
34	-0,01115	0,01077	-0,02182	0,02194	-0,02203	0,02215
35	-0,01202	0,01161	-0,02294	0,02435	-0,02317	0,02459
36	-0,01084	0,01213	-0,02218	0,02661	-0,02240	0,02687
37	-0,00977	0,01349	-0,02164	0,02920	-0,02185	0,02948
38	-0,00990	0,01402	-0,02169	0,02993	-0,02190	0,03023
39	-0,00733	0,01492	-0,01867	0,03278	-0,01886	0,03310
40	-0,00182	0,01372	-0,00637	0,02998	-0,00643	0,03028
41	-0,00265	0,01271	-0,00953	0,02805	-0,00963	0,02833
42	-0,00244	0,01204	-0,00787	0,02603	-0,00795	0,02628
43	-0,00314	0,01135	-0,00870	0,02385	-0,00878	0,02408
44	-0,00316	0,01028	-0,00921	0,02263	-0,00930	0,02286
45	-0,01125	0,01008	-0,02488	0,02130	-0,02513	0,02151

Continuação da Tabela B.8

	<i>Iteração 1</i>		<i>Iteração 2</i>		<i>Iteração 3</i>	
46	-0,01135	0,01103	-0,02390	0,02452	-0,02414	0,02476
47	-0,01101	0,01202	-0,02353	0,02671	-0,02376	0,02697
48	-0,01061	0,01355	-0,02242	0,02917	-0,02264	0,02946
49	-0,01103	0,01408	-0,02455	0,03032	-0,02479	0,03062
50	-0,00719	0,01488	-0,01638	0,03221	-0,01654	0,03253
51	-0,00118	0,01401	-0,00493	0,03026	-0,00498	0,03056
52	-0,00209	0,01270	-0,00806	0,02856	-0,00814	0,02884
53	-0,00201	0,01248	-0,00730	0,02673	-0,00737	0,02700
54	-0,00263	0,01127	-0,00727	0,02388	-0,00734	0,02411
55	-0,00243	0,01026	-0,00739	0,02187	-0,00747	0,02209
56	-0,01032	0,00902	-0,02563	0,02225	-0,02589	0,02247
57	-0,01146	0,01121	-0,02588	0,02436	-0,02614	0,02460
58	-0,01176	0,01217	-0,02545	0,02714	-0,02570	0,02740
59	-0,01081	0,01324	-0,02423	0,02929	-0,02447	0,02958
60	-0,01156	0,01424	-0,02520	0,02996	-0,02545	0,03025
61	-0,00799	0,01451	-0,01751	0,03218	-0,01768	0,03250
62	-0,00057	0,01434	-0,00317	0,03072	-0,00321	0,03103
63	-0,00218	0,01308	-0,00722	0,02861	-0,00729	0,02889
64	-0,00194	0,01220	-0,00614	0,02614	-0,00620	0,02639
65	-0,00225	0,01136	-0,00605	0,02463	-0,00611	0,02487
66	-0,00198	0,01004	-0,00604	0,02206	-0,00610	0,02228
67	-0,01089	0,00937	-0,02840	0,02253	-0,02868	0,02275
68	-0,01150	0,01073	-0,02690	0,02497	-0,02716	0,02522
69	-0,01139	0,01133	-0,02703	0,02716	-0,02730	0,02743
70	-0,01196	0,01349	-0,02559	0,02919	-0,02585	0,02948
71	-0,01208	0,01399	-0,02700	0,03036	-0,02727	0,03066
72	-0,00790	0,01545	-0,01800	0,03201	-0,01817	0,03232
73	-0,00017	0,01452	-0,00177	0,03067	-0,00178	0,03098
74	-0,00223	0,01340	-0,00624	0,02895	-0,00630	0,02924
75	-0,00166	0,01212	-0,00490	0,02657	-0,00495	0,02683
76	-0,00168	0,01103	-0,00468	0,02420	-0,00472	0,02444
77	-0,00108	0,01012	-0,00456	0,02218	-0,00461	0,02240
78	-0,01137	0,00912	-0,02898	0,02300	-0,02927	0,02323
79	-0,01149	0,01041	-0,02875	0,02521	-0,02904	0,02546
80	-0,01201	0,01163	-0,02859	0,02738	-0,02887	0,02765
81	-0,01225	0,01337	-0,02738	0,02984	-0,02765	0,03014
82	-0,01287	0,01436	-0,02944	0,03163	-0,02973	0,03194

Continuação da Tabela B.8

	<i>Iteração 1</i>		<i>Iteração 2</i>		<i>Iteração 3</i>	
83	-0,00253	0,01617	-0,00570	0,03319	-0,00576	0,03352
84	-0,00044	0,01438	-0,00501	0,03035	-0,00506	0,03065
85	-0,00131	0,01368	-0,00451	0,02879	-0,00455	0,02907
86	-0,00126	0,01253	-0,00405	0,02675	-0,00409	0,02701
87	-0,00132	0,01132	-0,00346	0,02471	-0,00350	0,02495
88	-0,00056	0,01034	-0,00392	0,02237	-0,00396	0,02259
89	-0,01204	0,00956	-0,03047	0,02322	-0,03077	0,02345
90	-0,01238	0,01088	-0,03033	0,02531	-0,03063	0,02556
91	-0,01209	0,01161	-0,03026	0,02793	-0,03056	0,02821
92	-0,01265	0,01316	-0,02862	0,02981	-0,02891	0,03010
93	-0,01332	0,01378	-0,03128	0,03186	-0,03159	0,03217
94	-0,00816	0,01700	-0,01882	0,03402	-0,01900	0,03435
95	0,00142	0,01456	0,00205	0,03041	0,00207	0,03071
96	-0,00112	0,01387	-0,00486	0,02872	-0,00491	0,02900
97	-0,00081	0,01285	-0,00310	0,02650	-0,00313	0,02676
98	-0,00059	0,01158	-0,00238	0,02469	-0,00240	0,02493
99	0,00002	0,01045	-0,00223	0,02217	-0,00226	0,02239
100	-0,01215	0,00892	-0,03198	0,02399	-0,03230	0,02423
101	-0,01271	0,01111	-0,03187	0,02619	-0,03219	0,02644
102	-0,01287	0,01199	-0,03141	0,02819	-0,03172	0,02847
103	-0,01272	0,01289	-0,03040	0,03063	-0,03070	0,03093
104	-0,01441	0,01415	-0,03182	0,03201	-0,03213	0,03233
105	-0,00876	0,01601	-0,02209	0,03361	-0,02230	0,03395
106	0,00160	0,01481	0,00409	0,03017	0,00413	0,03047
107	-0,00089	0,01389	-0,00415	0,02823	-0,00419	0,02851
108	-0,00017	0,01265	-0,00199	0,02670	-0,00201	0,02696
109	-0,00037	0,01176	-0,00134	0,02474	-0,00135	0,02498
110	-0,00011	0,01081	-0,00131	0,02305	-0,00132	0,02328
111	-0,01186	0,00791	-0,03312	0,02451	-0,03344	0,02475
112	-0,01283	0,00942	-0,03356	0,02696	-0,03389	0,02722
113	-0,01332	0,01129	-0,03279	0,02904	-0,03311	0,02933
114	-0,01287	0,01183	-0,03171	0,03075	-0,03202	0,03105
115	-0,01384	0,01293	-0,03414	0,03355	-0,03447	0,03388
116	-0,00899	0,01508	-0,02315	0,03302	-0,02338	0,03335
117	0,00260	0,01517	0,00630	0,03167	0,00636	0,03199
118	0,00016	0,01383	-0,00176	0,02857	-0,00177	0,02885
119	0,00012	0,01280	-0,00055	0,02671	-0,00056	0,02698

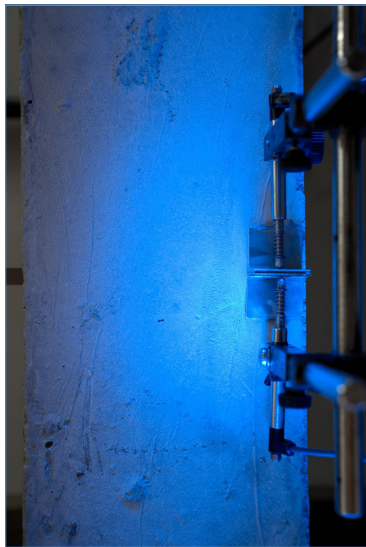
Continuação da Tabela B.8

	<i>Iteração 1</i>		<i>Iteração 2</i>		<i>Iteração 3</i>	
120	-0,00047	0,01145	-0,00055	0,02494	-0,00055	0,02519
121	0,00082	0,01046	-0,00062	0,02261	-0,00063	0,02284

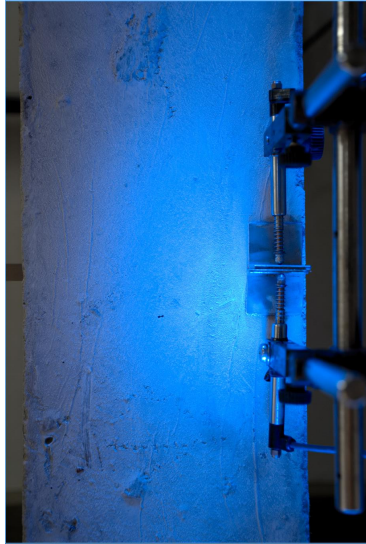
B.2 IMAGENS

Figura B.1 – Iteração 1: Viga MON V1 ($\Delta t_0 = 790$ seg e $\Delta t_1 = 800$ seg).

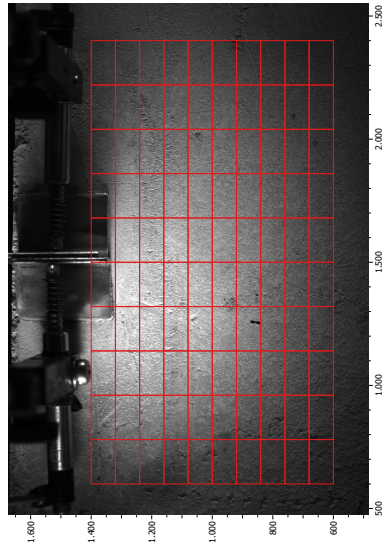
(a) $\Delta t_0 = 790$ seg.



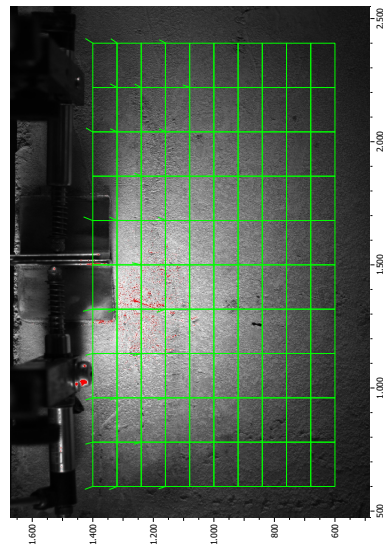
(b) $\Delta t_1 = 800$ seg.



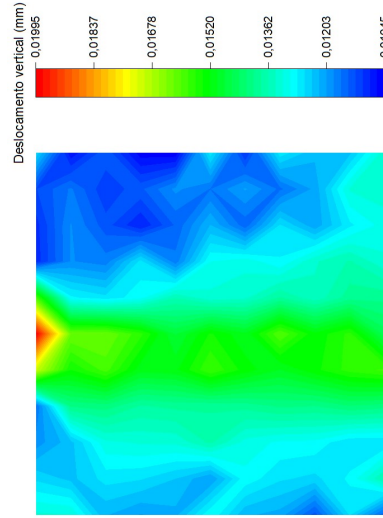
(c) Malha 10x10: Elemento Q4 Full Field.



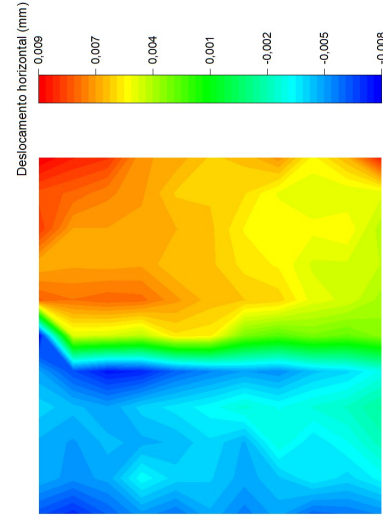
(d) Malha representando deslocamentos nodais.



(e) Mapa de cores de deslocamentos nodais U_y .



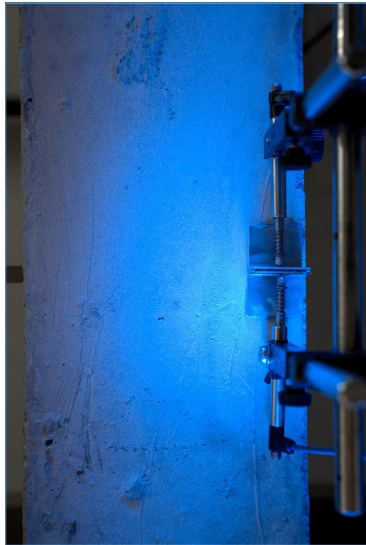
(f) Mapa de cores de deslocamentos nodais U_x .



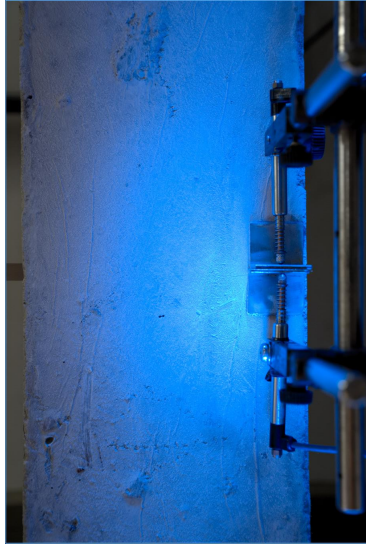
Fonte: Autor, 2020.

Figura B.2 – Iteração 2: Viga MON V1 ($\Delta t_0 = 790$ seg e $\Delta t_1 = 810$ seg).

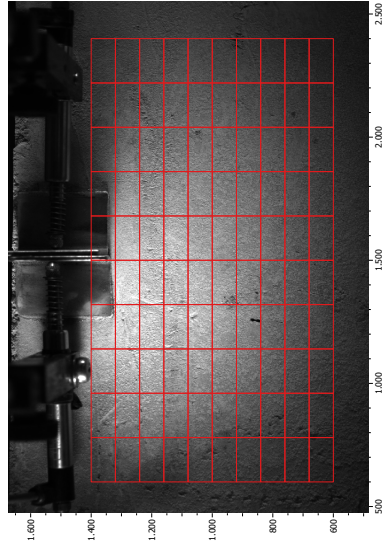
(a) $\Delta t_0 = 790$ seg.



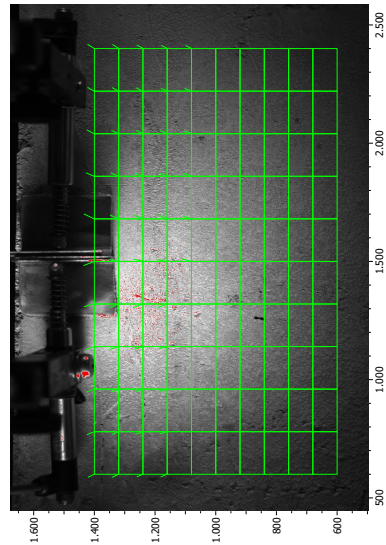
(b) $\Delta t_1 = 810$ seg.



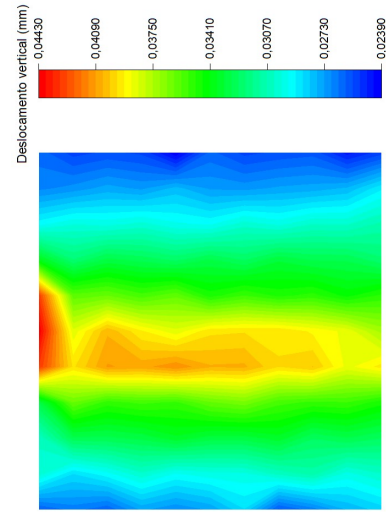
(c) Malha 10x10: Elemento Q4 Full Field.



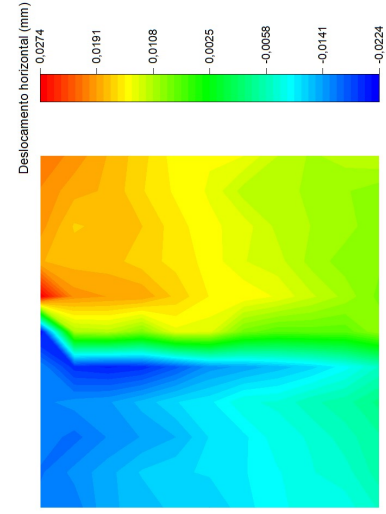
(d) Malha representando deslocamentos nodais.



(e) Mapa de cores de deslocamentos nodais U_y .



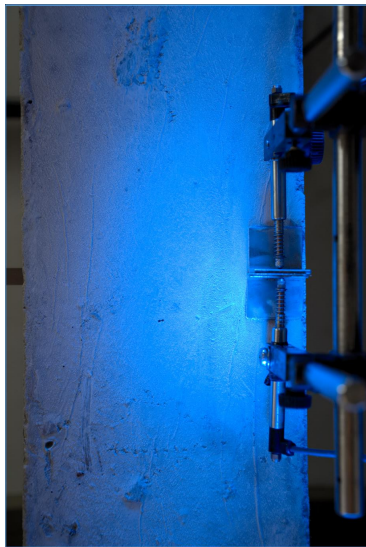
(f) Mapa de cores de deslocamentos nodais U_x .



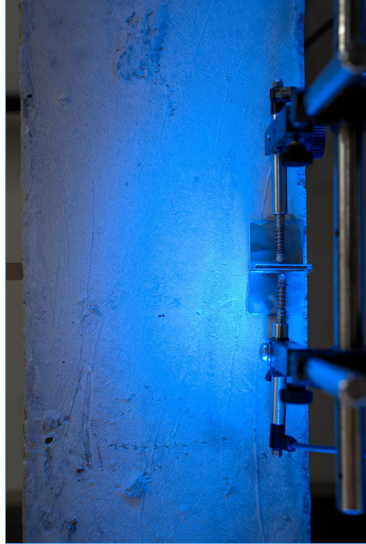
Fonte: Autor, 2020.

Figura B.3 – Iteração 3: Viga MON V1 ($\Delta t_0 = 790$ seg e $\Delta t_1 = 820$ seg).

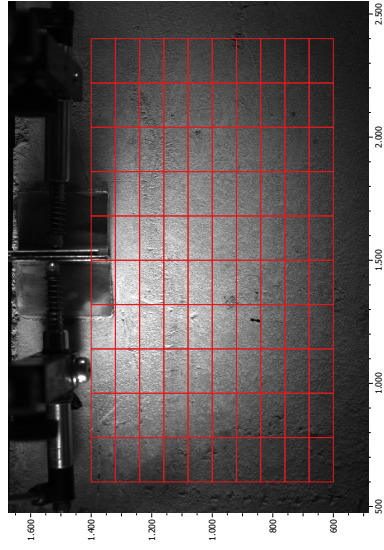
(a) $\Delta t_0 = 790$ seg.



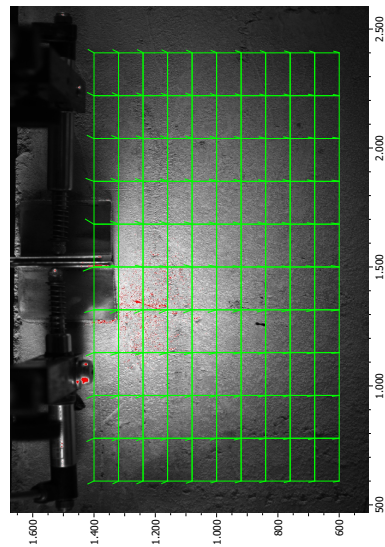
(b) $\Delta t_1 = 820$ seg.



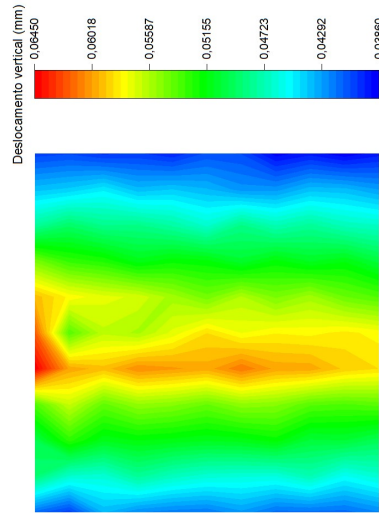
(c) Malha 10x10: Elemento Q4 Full Field.



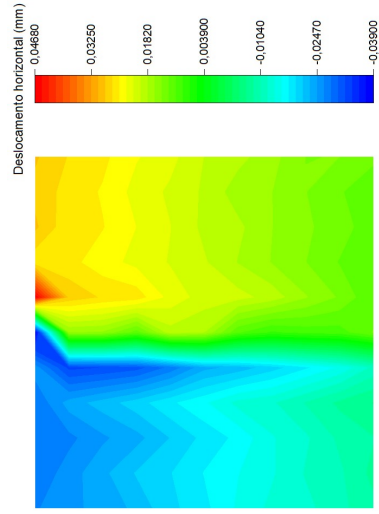
(d) Malha representando deslocamentos nodais.



(e) Mapa de cores de deslocamentos nodais U_y .



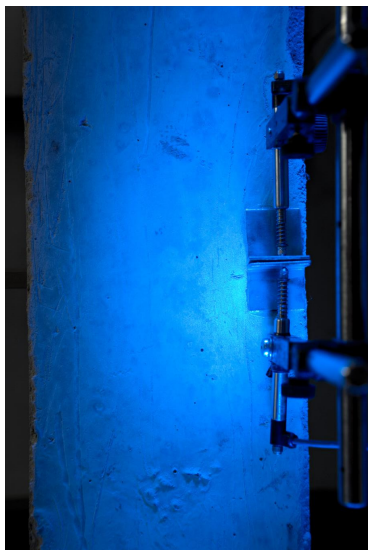
(f) Mapa de cores de deslocamentos nodais U_x .



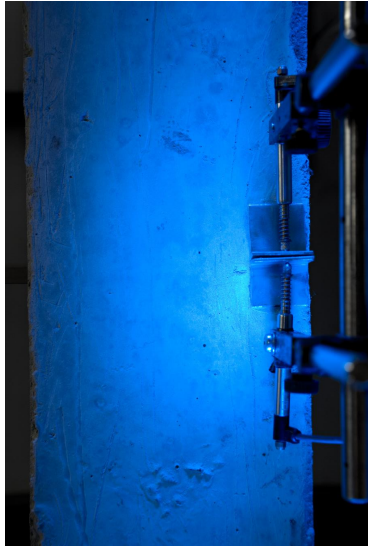
Fonte: Autor, 2020.

Figura B.4 – Iteração 1: Viga MON V2 ($\Delta t_0 = 500$ seg e $\Delta t_1 = 510$ seg).

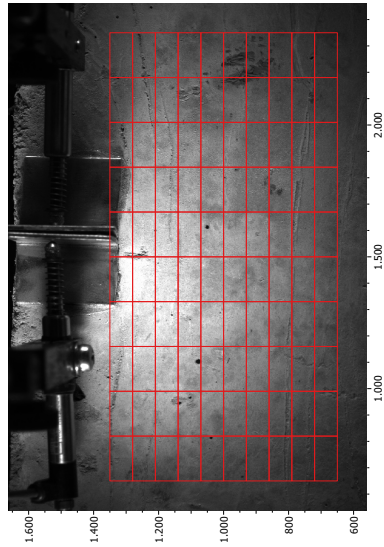
(a) $\Delta t_0 = 500$ seg.



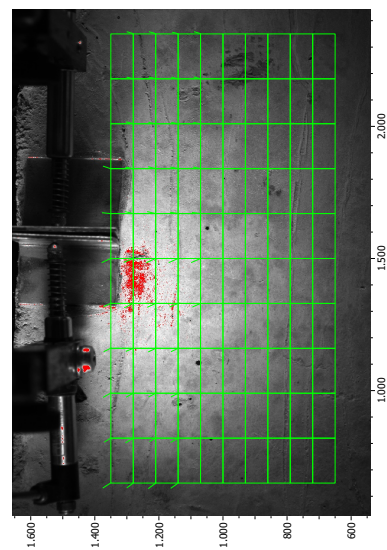
(b) $\Delta t_1 = 510$ seg.



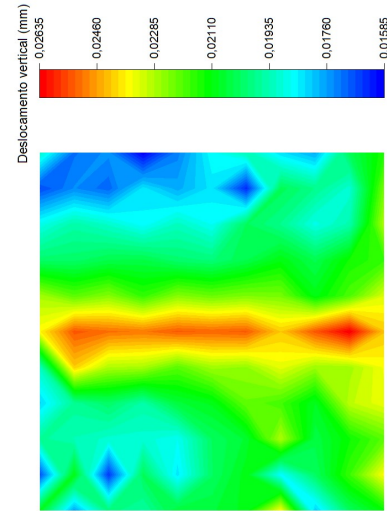
(c) Malha 10x10: Elemento Q4 Full Field.



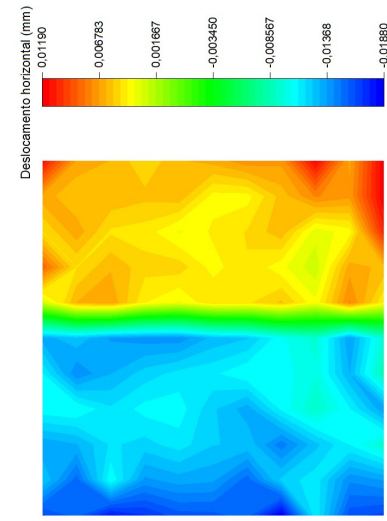
(d) Malha representando deslocamentos nodais.



(e) Mapa de cores de deslocamentos nodais U_y .



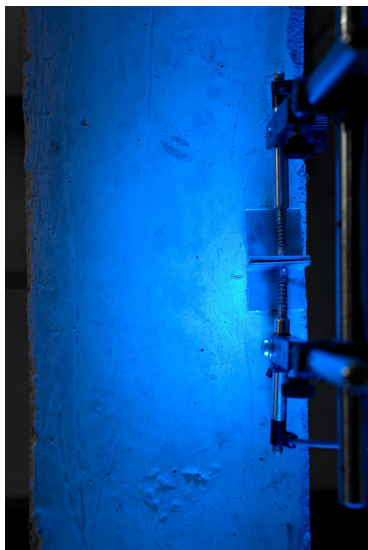
(f) Mapa de cores de deslocamentos nodais U_x .



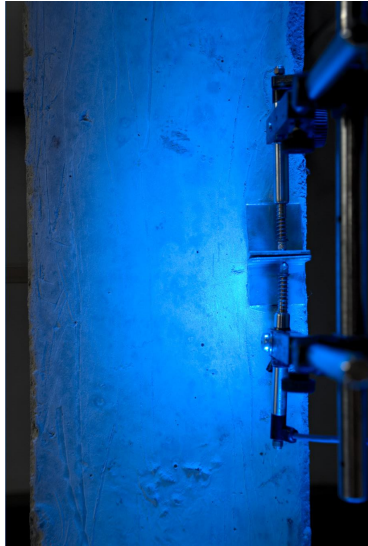
Fonte: Autor, 2020.

Figura B.5 – Iteração 2: Viga MON V2 ($\Delta t_0 = 500$ seg e $\Delta t_1 = 520$ seg).

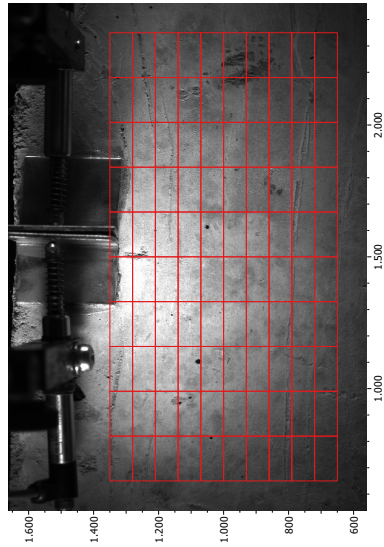
(a) $\Delta t_0 = 500$ seg.



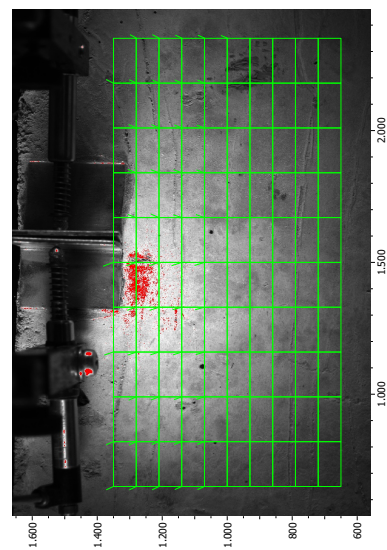
(b) $\Delta t_1 = 520$ seg.



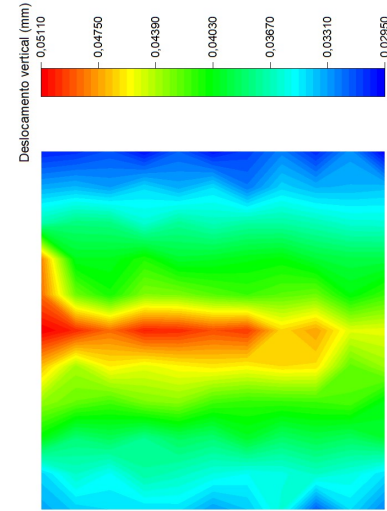
(c) Malha 10x10: Elemento Q4 Full Field.



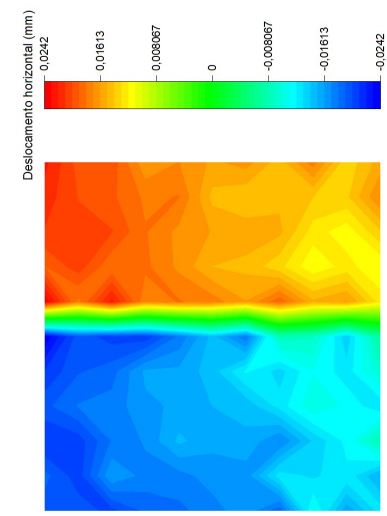
(d) Malha representando deslocamentos nodais.



(e) Mapa de cores de deslocamentos nodais U_y .



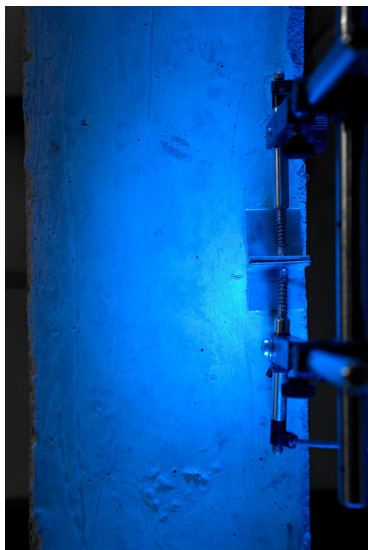
(f) Mapa de cores de deslocamentos nodais U_x .



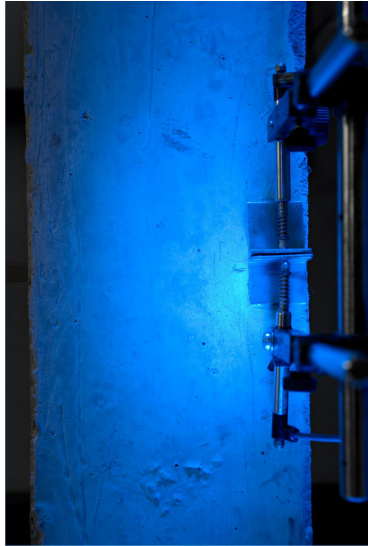
Fonte: Autor, 2020.

Figura B.6 – Iteração 3: Viga MON V2 ($\Delta t_0 = 500$ seg e $\Delta t_1 = 530$ seg).

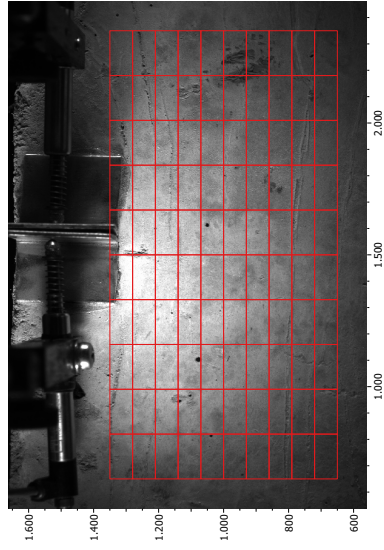
(a) $\Delta t_0 = 500$ seg.



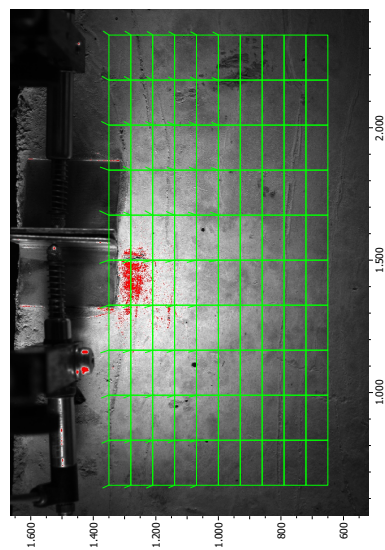
(b) $\Delta t_1 = 530$ seg.



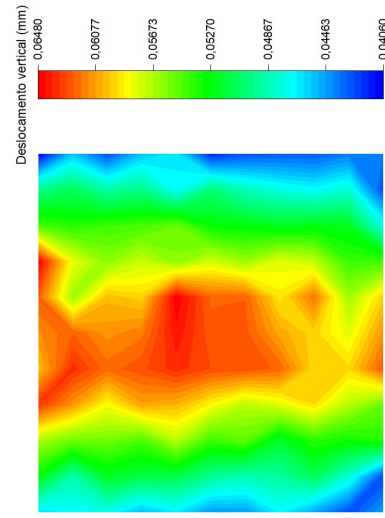
(c) Malha 10x10: Elemento Q4 Full Field.



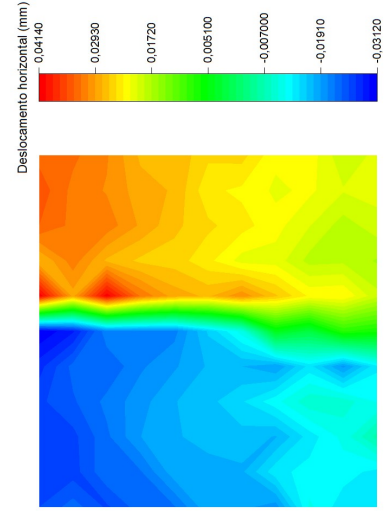
(d) Malha representando deslocamentos nodais.



(e) Mapa de cores de deslocamentos nodais U_y .



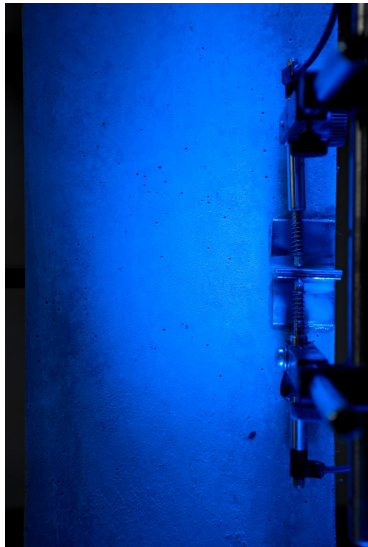
(f) Mapa de cores de deslocamentos nodais U_x .



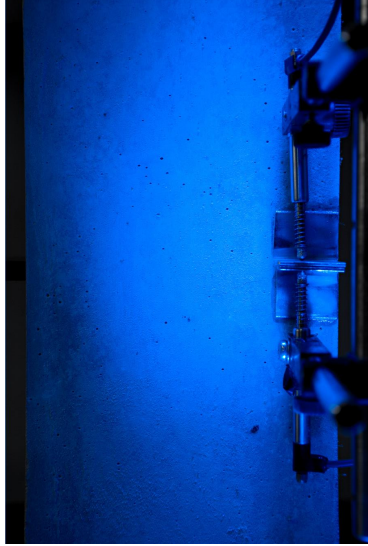
Fonte: Autor, 2020.

Figura B.7 – Iteração 1: Viga MON V3 ($\Delta t_0 = 500$ seg e $\Delta t_1 = 510$ seg).

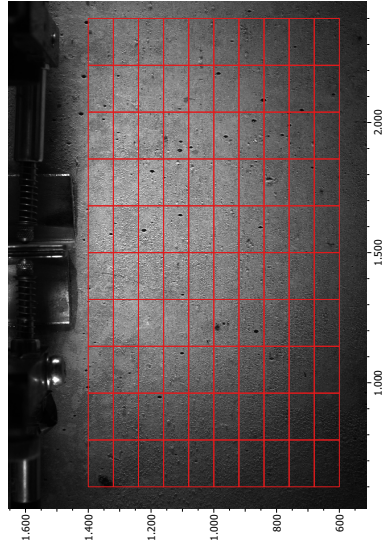
(a) $\Delta t_0 = 500$ seg.



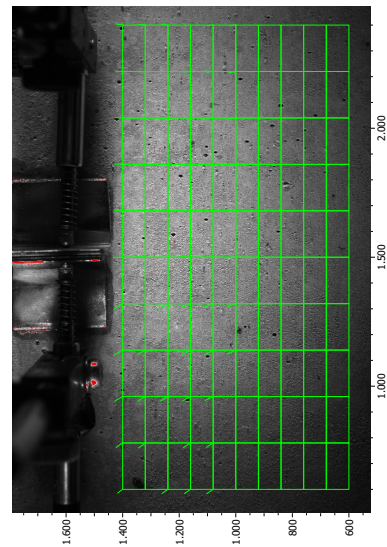
(b) $\Delta t_1 = 510$ seg.



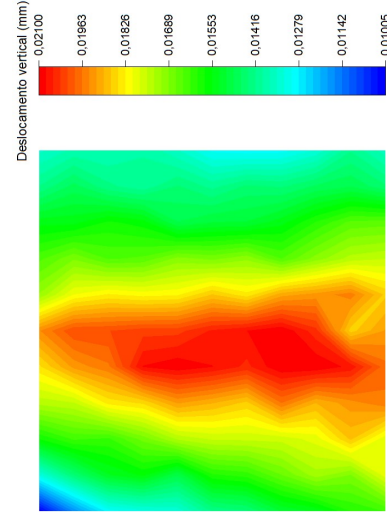
(c) Malha 10x10: Elemento Q4 Full Field.



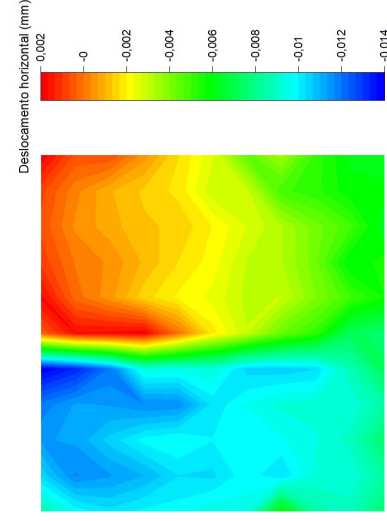
(d) Malha representando deslocamentos nodais.



(e) Mapa de cores de deslocamentos nodais U_y .



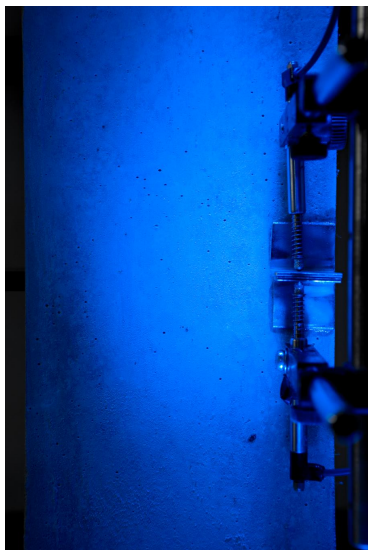
(f) Mapa de cores de deslocamentos nodais U_x .



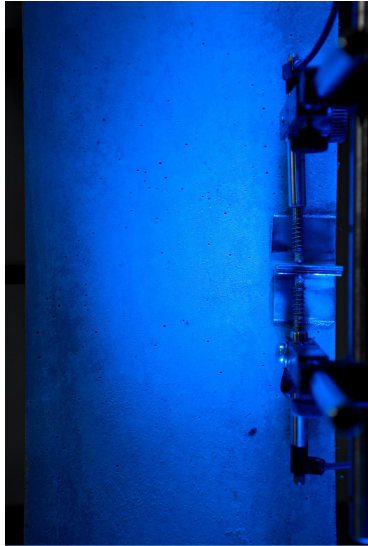
Fonte: Autor, 2020.

Figura B.8 – Iteração 2: Viga MON V3 ($\Delta t_0 = 500$ seg e $\Delta t_1 = 520$ seg).

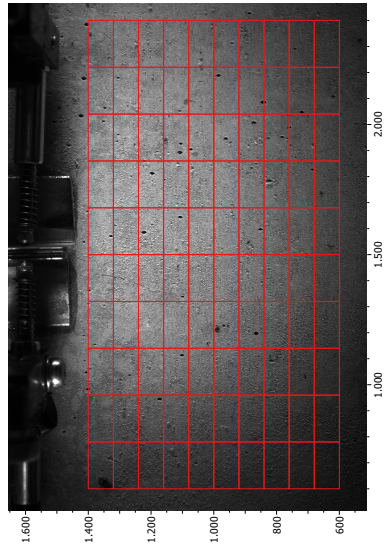
(a) $\Delta t_0 = 500$ seg.



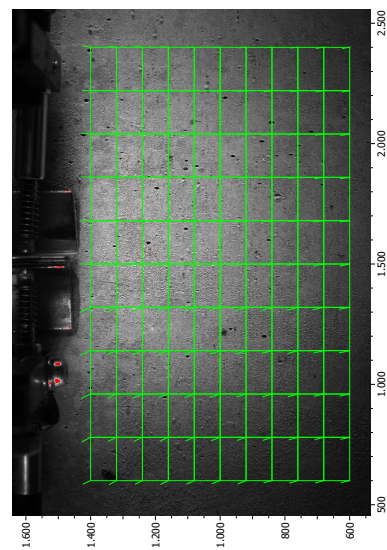
(b) $\Delta t_1 = 520$ seg.



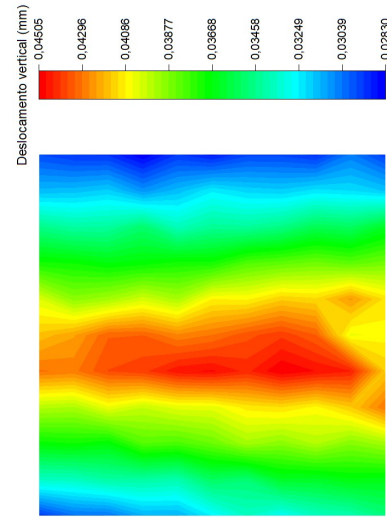
(c) Malha 10x10: Elemento Q4 Full Field.



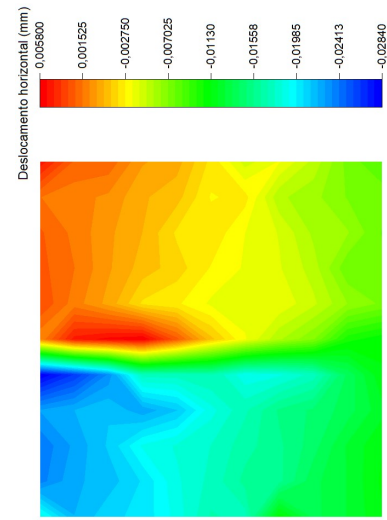
(d) Malha representando deslocamentos nodais.



(e) Mapa de cores de deslocamentos nodais U_y .



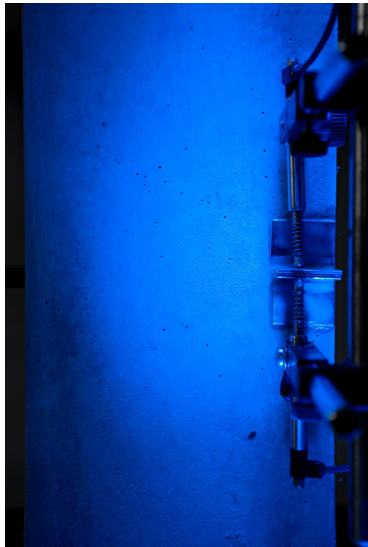
(f) Mapa de cores de deslocamentos nodais U_x .



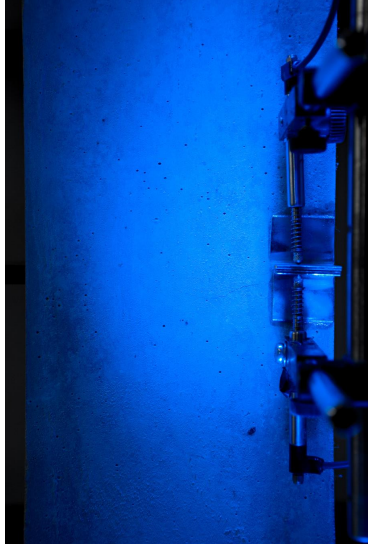
Fonte: Autor, 2020.

Figura B.9 – Iteração 3: Viga MON V3 ($\Delta t_0 = 500$ seg e $\Delta t_1 = 530$ seg).

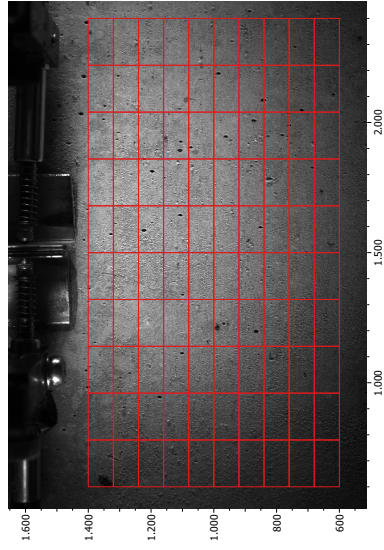
(a) $\Delta t_0 = 500$ seg.



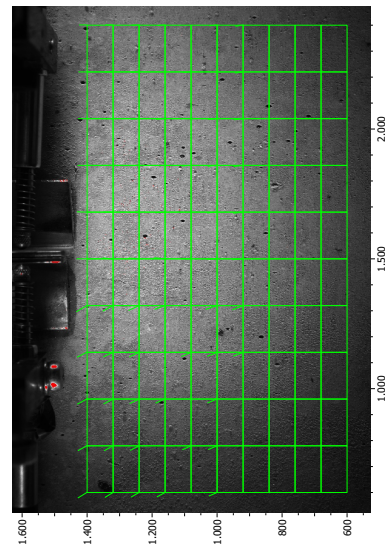
(b) $\Delta t_1 = 530$ seg.



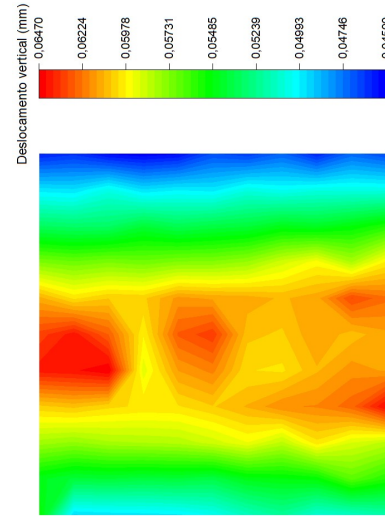
(c) Malha 10x10: Elemento Q4 Full Field.



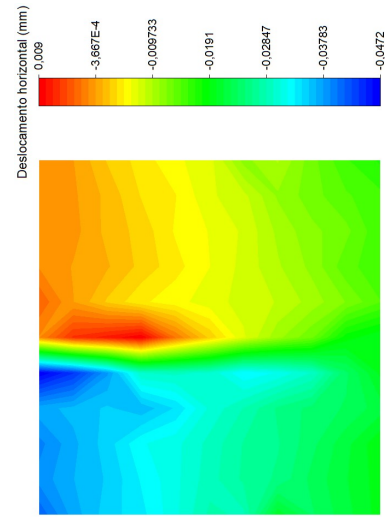
(d) Malha representando deslocamentos nodais.



(e) Mapa de cores de deslocamentos nodais U_y .



(f) Mapa de cores de deslocamentos nodais U_x .



Fonte: Autor, 2020.

Figura B.10 – Iteração 1: Viga MON V4 ($\Delta t_0 = 550$ seg e $\Delta t_1 = 560$ seg).

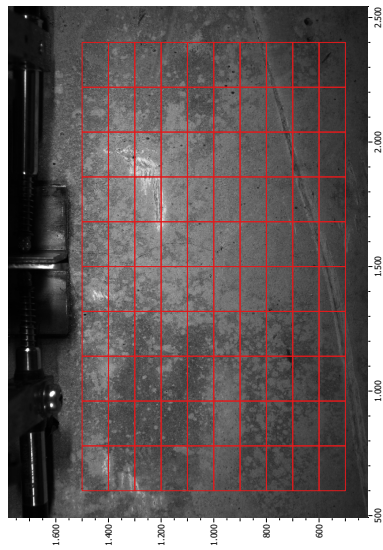
(a) $\Delta t_0 = 550$ seg.



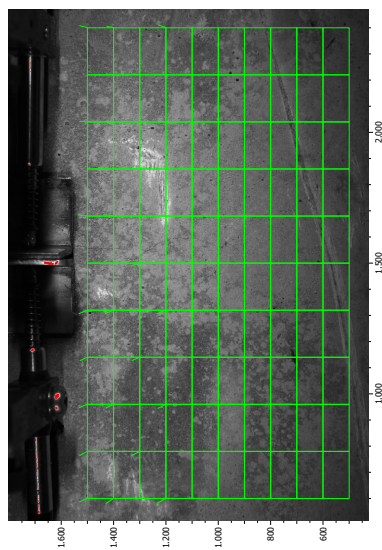
(b) $\Delta t_1 = 560$ seg.



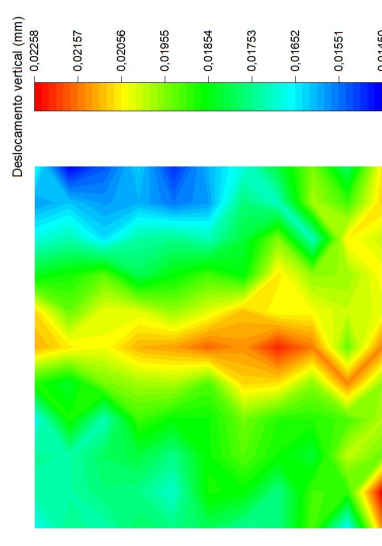
(c) Malha 10x10: Elemento Q4 Full Field.



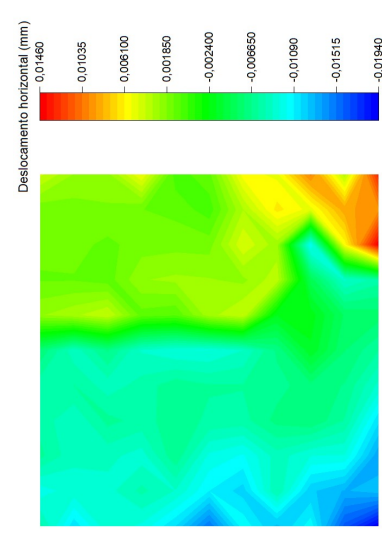
(d) Malha representando deslocamentos nodais.



(e) Mapa de cores de deslocamentos nodais U_y .



(f) Mapa de cores de deslocamentos nodais U_x .



Fonte: Autor, 2020.

Figura B.11 – Iteração 2: Viga MON V4 ($\Delta t_0 = 550$ seg e $\Delta t_1 = 570$ seg).

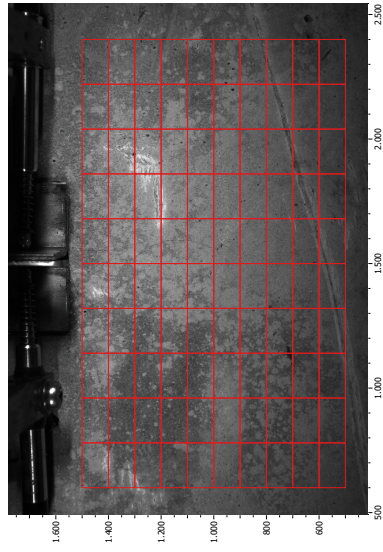
(a) $\Delta t_0 = 550$ seg.



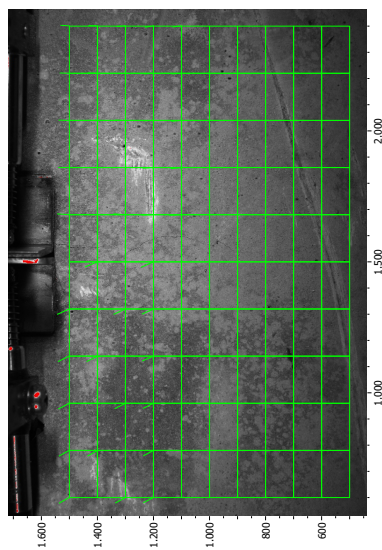
(b) $\Delta t_1 = 570$ seg.



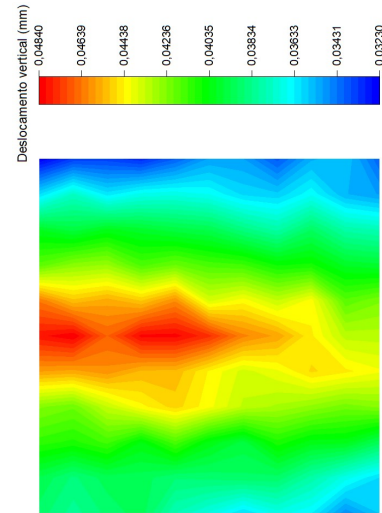
(c) Malha 10x10: Elemento Q4 Full Field.



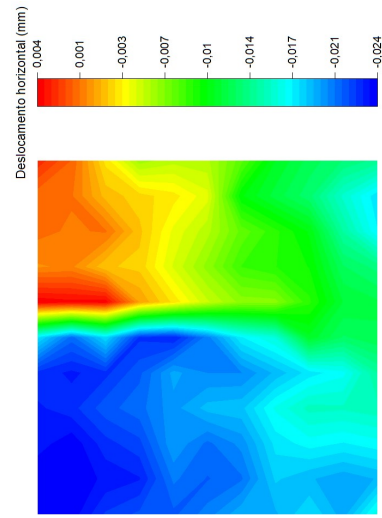
(d) Malha representando deslocamentos nodais.



(e) Mapa de cores de deslocamentos nodais U_y .



(f) Mapa de cores de deslocamentos nodais U_x .



Fonte: Autor, 2020.

Figura B.12 – Iteração 3: Viga MON V4 ($\Delta t_0 = 550$ seg e $\Delta t_1 = 580$ seg).

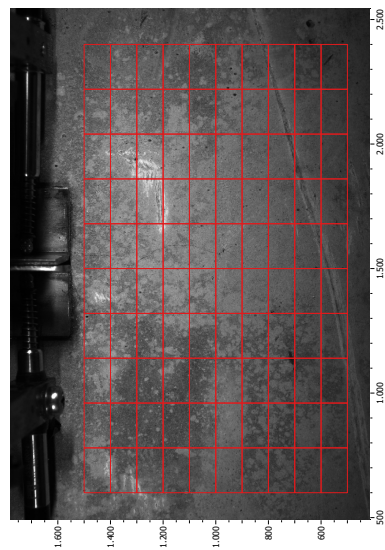
(a) $\Delta t_0 = 550$ seg.



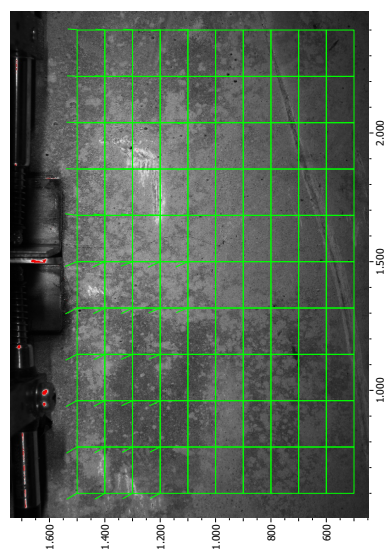
(b) $\Delta t_1 = 580$ seg.



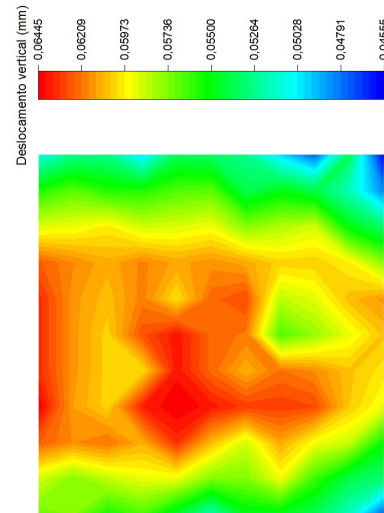
(c) Malha 10x10: Elemento Q4 Full Field.



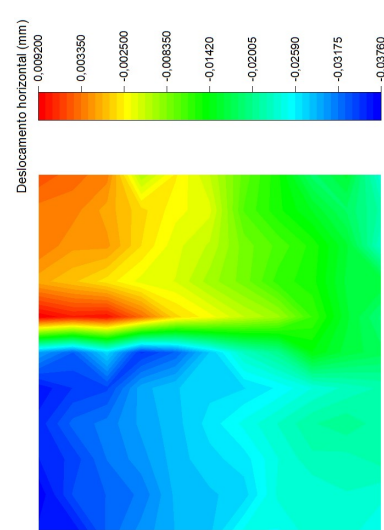
(d) Malha representando deslocamentos nodais.



(e) Mapa de cores de deslocamentos nodais U_y .



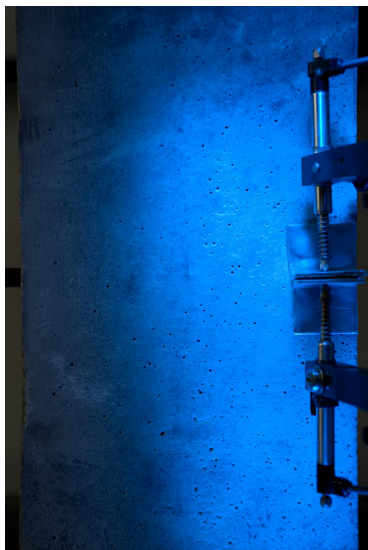
(f) Mapa de cores de deslocamentos nodais U_x .



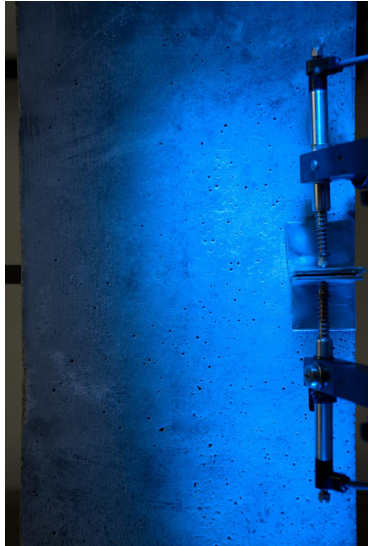
Fonte: Autor, 2020.

Figura B.13 – Iteração 1: Viga DC V1 ($\Delta t_0 = 400$ seg e $\Delta t_1 = 410$ seg).

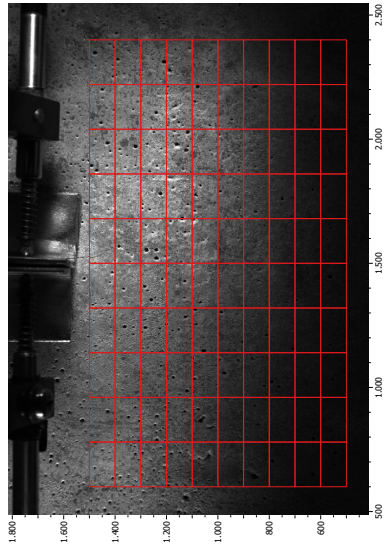
(a) $\Delta t_0 = 400$ seg.



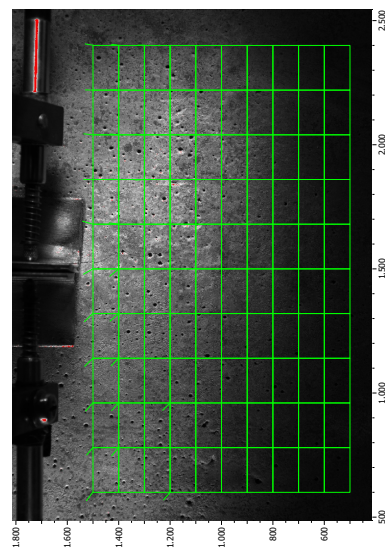
(b) $\Delta t_1 = 410$ seg.



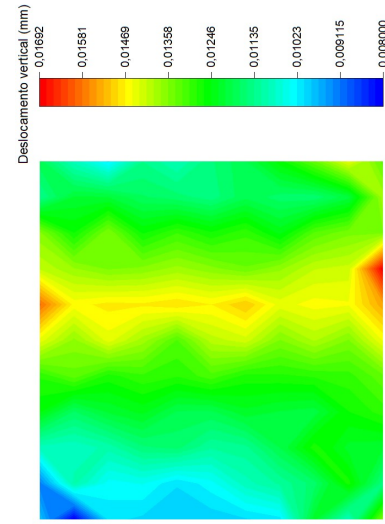
(c) Malha 10x10: Elemento Q4 Full Field.



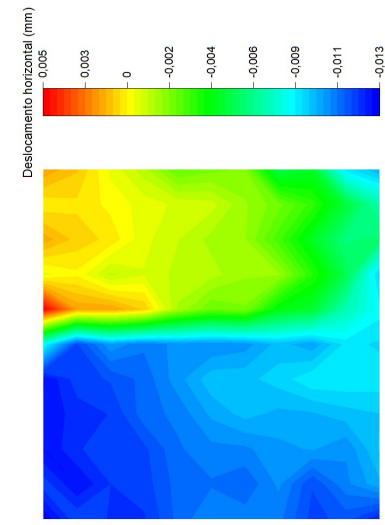
(d) Malha representando deslocamentos nodais.



(e) Mapa de cores de deslocamentos nodais U_y .



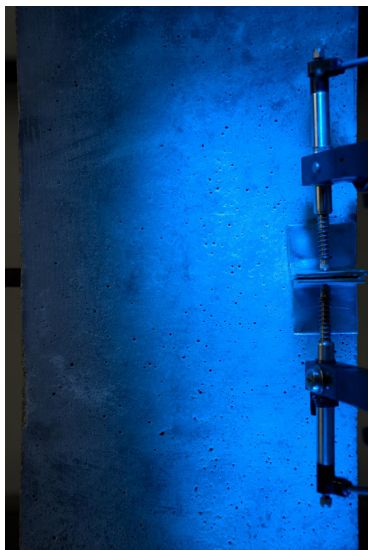
(f) Mapa de cores de deslocamentos nodais U_x .



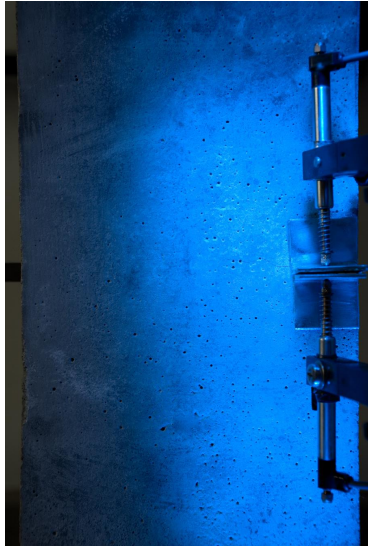
Fonte: Autor, 2020.

Figura B.14 – Iteração 2: Viga DC V1 ($\Delta t_0 = 400$ seg e $\Delta t_1 = 420$ seg).

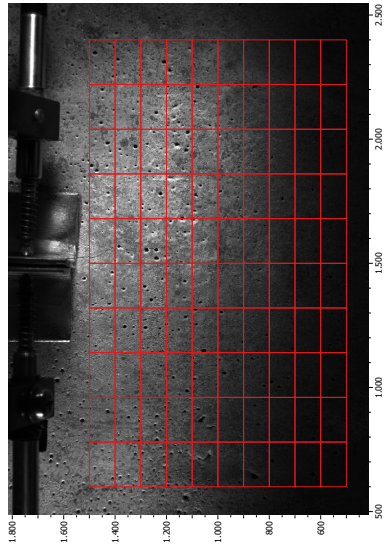
(a) $\Delta t_0 = 400$ seg.



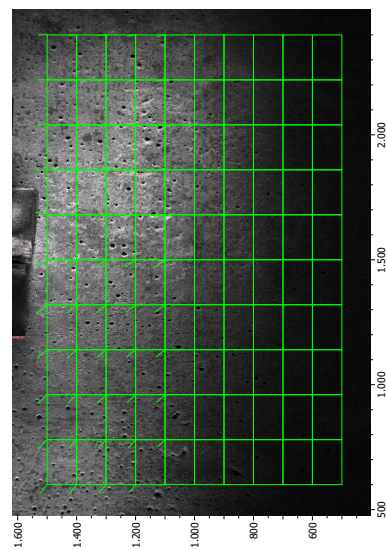
(b) $\Delta t_1 = 420$ seg.



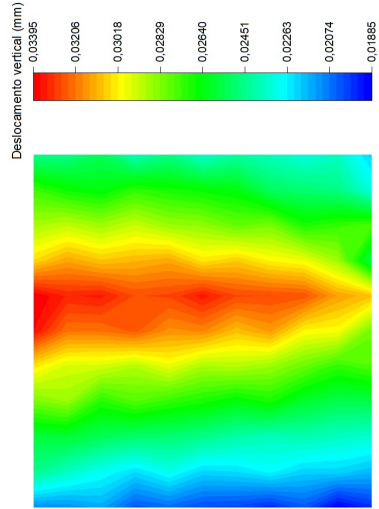
(c) Malha 10x10: Elemento Q4 Full Field.



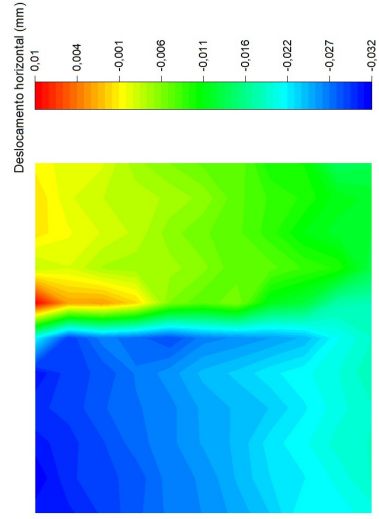
(d) Malha representando deslocamentos nodais.



(e) Mapa de cores de deslocamentos nodais U_y .



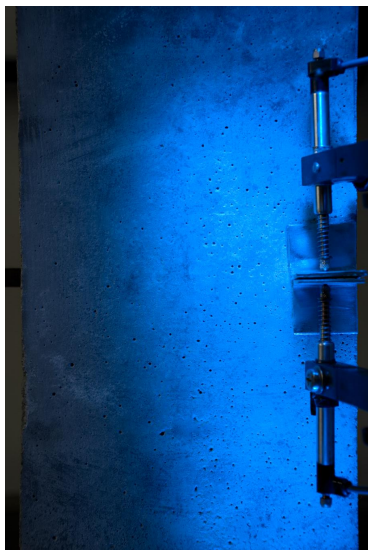
(f) Mapa de cores de deslocamentos nodais U_x .



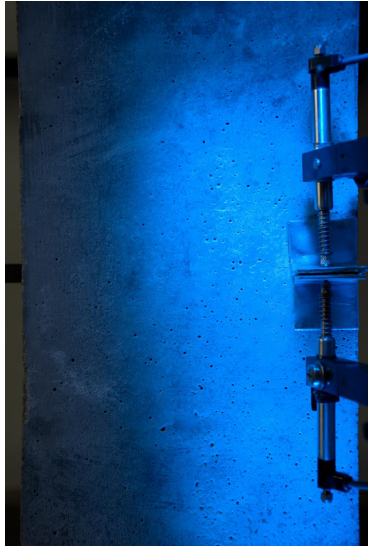
Fonte: Autor, 2020.

Figura B.15 – Iteração 3: Viga DC V1 ($\Delta t_0 = 400$ seg e $\Delta t_1 = 430$ seg).

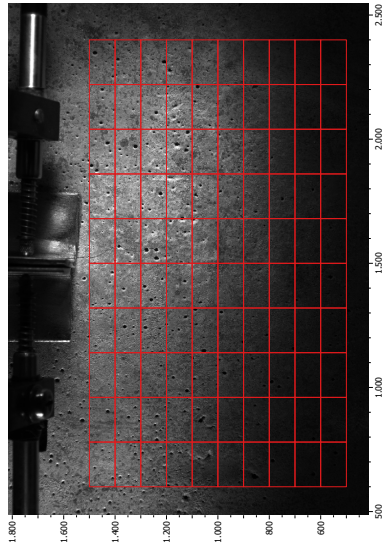
(a) $\Delta t_0 = 400$ seg.



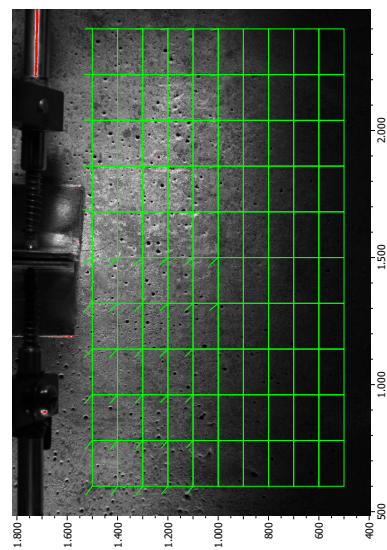
(b) $\Delta t_1 = 430$ seg.



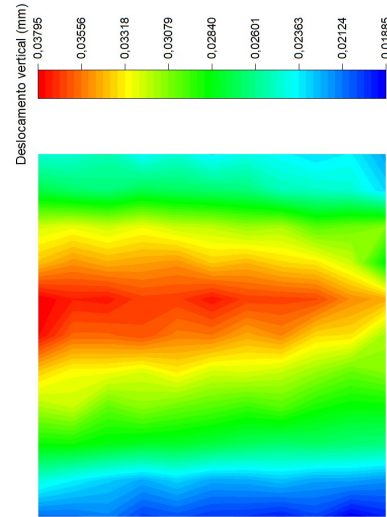
(c) Malha 10x10: Elemento Q4 Full Field.



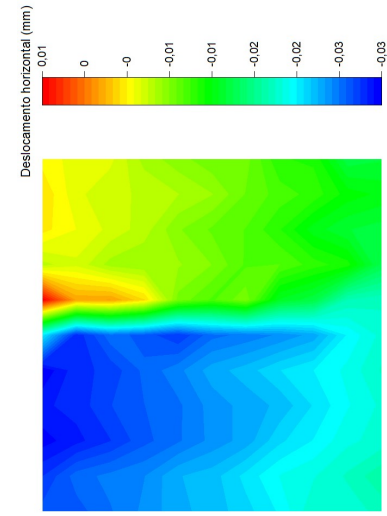
(d) Malha representando deslocamentos nodais.



(e) Mapa de cores de deslocamentos nodais U_y .



(f) Mapa de cores de deslocamentos nodais U_x .



Fonte: Autor, 2020.

Figura B.16 – Iteração 1: Viga DC V2 ($\Delta t_0 = 500$ seg e $\Delta t_1 = 510$ seg).

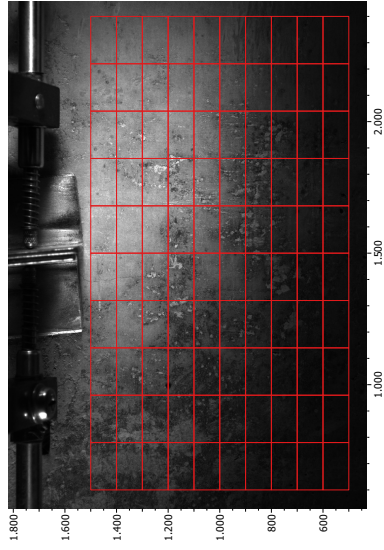
(a) $\Delta t_0 = 500$ seg.



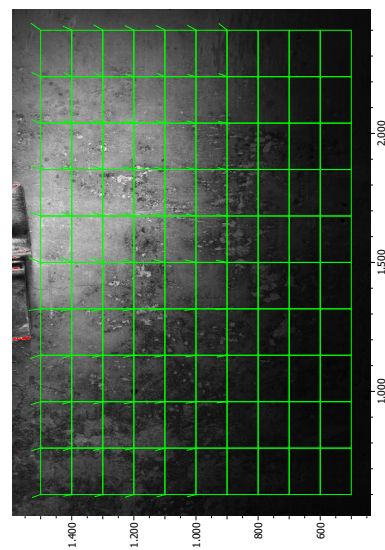
(b) $\Delta t_1 = 510$ seg.



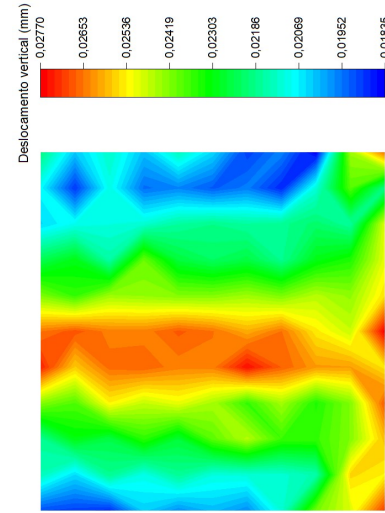
(c) Malha 10x10: Elemento Q4 Full Field.



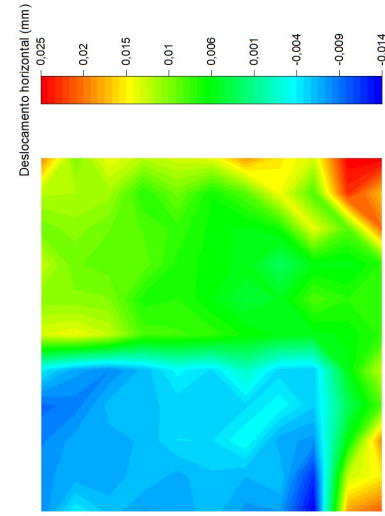
(d) Malha representando deslocamentos nodais.



(e) Mapa de cores de deslocamentos nodais U_y .



(f) Mapa de cores de deslocamentos nodais U_x .



Fonte: Autor, 2020.

Figura B.17 – Iteração 2: Viga DC V2 ($\Delta t_0 = 500$ seg e $\Delta t_1 = 520$ seg).

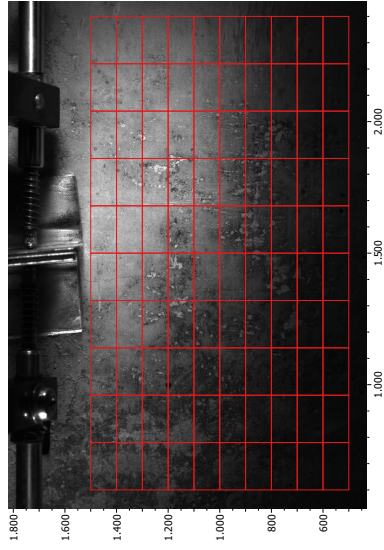
(a) $\Delta t_0 = 500$ seg.



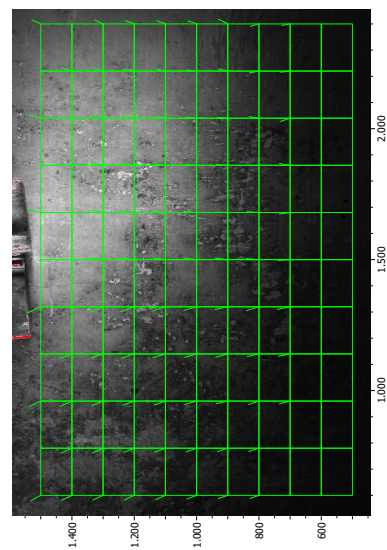
(b) $\Delta t_1 = 520$ seg.



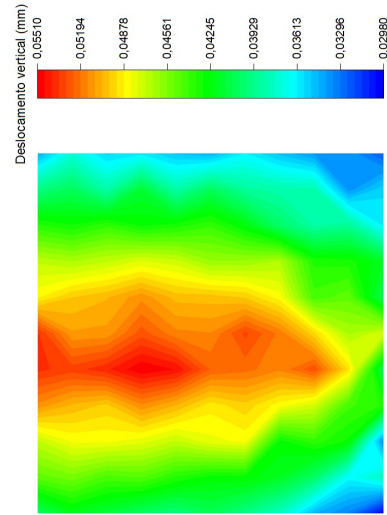
(c) Malha 10x10: Elemento Q4 Full Field.



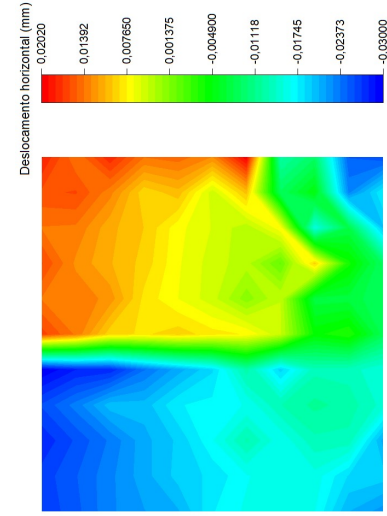
(d) Malha representando deslocamentos nodais.



(e) Mapa de cores de deslocamentos nodais U_y .



(f) Mapa de cores de deslocamentos nodais U_x .



Fonte: Autor, 2020.

Figura B.18 – Iteração 3: Viga DC V2 ($\Delta t_0 = 500$ seg e $\Delta t_1 = 530$ seg).

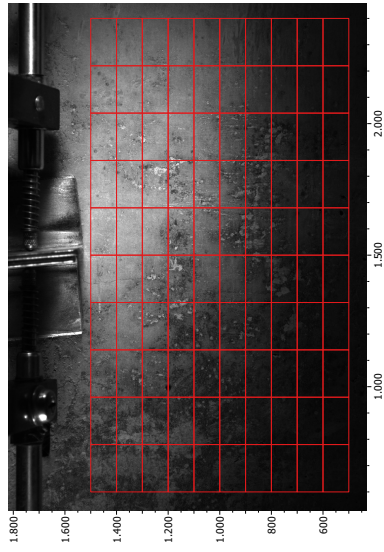
(a) $\Delta t_0 = 500$ seg.



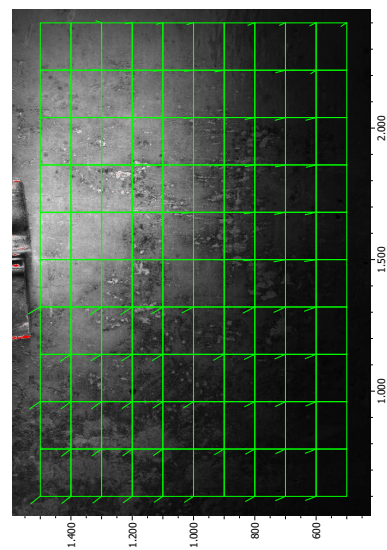
(b) $\Delta t_1 = 530$ seg.



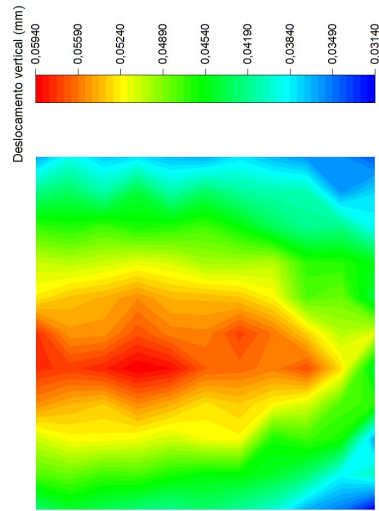
(c) Malha 10x10: Elemento Q4 Full Field.



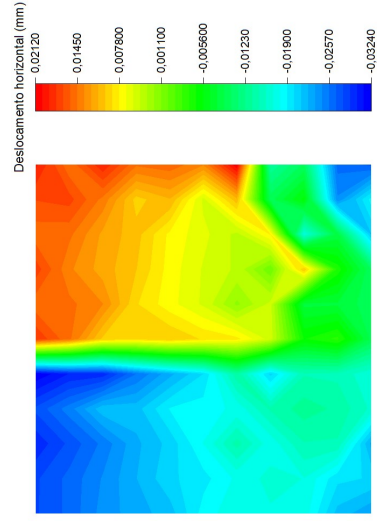
(d) Malha representando deslocamentos nodais.



(e) Mapa de cores de deslocamentos nodais U_y .



(f) Mapa de cores de deslocamentos nodais U_x .



Fonte: Autor, 2020.

Figura B.19 – Iteração 1: Viga DC V3 ($\Delta t_0 = 360$ seg e $\Delta t_1 = 370$ seg).

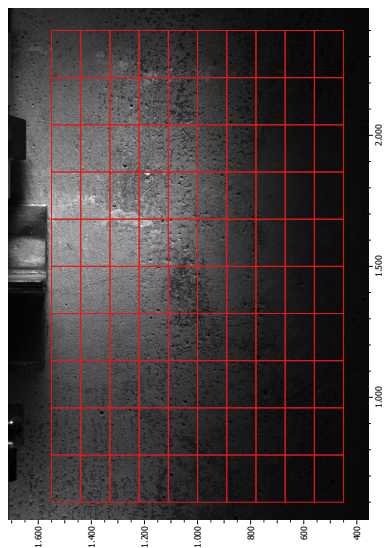
(a) $\Delta t_0 = 360$ seg.



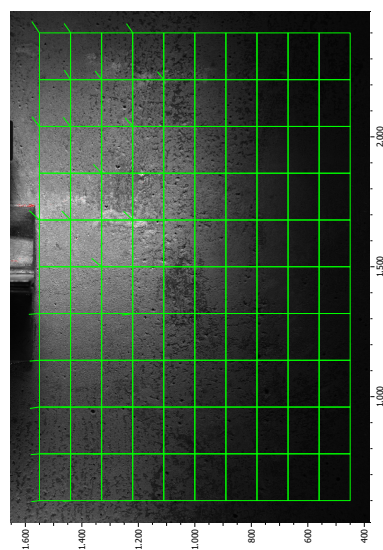
(b) $\Delta t_1 = 370$ seg.



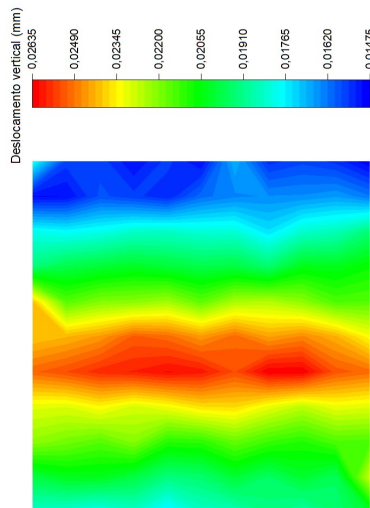
(c) Malha 10x10: Elemento Q4 Full Field.



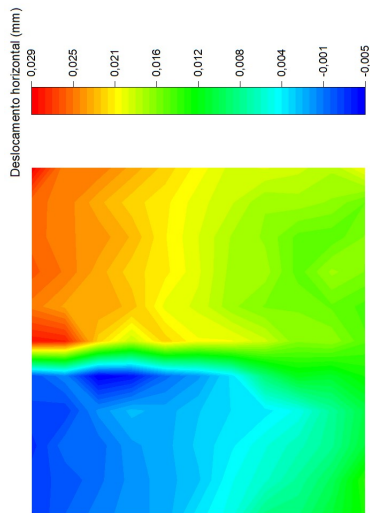
(d) Malha representando deslocamentos nodais.



(e) Mapa de cores de deslocamentos nodais U_y .



(f) Mapa de cores de deslocamentos nodais U_x .



Fonte: Autor, 2020.

Figura B.20 – Iteração 2: Viga DC V3 ($\Delta t_0 = 360$ seg e $\Delta t_1 = 380$ seg).

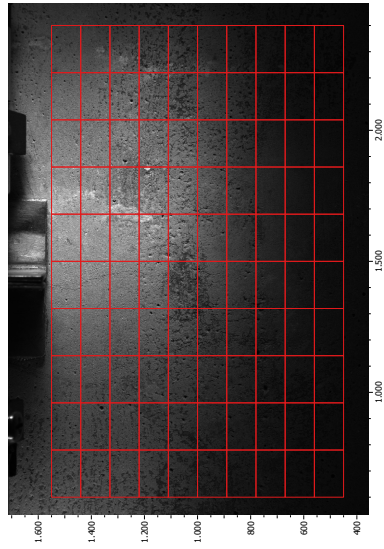
(a) $\Delta t_0 = 360$ seg.



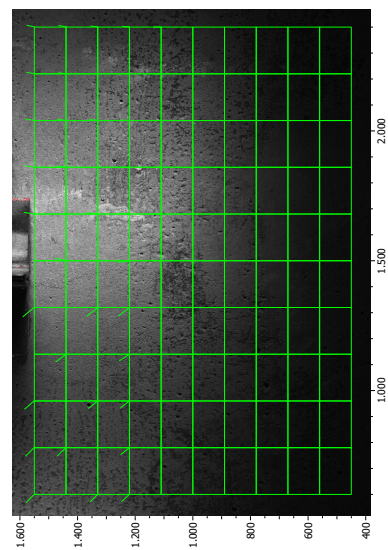
(b) $\Delta t_1 = 380$ seg.



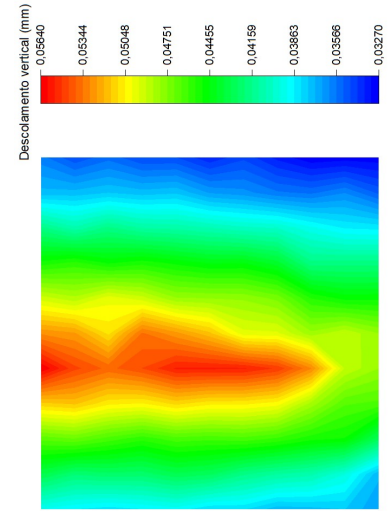
(c) Malha 10x10: Elemento Q4 Full Field.



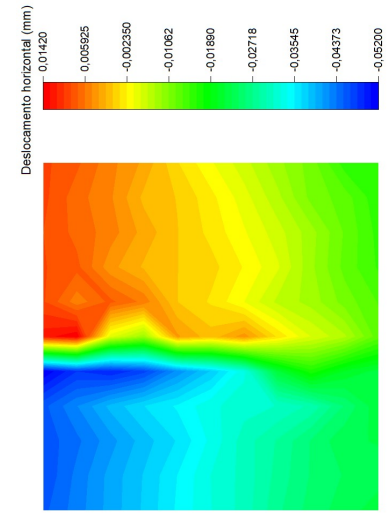
(d) Malha representando deslocamentos nodais.



(e) Mapa de cores de deslocamentos nodais U_y .



(f) Mapa de cores de deslocamentos nodais U_x .



Fonte: Autor, 2020.

Figura B.21 – Iteração 3: Viga DC V3 ($\Delta t_0 = 360$ seg e $\Delta t_1 = 390$ seg).

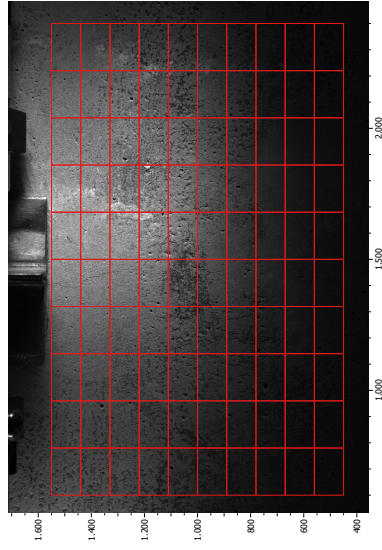
(a) $\Delta t_0 = 360$ seg.



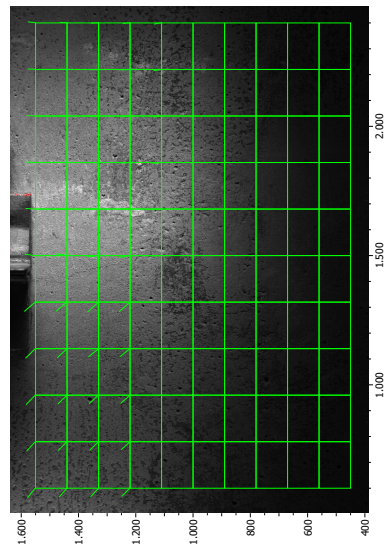
(b) $\Delta t_1 = 390$ seg.



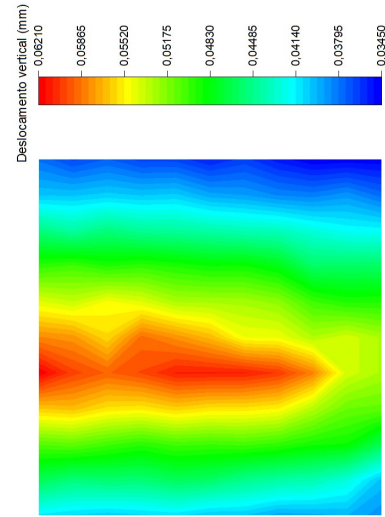
(c) Malha 10x10: Elemento Q4 Full Field.



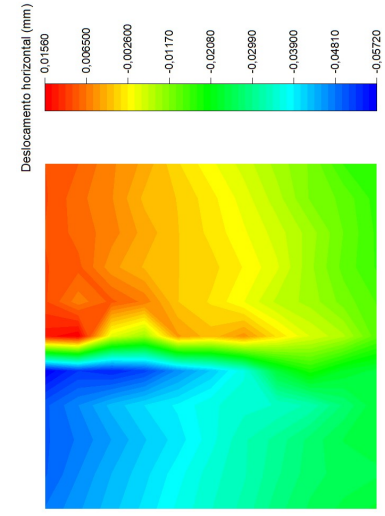
(d) Malha representando deslocamentos nodais.



(e) Mapa de cores de deslocamentos nodais U_y .



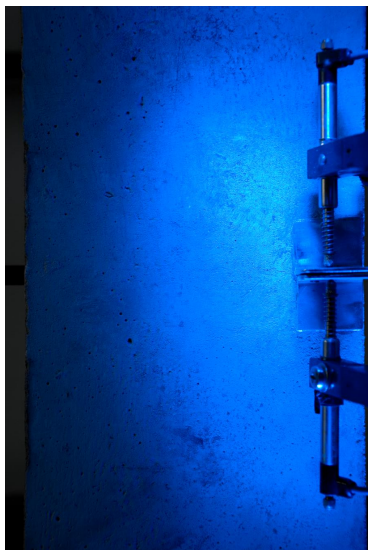
(f) Mapa de cores de deslocamentos nodais U_x .



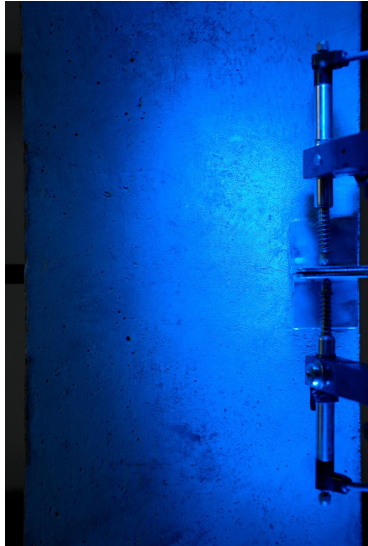
Fonte: Autor, 2020.

Figura B.22 – Iteração 1: Viga DC V4 ($\Delta t_0 = 430$ seg e $\Delta t_1 = 440$ seg).

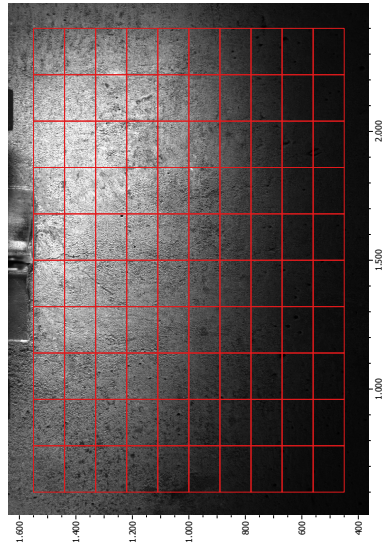
(a) $\Delta t_0 = 430$ seg.



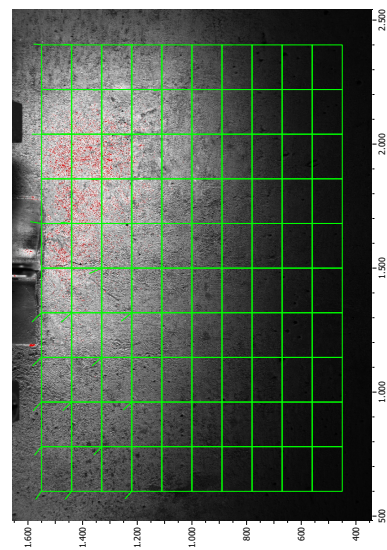
(b) $\Delta t_1 = 440$ seg.



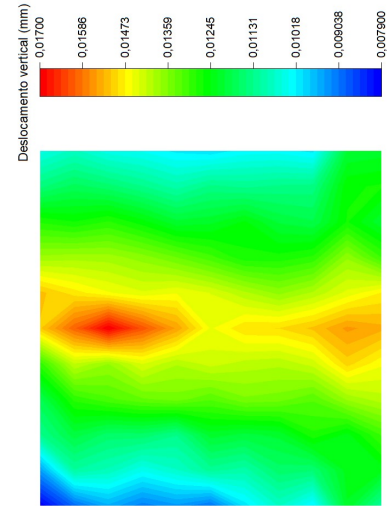
(c) Malha 10x10: Elemento Q4 Full Field.



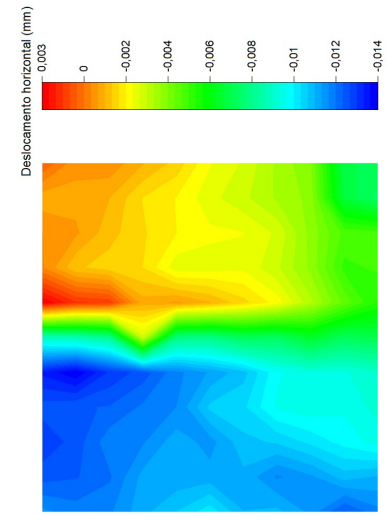
(d) Malha representando deslocamentos nodais.



(e) Mapa de cores de deslocamentos nodais U_y .



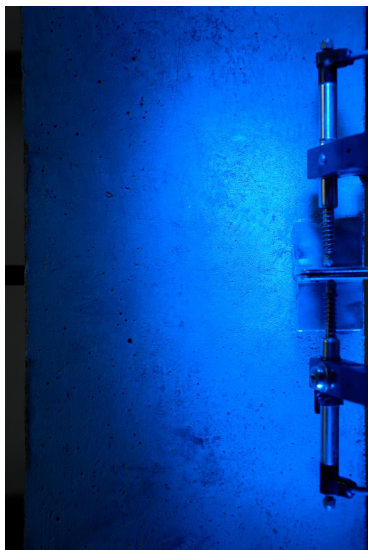
(f) Mapa de cores de deslocamentos nodais U_x .



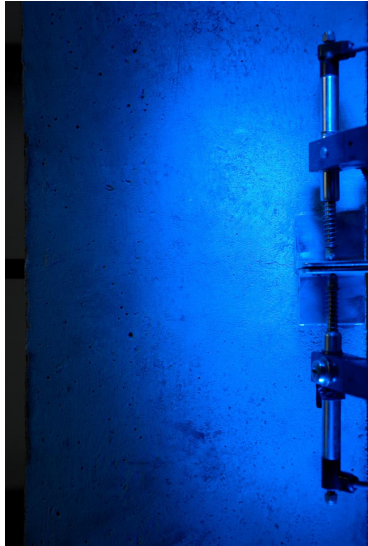
Fonte: Autor, 2020.

Figura B.23 – Iteração 2: Viga DC V4 ($\Delta t_0 = 430$ seg e $\Delta t_1 = 450$ seg).

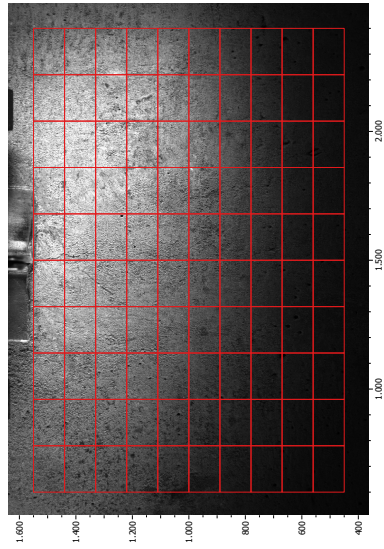
(a) $\Delta t_0 = 430$ seg.



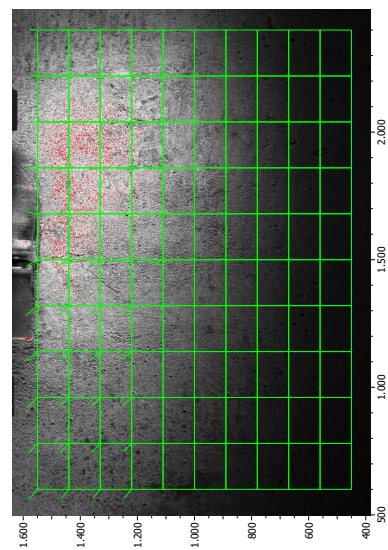
(b) $\Delta t_1 = 450$ seg.



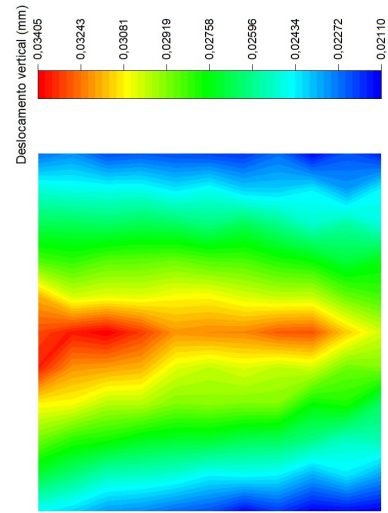
(c) Malha 10x10: Elemento Q4 Full Field.



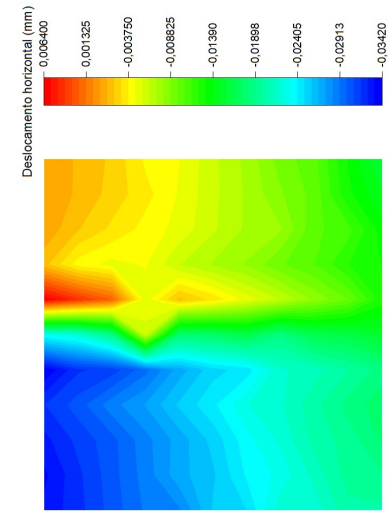
(d) Malha representando deslocamentos nodais.



(e) Mapa de cores de deslocamentos nodais U_y .



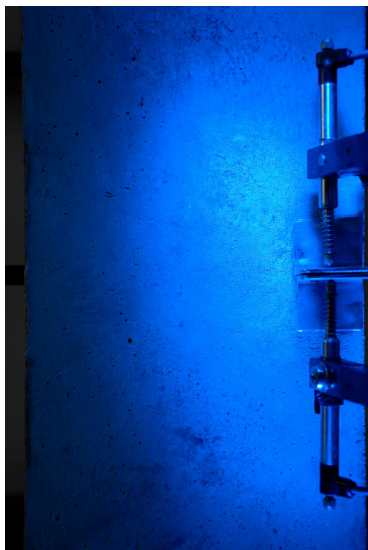
(f) Mapa de cores de deslocamentos nodais U_x .



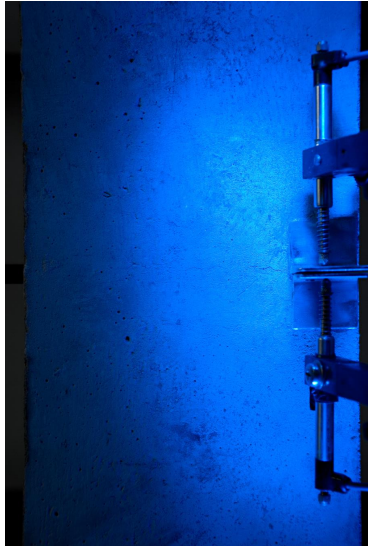
Fonte: Autor, 2020.

Figura B.24 – Iteração 3: Viga DC V4 ($\Delta t_0 = 430$ seg e $\Delta t_1 = 460$ seg).

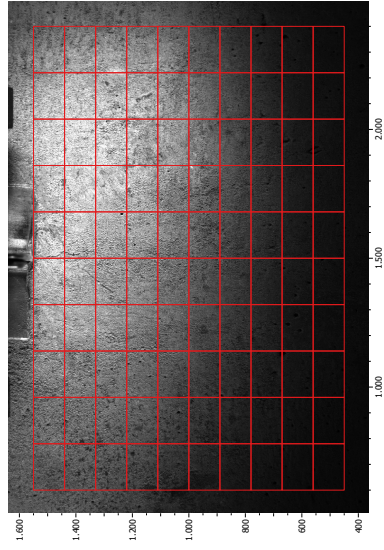
(a) $\Delta t_0 = 430$ seg.



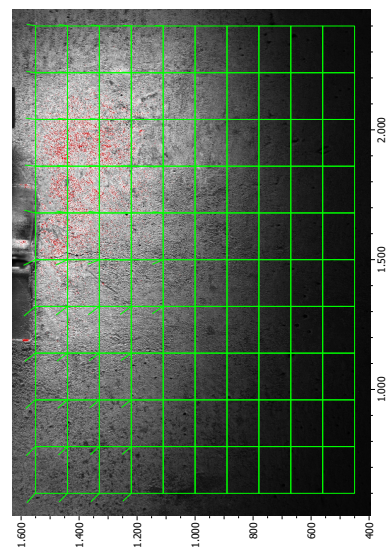
(b) $\Delta t_1 = 460$ seg.



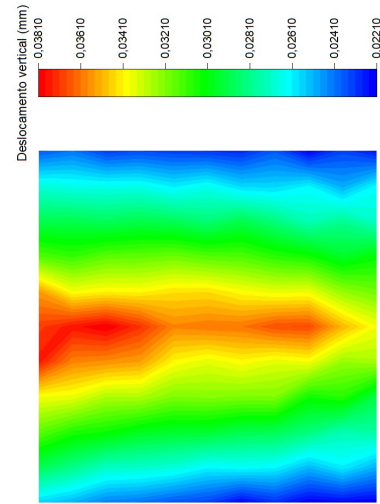
(c) Malha 10x10: Elemento Q4 Full Field.



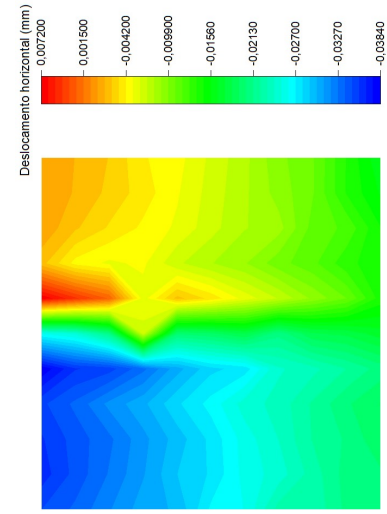
(d) Malha representando deslocamentos nodais.



(e) Mapa de cores de deslocamentos nodais U_y .



(f) Mapa de cores de deslocamentos nodais U_x .



Fonte: Autor, 2020.

Anexos

ANEXO A – MODELO TEÓRICO-ANALÍTICO PARA ESTIMATIVA DA RIGIDEZ

Neste anexo, será apresentado um modelo teórico-analítico para o cálculo da variação da rigidez à flexão de um elemento prismático, biapoiado, com carga concentrada no meio do vão, conforme configuração idealizada no ensaio de flexão por três pontos, considerando um modelo de elasticidade homogeneizado. As etapas aqui apresentadas tiveram como referências os trabalhos de Hibbeler (2010), Gere e Goodno (2011) e Carvalho (2015a).

Sabendo, do cálculo elementar, que a curvatura de uma curva plana em um ponto $Q(x, v)$ é:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\frac{d^2v}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{dv}{dx}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}} \quad (\text{A.1})$$

Em que dv/dx e d^2v/dx^2 são a primeira e a segunda derivadas da função $v(x)$ representadas por essa curva. No caso da linha elástica de uma viga, a inclinação dv/dx é muito pequena, e seu quadrado é desprezível comparado com a unidade. Logo:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d^2v}{dx^2} \quad (\text{A.2})$$

Tendo a Equação A.2, que relaciona a curvatura da superfície neutra e o momento fletor em uma viga em flexão pura, uma equação diferencial linear de segunda ordem é obtida, onde a mesma é que governa a linha elástica.

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M(x)}{EI} \quad (\text{A.3})$$

Em que:

M – Momento fletor da viga;

E – Módulo de elasticidade longitudinal;

I – Momento de inércia da área da seção transversal.

$$\frac{d^2v}{dx^2} = \frac{M(x)}{EI} \quad (\text{A.4})$$

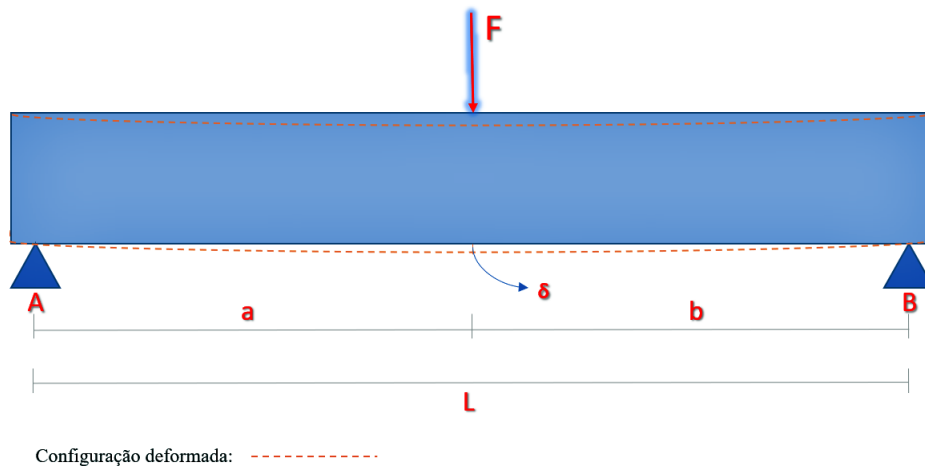
Desta forma, quando o momento fletor (M) e a rigidez à flexão (EI) são conhecidas em função de x , é possível integrar a equação acima para a obtenção da deflexão v . Caso a viga tenha altura variável, a rigidez à flexão também varia, devendo ser representada como uma função

de x antes de integrar a Equação A.3. Contudo, como a viga é prismática, a rigidez à flexão é constante.

A.1 ENSAIO DE FLEXÃO EM TRÊS PONTOS

O modelo é idealizado com base na rigidez à flexão do elemento prismático, onde as variáveis de controle ao final serão a carga concentrada atuante na viga (F), o vão total da viga ($L = a + b$) e a deflexão no ponto de atuação da carga (δ). A Figura A.1 representa a esquematização adotada para o ensaio de flexão em três pontos.

Figura A.1 – Viga biapoiada sob carregamento transversal F (ensaio de flexão em três pontos).



Fonte: Autor, 2020.

A partir das condições de equilíbrio, é possível calcular as funções que representam os momentos antes da carga e após, conforme representado na Figura A.2.

Substituindo as equações de momento (M_1 e M_2) na Expressão A.4 e multiplicando ambos os membros desta equação pela constante EI , têm-se as seguintes equações diferenciais para a curva de deflexão:

$$EI \frac{d^2v}{dx^2} = \frac{Fx}{2} \rightarrow 0 \leq x < \frac{L}{2} \quad (\text{A.5})$$

$$EI \frac{d^2v}{dx^2} = \frac{F(L-x)}{2} \rightarrow \frac{L}{2} \leq x < L \quad (\text{A.6})$$

As inclinações da viga podem ser obtidas integrando as equações acima ($dv/dx = \theta$), o que resulta em:

$$EI\theta_1(x) = \frac{Fx^2}{4} + C1 \rightarrow 0 \leq x < \frac{L}{2} \quad (\text{A.7})$$

Figura A.2 – Diagramas de corpo livre e equações de momento para situações de análise.

Diagrama de corpo livre	Trecho	Equação para momento
	$0 \leq x < \frac{L}{2}$	$M_1 = \frac{F}{2}x$
	$\frac{L}{2} \leq x < L$	$M_2 = \frac{F}{2}(L - x)$

Fonte: Autor, 2020.

$$EI\theta_2(x) = \frac{FLx}{2} - \frac{Fx^2}{4} + C3 \rightarrow \frac{L}{2} \leq x < L \quad (\text{A.8})$$

Integrando-se mais uma vez as Expressões A.7 e A.8, obtemos funções associadas às deflexões:

$$EIv_1(x) = \frac{Fx^3}{12} + C1x + C2 \rightarrow 0 \leq x < \frac{L}{2} \quad (\text{A.9})$$

$$EIv_2(x) = \frac{FLx^2}{4} - \frac{Fx^3}{12} + C3x + C4 \rightarrow \frac{L}{2} \leq x < L \quad (\text{A.10})$$

$C1$, $C2$, $C3$ e $C4$ correspondem as constantes de integração. Analisando a estrutura temos condições de contorno peculiares que nos permite identificar os valores dessas constantes de integração. Nos apoios A e B a deflexão é nula, ou seja, em $[x = 0; v_1 = 0]$ e em $[x = L; v_2 = 0]$. Além disso, o fato de não haver nenhuma variação brusca na deflexão ou na inclinação no ponto de aplicação da carga requer que $\theta_1 = \theta_2$ e $v_1 = v_2$ quando $x = L/2$. Temos, portanto:

$$[x = 0; v_1 = 0], \text{ Equação 9} \rightarrow C2 = 0.$$

$$[x = L; v_2 = 0], \text{ Equação 10} \rightarrow C3 \cdot L + C4 = -\frac{FL^3}{6}$$

$$[x = L/2; \theta_1 = \theta_2], \text{ Equações 7 e 8} \rightarrow C1 - C3 = \frac{FL^2}{8}$$

$$[x = L/2; v_1 = v_2], \text{ Equações 9 e 10} \rightarrow \frac{C1 \cdot L}{2} - \frac{C3 \cdot L}{2} - C4 = \frac{FL^3}{24}$$

Resolvendo as equações:

$$C1 = -\frac{F \cdot L^2}{16}; C2 = 0; C3 = -\frac{9F \cdot L^2}{48} \text{ e } C4 = -\frac{F \cdot L^3}{48}$$

Substituindo nas Equações A.7 e A.8, têm-se as expressões para o cálculo da rotação. Já substituindo em A.9 e A.10 têm-se as expressões de deflexão.

$$\theta_1(x) = \frac{Fx^2}{4EI} - \frac{FL^2}{16EI} \rightarrow 0 \leq x < \frac{L}{2} \quad (\text{A.11})$$

$$\theta_2(x) = \frac{FLx}{2EI} - \frac{Fx^2}{4EI} - \frac{9FL^2}{48EI} \rightarrow \frac{L}{2} \leq x < L \quad (\text{A.12})$$

$$v_1(x) = \frac{Fx^3}{12EI} - \frac{FL^2x}{16EI} \rightarrow 0 \leq x < \frac{L}{2} \quad (\text{A.13})$$

$$v_2(x) = \frac{FLx^2}{4EI} - \frac{Fx^3}{12EI} - \frac{9FL^2x}{48EI} + \frac{FL^3}{48EI} \rightarrow \frac{L}{2} \leq x < L \quad (\text{A.14})$$

Como para o ensaio de flexão em três pontos a carga está definida no centro do vão a função que representará a deflexão será obtida quando $x = L/2$. Logo:

$$v_2(L/2) = \delta, \text{ onde } \delta \text{ representa a deflexão máxima.}$$

Adotando $x = L/2$ e desenvolvendo a Expressão A.14, temos que a deflexão no ponto de aplicação da carga é:

$$\delta = \frac{FL^3}{48EI} \quad (\text{A.15})$$

Mantendo apenas a rigidez no membro esquerdo da Equação, temos:

$$EI = \frac{FL^3}{48\delta} \quad (\text{A.16})$$

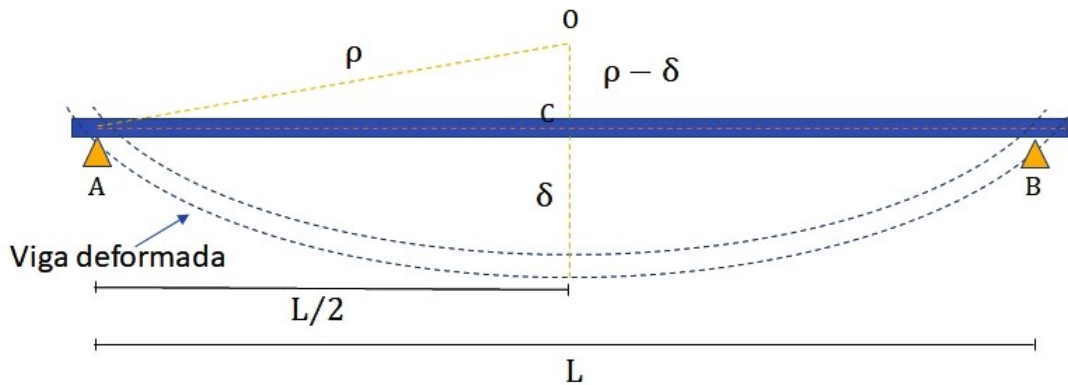
Que fornece a expressão para a estimativa de rigidez para a viga apresentada.

No entanto, Carvalho (2015) enfatiza que a Expressão A.16 não é válida para situações em que a seção transversal não é constante ao longo de todo o vão da viga, no caso por exemplo de vigas que apresentem alguma descontinuidade devido o processo de fissuração, ocorrendo assim variação das dimensões da seção. O autor explica que isso ocorre devido a significativa variação do momento de inércia ao longo do vão. Logo, nos casos de variação de momento de inércia, como por exemplo, uma viga de seção transversal não íntegra, é possível realizar uma análise da curvatura ($1/\rho$). Onde a mesma pode ser obtida geometricamente, por exemplo, a partir do ensaio de flexão realizado em tempo real. A Figura A.3 apresenta informações necessárias para a formulação que será apresentada.

Partindo do triângulo OAC , temos:

$$\sin(\hat{A}) = \frac{\rho - \delta}{\rho} \quad (\text{A.17})$$

Figura A.3 – Ilustração de viga fletida com variáveis para obtenção da estimativa da curvatura.



Fonte: Adaptado de Carvalho, 2015.

$$\cos(\hat{A}) = \frac{L}{2\delta} \quad (\text{A.18})$$

Da relação fundamental da geometria analítica, temos:

$$\sin(\hat{A})^2 + \cos(\hat{A})^2 = 1 \rightarrow \left(\frac{\rho - \delta}{\rho}\right)^2 + \left(\frac{L}{2\delta}\right)^2 = 1 \quad (\text{A.19})$$

Fornecendo assim uma expressão para o raio de curvatura (ρ):

$$\rho = \frac{\frac{L^2}{4} + \delta^2}{2\delta} \quad (\text{A.20})$$

Logo, a seguinte equação permitirá uma estimativa da curvatura para esta situação:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{2\delta}{\frac{L^2}{4} + \delta^2} \quad (\text{A.21})$$

Em que:

δ = Valores experimentais obtidos para a deflexão.

L = Vão total da viga (Valor fixo e mensurado previamente).

$1/\rho$ = Curvatura para a viga ensaiada.

Aplicando-se a equação diferencial da curvatura podemos obter uma Equação para estimativa da rigidez para situações em que ocorra variação significativa do momento de inércia:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d^2v}{dx^2} = \frac{M}{EI} \quad (\text{A.22})$$

O que fornece:

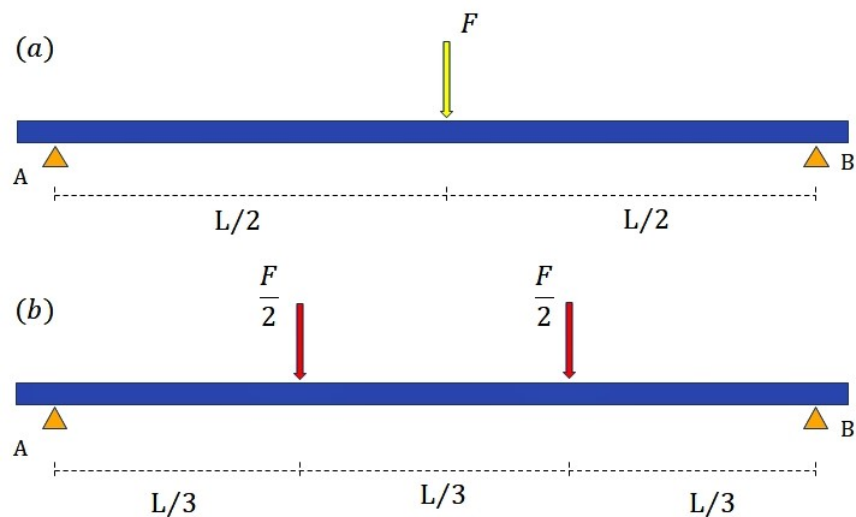
$$\frac{M}{EI} = \frac{2\delta}{\frac{L^2}{4} + \delta^2} \quad (\text{A.23})$$

Isolando EI , temos:

$$EI = M \cdot \frac{\frac{L^2}{4} + \delta^2}{2\delta} \quad (\text{A.24})$$

É importante ressaltar que o termo M que corresponde ao Momento fletor pode variar em função do ensaio de flexão utilizado (3 ou 4 pontos). A Figura A.4 representa os esforços atuantes nos espécimes durante execução dos ensaios de flexão por três e quatro pontos, respectivamente.

Figura A.4 – Carregamentos impostos aos espécimes durante o ensaio de flexão: (a) três pontos e (b) quatro pontos.



Fonte: Autor, 2020.

Onde M (momento atuante no centro do vão) corresponderá:

$$M = \frac{F \cdot L}{4} \rightarrow 3 \text{ pontos e } M = \frac{F \cdot L}{6} \rightarrow 4 \text{ pontos.}$$