



## Avaliação de Deformações em Vigas de Concreto Armado Utilizando Correlação Digital de Imagens (DIC)

Tobias Pigatto Ottoni<sup>1</sup>, Luiz Henrique Barboza Tirado<sup>2</sup>, Américo Campos Filho<sup>3</sup>, Paula Manica Lazzari<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Sul – PPGEC - [engenhariaottoni@gmail.com](mailto:engenhariaottoni@gmail.com)

<sup>2</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Sul – PPGEC - [hbtluiz94@gmail.com](mailto:hbtluiz94@gmail.com)

<sup>3</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Sul – PPGEC – [americo.campos.filho@gmail.com](mailto:americo.campos.filho@gmail.com)

<sup>4</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Sul – PPGEC - [p.manica.lazzari@gmail.com](mailto:p.manica.lazzari@gmail.com)

### Resumo

Este trabalho tem como foco a aplicação da DIC 2D na medição de deformações e abertura de fissuras em vigas de concreto armado. As técnicas convencionais de medição de deformação envolvem dispositivos como *strain gauges* e LVDTs. Embora os pacotes DIC comerciais estejam disponíveis e tenham sido amplamente utilizados para realizar DIC, essas configurações são bastante onerosas. Neste estudo, uma câmera DSLR simples junto com o *software Gom Correlate*, um programa versátil, foi usada para realizar a DIC. Os resultados também foram obtidos experimentalmente usando dispositivos de medição convencionais e comparados com os da DIC. Os resultados obtidos através do DIC estão de acordo com os resultados obtidos através dos LVDTs e a diferença na deformação observada na ruptura foi menor que 10%. Além disso, os resultados deste estudo devem encorajar os pesquisadores a adotarem esta técnica em estudos de comportamento e monitoramento do comportamento estrutural de diferentes estruturas.

### Palavras-chave

DIC; Padrão de Manchas; *Gom Correlate*; Vigas.

### Introdução

A medição de deslocamentos e deformações na superfície do concreto são fatores fundamentais para a compreensão dos mecanismos de resistência à ruptura da estrutura e dos modos de falha através da formação de fissuras. O uso de técnicas convencionais para medições como, por exemplo, sensores do tipo transformadores diferenciais variáveis lineares (LVDTs) e sensores de deformação, como os *strain gauges* (SGs) apresentam desafios na coleta completa de dados devido aos dados pontuais discretos limitados que podem ser coletados em um único teste, além de seu alto custo.

Alternativamente, a técnica de correlação de imagem digital (DIC), classificada como uma técnica ótica sem contato, pode determinar o deslocamento de superfície completo por pós-processamento de imagens digitais em que a superfície de interesse fotografada é coberta com padrões de manchas artificiais e então realiza-se a comparação antes e depois da deformação (PETERS; RANSON, 1982; GENCTURK *et al.*, 2014). A precisão das medições DIC depende essencialmente do padrão de manchas, qualidade de imagem e dos parâmetros de entrada para processamento de dados (CHEN, Z. *et al.*, 2018; LECOMPTE *et al.*, 2006).

Zanuy, Ulzurrun e Díaz (2019) ao estudarem o comportamento interfacial de vigas de concreto armado reforçadas com concreto de ultra alto desempenho reforçado com fibras (CUADRF), avaliaram o comportamento dos diferentes estágios da curva carga x deflexão através da análise da evolução do padrão de fissuras e dos deslocamentos relativos entre o concreto convencional e o CUADRF com auxílio da DIC. Os autores concluíram que a DIC é uma técnica confiável que possibilitou acompanhar o deslocamento horizontal e vertical entre as interfaces, bem como a formação e a evolução das fissuras.

Nesse contexto, o objetivo principal do presente trabalho é apresentar um estudo experimental sobre o desempenho de duas metodologias de ancoragem de polímeros reforçados com fibras (PRF) em

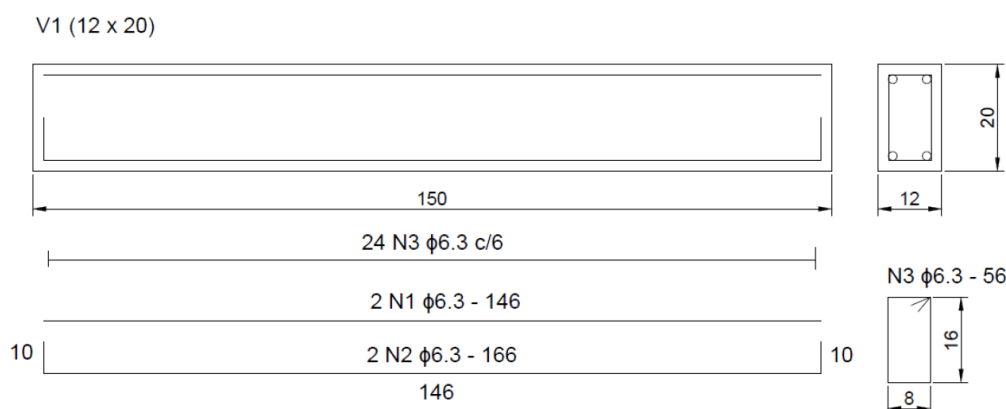


vigas de concreto armado. No estudo experimental, para avaliação da flecha nas vigas, foram utilizados LVDTs e o método DIC 2D. Além disso, visualizaram-se o desencadeamento do processo de ruptura e a formação de fissuras por meio da técnica DIC.

## Metodologia

Avaliou-se, de forma experimental, o comportamento e desempenho de duas diferentes metodologias de incremento de ancoragem de mantas de Polímeros Reforçados com Fibras em vigas de concreto armado reforçadas à flexão, utilizando a técnica de reforço “*Externally Bonded Reinforcement*” (EBR). Para as vigas de concreto armado avaliadas, adotou-se resistência característica à compressão ( $f_{ck}$ ) de 25 MPa. As vigas possuíam dimensões de 1,50 m x 0,12 m x 0,20 m, de comprimento, base e altura respectivamente. As vigas foram moldadas por uma empresa de pré-moldados, onde acompanhou-se a execução dos elementos, possibilitando controle de qualidade do processo.

O dimensionamento das vigas de concreto armado foi definido de forma a reduzir a armadura longitudinal, subdimensionando a armadura de flexão justificando a necessidade de reforço por PRF. Além disso, superdimensionaram-se os estribos, de forma a evitar ruptura do elemento por esforço cortante, podendo avaliar com mais clareza o comportamento da ancoragem do sistema de PRF. As armaduras longitudinais e transversais utilizadas foram de diâmetro 6,3 mm. Para a confecção da armadura adotada, utilizou-se o modelo de distribuição proposto por Giese (2019), apresentado na Figura 1.



**Figura 1 - Detalhamento das vigas de concreto armado utilizadas no programa experimental de Tirado (2022).**

Para o incremento da ancoragem da manta de fibra de carbono de PRF, aplicou-se a resina epóxi bi componente conforme as recomendações do fabricante para, por fim, realizar a colagem da manta de fibra de carbono. A Tabela 1 apresenta as vigas testadas, bem como o nome das metodologias de colagem da manta de fibra de carbono denominadas EBROG e EBRIG, as quais são descritas e ilustradas no estudo desenvolvido por Tirado (2022).

**Tabela 1 – Nomenclatura e metodologia de ancoragem das vigas avaliadas através da DIC**

Grupo de viga	Identificação	Tipo de ancoragem (reta + incremento)
Metodologia A	VA1; VA2	EBROG
Metodologia B	VB1; VB2	EBRIG

Para a tomada de medidas de deslocamento das amostras, foram utilizados dois LVDTs da marca HBM, com curso  $\pm 25,00$  mm e precisão de 0,01 mm, posicionados no centro do vão livre, em cada um dos lados da viga.



De forma geral, a implementação da metodologia 2D DIC compreende três etapas consecutivas, a saber (1) escolha, definição e preparação da amostra experimental; (2) gravação de imagens da superfície plana antes e após o carregamento; (3) processamento das imagens através de um *software* computacional para obter as informações de deslocamento e deformação desejadas.

Os ensaios foram realizados numa prensa hidráulica da marca Shimadzu, com capacidade de carga de 2000 kN, definindo-se uma velocidade de carregamento de 1,0 mm/min. A aquisição de dados dos ensaios foi realizada pelo programa *Catman Easy*, a partir do equipamento QuantumX MX840B, da marca HBM. A frequência de aquisição dos dados foi de 5 Hz.

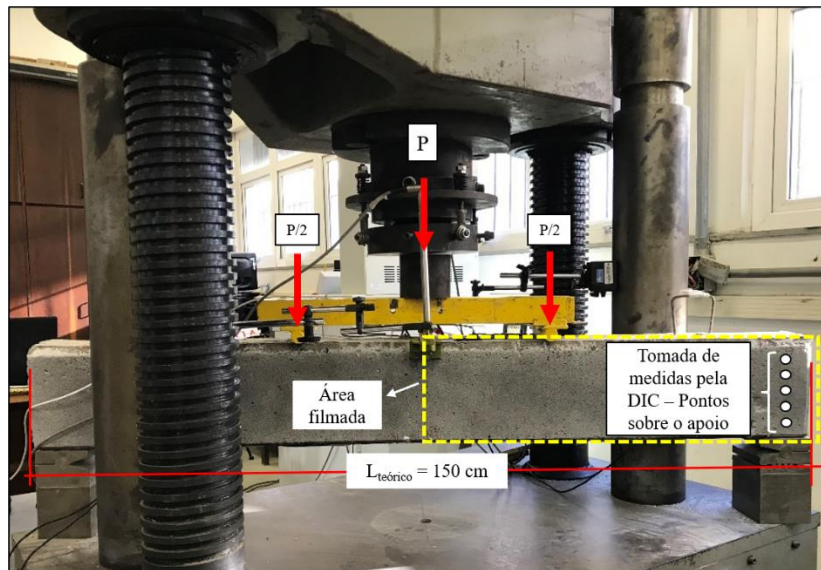
A Figura 2 apresenta o layout de captura das imagens, em ambiente experimental, para o ensaio de flexão a quatro pontos. Em cada face da viga, é utilizado uma câmera DSLR para realizar a captura das imagens. Os resultados obtidos pela DIC foram comparados com os resultados obtidos através dos LVDTs.



**Figura 2 - Layout de captura das imagens para o ensaio de flexão a quatro pontos**

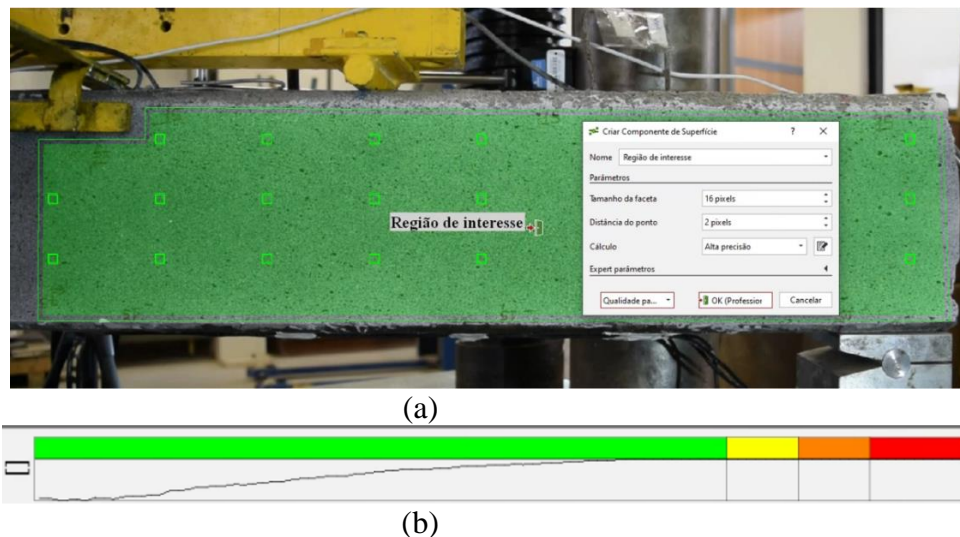
Os resultados são apresentados em termos de carga (kN) x deflexão (mm). Apresentam-se os resultados de deflexão, por meio do LVDT1 e LVDT2 separadamente. Em cada gráfico, sobrepõe-se a curva obtida através da metodologia DIC, a qual foi obtida através da utilização de pontos posicionados sobre o apoio da viga, uma vez que neste local está indicada a flecha máxima, de acordo com o modo como ocorre o carregamento e deslocamento do pistão da prensa. Ainda, a região filmada constitui-se em metade da face visível da viga, uma vez que o máximo deslocamento está situado sobre o eixo dos apoios, nos extremos da amostra.

A Figura 3 ilustra o modelo de obtenção dos deslocamentos através da inspeção por pontos posicionados sobre o eixo do apoio. O deslocamento vertical, o qual fornecerá a flecha da viga, é obtido através da média de 5 pontos localizados sobre a mesma posição x, variando a cota y ao longo da altura da viga. A partir destes pontos, calcula-se o deslocamento vertical ( $d_y$ ) e através da sua média encontra-se a deflexão máxima.



**Figura 3 - Obtenção de deslocamentos nas vigas através da inspeção por pontos**

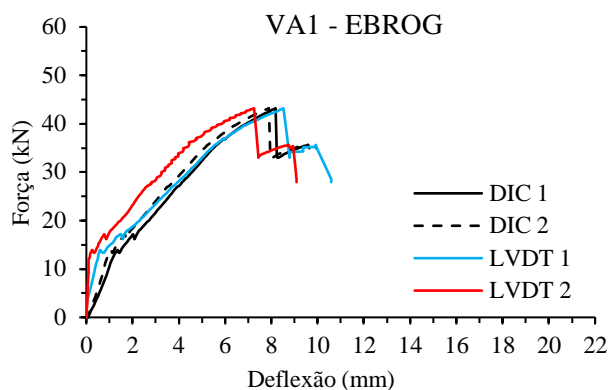
A partir da área filmada, delimitada pela linha tracejada na cor amarela, apresentada na Figura 3, delimita-se a região de interesse e verifica-se a qualidade da pintura aplicada para avaliação através da DIC. A Figura 4 apresenta este processo de delimitação utilizado nas vigas testadas, o qual corresponde à aproximadamente metade da seção da viga, ou seja, do meio da seção até a extremidade. A qualidade da pintura realizada é verificada pelo histograma fornecido pelo *software Gom Correlate*. A cor verde indica padrão de pintura de boa qualidade.



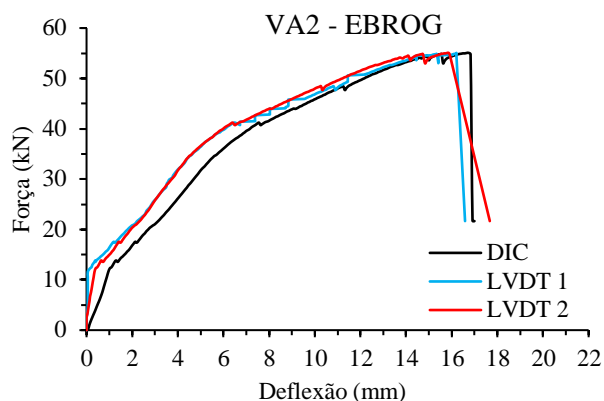
**Figura 4 - Criação da região de interesse em vigas (a) Delimitação da região; (b) Verificação da qualidade de pintura aplicada.**

## Resultados e discussões

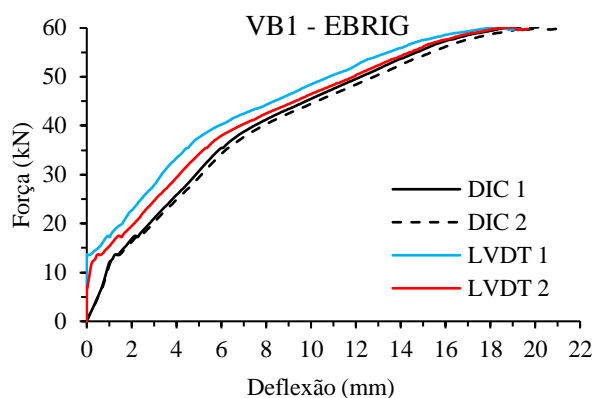
Os resultados de flecha (deflexão máxima) medidos nas vigas são apresentados nas Figuras 5 a 8. Apresentam-se os resultados da DIC para ambos os lados da viga, representados por DIC 1 e DIC 2, significando que são os resultados coletados por duas câmeras em lados opostos, conforme layout experimental apresentado na Figura 2. A viga VA02 teve somente um dos lados filmados.



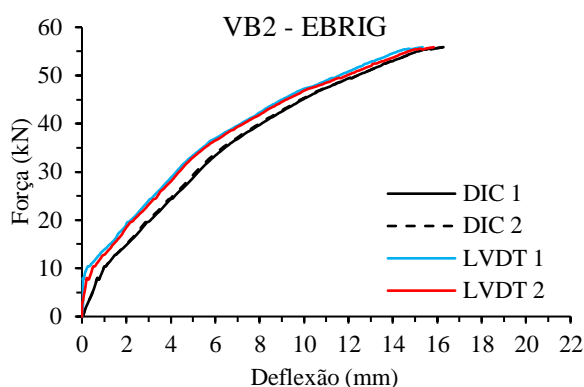
**Figura 5 - Comparativo da deflexão máxima medida através dos LVDTs e metodologia DIC – VA1**



**Figura 6 - Comparativo da deflexão máxima medida através dos LVDTs e metodologia DIC – VA2**



**Figura 7 - Comparativo da deflexão máxima medida através dos LVDTs e metodologia DIC – VB1**



**Figura 8 - Comparativo da deflexão máxima medida através dos LVDTs e metodologia DIC – VB2**

Pequenas diferenças observadas no comportamento das curvas decorrem dos procedimentos de instrumentação das metodologias utilizadas, que foram atenuados com o esmero da preparação e dos cuidados tomados durante o ensaio.

A Tabela 2 apresenta os resultados comparativos de deflexão medidos por ambas as metodologias no instante da carga máxima.

**Tabela 2 – Deflexão máxima medida pela DIC e LVDTs das vigas testadas.**

Amostras	Carga na máxima deflexão medida (KN)	Máxima deflexão medida (mm)				Diferença comparativa à média dos LVDTs (%)
		DIC - Lado A	DIC - Lado B	Extensômetros		
				LVDT 1	LVDT 2	
VA1	43,16	8,18	7,89	8,52	7,25	3,60
VA2	55,07	16,74	*	16,21	15,86	4,21
VB1	60,14	19,20	20,14	18,52	18,97	6,92
VB2	55,88	16,23	16,27	15,34	15,84	3,94

\* Amostra sem leitura pela DIC no lado B.

Para algumas vigas, a máxima deflexão medida não se encontra na carga de ruptura, pois a DIC pode ter perdido sua referência inicial algum instante antes. Para estes casos, a medida tomada é de alguns

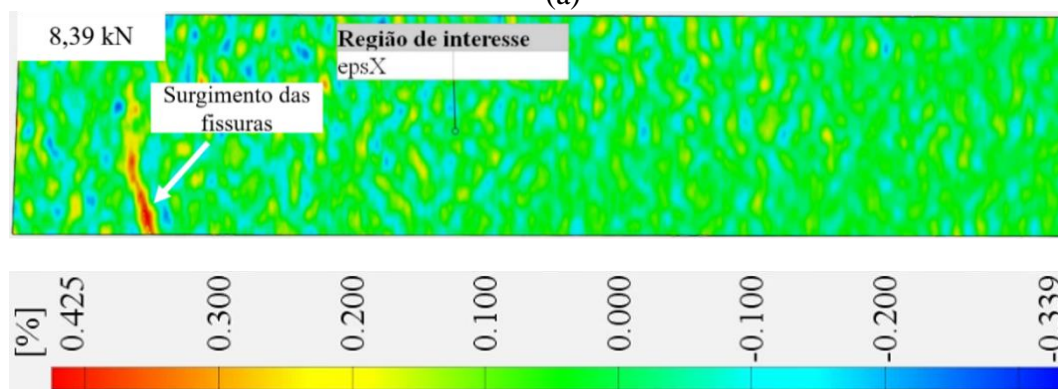
segundos antes da máxima carga atuante. Para todas as amostras, a diferença obtida através da DIC comparativamente à média medida pelos LVDTs, foi de menos de 10%, demonstrando a alta correlação entre as metodologias utilizadas.

Ainda, com o intuito de contribuir para o entendimento do processo de ruptura das vigas, apresenta-se a forma de propagação das fissuras de uma viga, de forma a exemplificar o comportamento e o avanço do processo de ruptura da mesma, obtido através do campo de deformações (*heatmap*) na superfície das vigas através do *software Gom Correlate*, com escala de representação na legenda de 6 sigmas, ou seja, nível de representação com 99,99%.

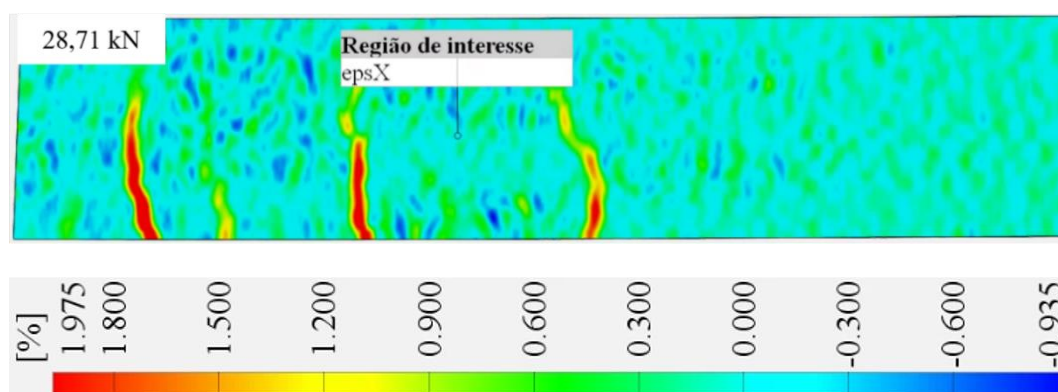
Os lados da viga são denominados face A (lado esquerdo) e face B (lado direito), e cada um dos lados teve metade da seção filmada, uma vez que há pistões da prensa que impossibilitam a captura da seção inteira em ambos os lados. As vigas apresentadas na sequência tiveram captura de imagem realizadas pela face A. A Figura 9 apresenta o desencadeamento do processo de ruptura para a viga VA2, que possui reforço com a metodologia de ancoragem denominada Spike. Observa-se que, com menos de 15% da carga de ruptura, a viga já apresentava as primeiras fissuras.



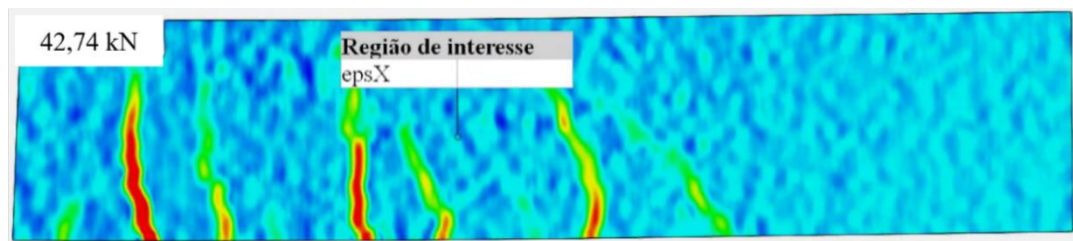
(a)



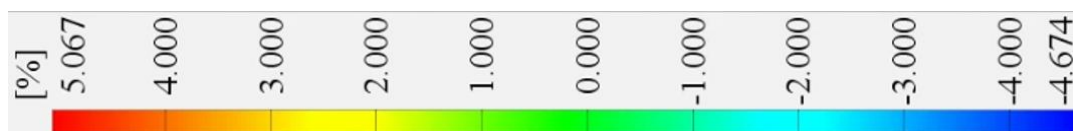
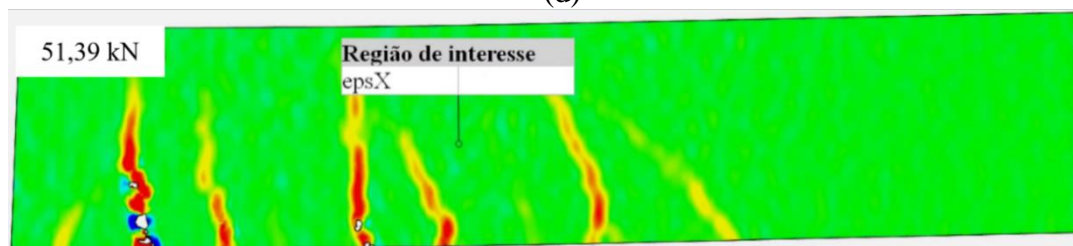
(b)



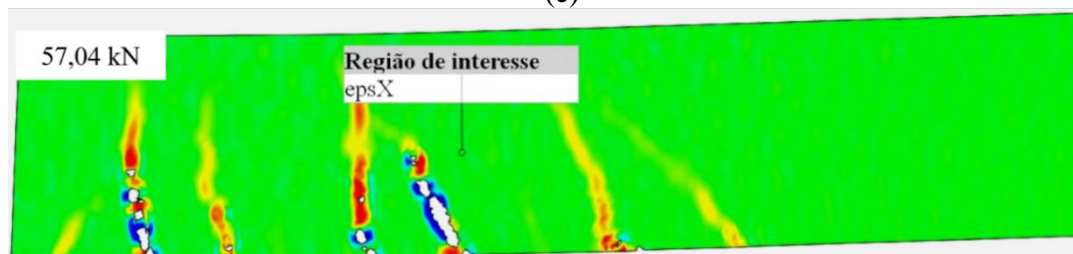
(c)



(d)



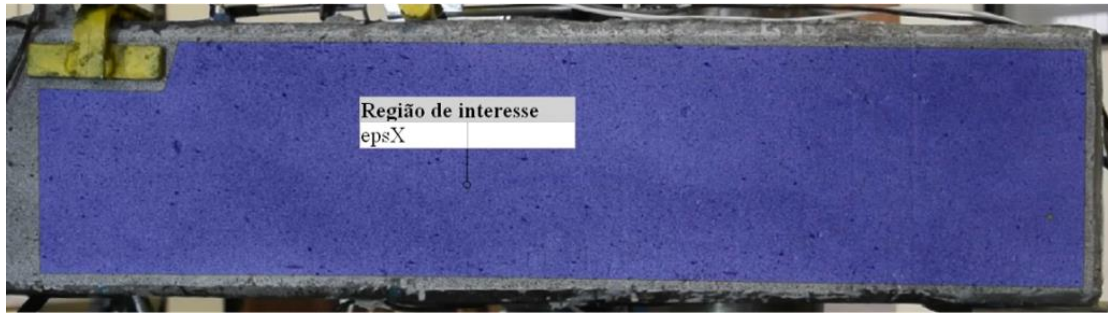
(e)



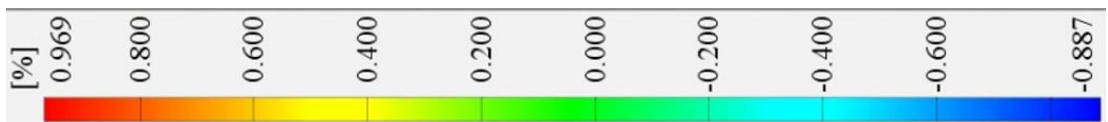
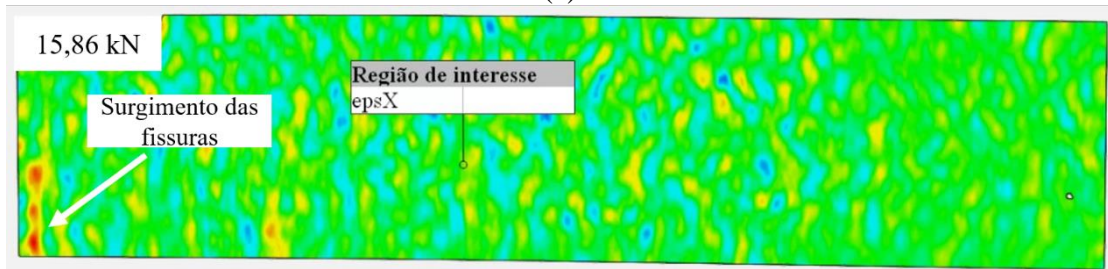
(f)

**Figura 9 – Propagação de fissuras nas vigas submetidas à flexão – VA2 (a) Delimitação da região de interesse analisada; (b) Nível da carga = 15%  $f_u$ ; (c) Nível da carga = 50%  $f_u$ ; (d) Nível da carga = 75%  $f_u$ ; (e) Nível da carga = 90%  $f_u$ ; (f) Nível da carga = 100%  $f_u$ . (Escala de cores denota intensidade de deformação horizontal - epsX)**

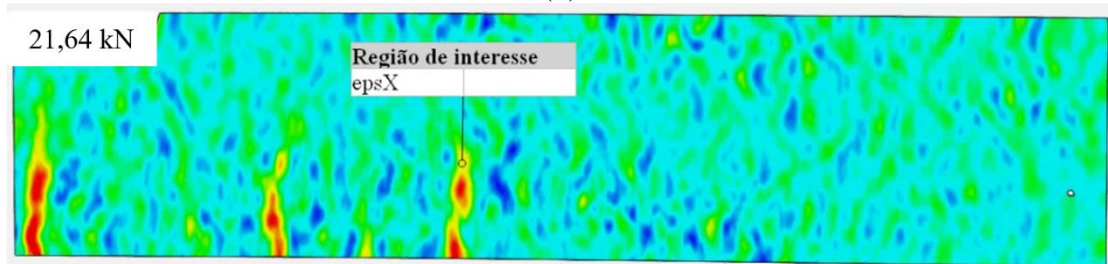
A Figura 10 apresenta o desencadeamento do processo de ruptura para a viga VB01, que possui reforço com a metodologia de ancoragem denominado EBROG.



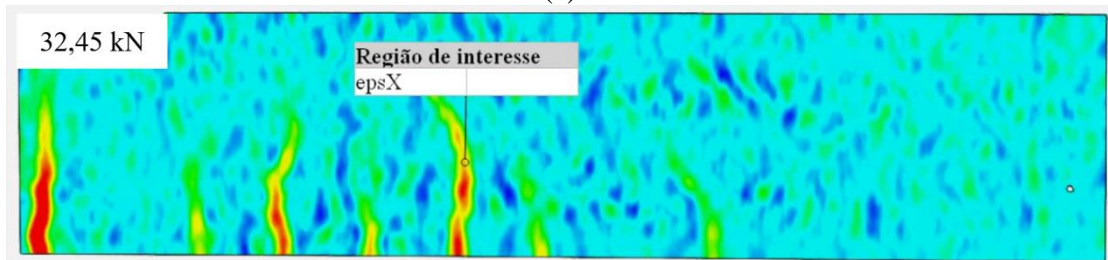
(a)



(b)

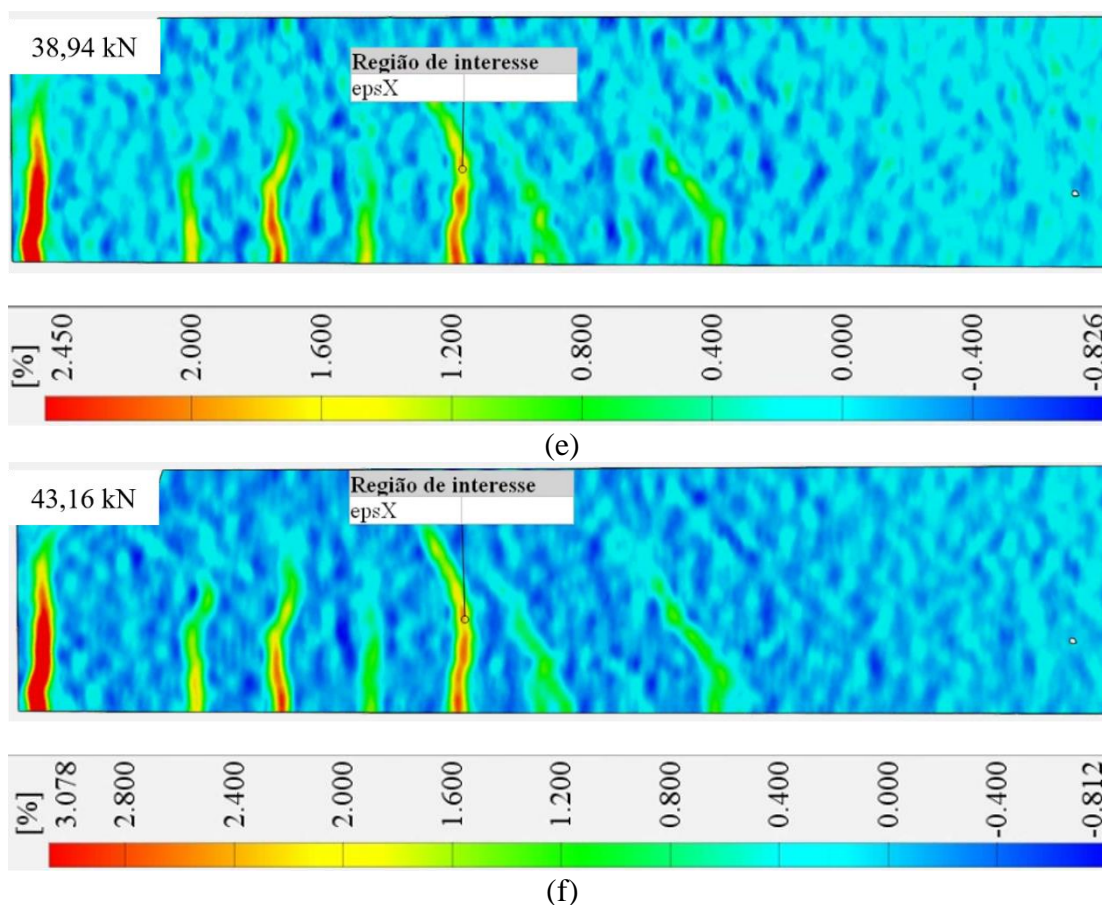


(c)



(d)





**Figura 10 – Propagação de fissuras nas vigas submetidas à flexão – VB01 (a) Delimitação da região de interesse analisada; (b) Nível da carga = 33%  $f_u$ ; (c) Nível da carga = 50%  $f_u$ ; (d) Nível da carga = 75%  $f_u$ ; (e) Nível da carga = 90%  $f_u$ ; (f) Nível da carga = 100%  $f_u$ . (Escala de cores denota intensidade de deformação horizontal - epsX)**

É possível visualizar a propagação das fissuras em todo campo de deformações, visualizando o comportamento desde o surgimento da primeira fissura até o instante da ruptura. Esse acompanhamento permite entender o comportamento do material com o aumento da carga até o instante que ocorre a ruptura. Outros autores, como Abeer, Dawood e Ghalib (2020) e Zanuy, Ulzurrun e Díaz (2019), também concluíram que a DIC permite uma análise mais detalhada do processo de ruptura de vigas.

## Conclusões

A Correlação de Imagem Digital 2D (DIC) oferece várias vantagens na medição de deslocamento e abertura de fissuras, quando comparada à técnica de medição convencional com sensores LVDT. A grande vantagem desse método é a capacidade de monitorar cada fissura separadamente, não importa onde ela se abra. Além disso, permite o monitoramento de fissuras mesmo em deslocamentos muito grandes, quando os sensores LVDT geralmente se desprendem da amostra. A maior vantagem da DIC é o custo do equipamento, pois requer apenas uma câmera digital, computador pessoal e versão gratuita de um programa de processamento de imagens. A medição convencional com sensores LVDT é muito mais cara devido ao preço dos sensores e do sistema de aquisição de dados.

A técnica de correlação de imagem digital mostrou-se confiável na determinação dos campos de deslocamentos e deformações em vigas de concreto. Com ela, tornou-se possível o acesso a



informações dos campos de deformações em toda estrutura. Observou-se que, de forma geral, as múltiplas fissuras das vigas foram claramente observadas em níveis de deformação muito baixos. O principal objetivo deste estudo foi avaliar a precisão dos resultados de DIC 2D em comparação com os resultados obtidos por sensores LVDTs. A análise dos resultados mostra que o método DIC difere menos que 10% dos resultados apresentados pelos sensores LVDTs. Além disso, a DIC permite controlar o surgimento de fissuras e prever o local de ruptura da viga com cargas menores que 30% da carga máxima atuante. No estudo das propriedades de um material dito anisotrópico, a metodologia DIC torna-se uma alternativa mais vantajosa, uma vez que analisa globalmente a deformação na superfície da amostra, sem necessidade de contato e com os procedimentos mais acessíveis.

## Referências

- ABEER, S. Z.; DAWOOD, M. B.; GHALIB, M. H. Using 2D digital image correlation to investigate the flexural behavior of continuous composite beams. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. v. 888, n. 1, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/888/1/012046>
- CHEN, Z.; SHAO, X.; XU, X.; HE, X. Optimized digital speckle patterns for digital image correlation by consideration of both accuracy and efficiency. *Applied Optics*. v. 57, n. 4, p. 884, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1364/ao.57.000884>
- LECOMPTE, D.; SMITS, A.; BOSSUYT, S.; SOL, H.; VANTOMME, J.; VAN HEMELRIJCK, D.; HABRAKEN, A.M. Quality assessment of speckle patterns for digital image correlation. *Optics and Lasers in Engineering*. v. 44, n. 11, p. 1132–1145, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2005.10.004>
- GENCTURK, B.; HOSSAIN, K.; KAPADIA, A.; LABIB, E.; MO, Y-L. Use of digital image correlation technique in full-scale testing of prestressed concrete structures. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, v. 47, n. 1, p. 505–515, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.09.018>
- GIESE, A. C. H. Utilização de argamassa reforçada com têxtil de fibra de vidro álcali resistente para reforço à flexão de vigas de concreto armado. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 190. 2019.
- PETERS, W.H.; RANSON, W.F. "Digital Imaging Techniques In Experimental Stress Analysis, *Optical Engineering* 21(3), 213427 (1 June 1982).
- TIRADO, L. H. B. Estudo da ancoragem de polímeros reforçados com fibras (PRF) em vigas de concreto armado submetidos à esforços de flexão. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Estrutural) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre.
- ZANUY, C.; ULZURRUN, G. S.D.; DÍAZ, I. M. Analysis of interfacial interaction in UHPFRC-strengthened reinforced concrete beams. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. v. 596, n. 1, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/596/1/012024>