https://doi.org/10.4322/CBPAT.2022.023

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE PILARES DE CONCRETO DE ULTRA ALTO DESEMPENHO REFORÇADO COM FIBRAS ATRAVÉS DO DIC

Tobias Pigatto Ottoni[1]*, Adriano Rodrigues da Silva[1]; Américo Campos Filho[1]; Paula Manica Lazzari[1] e Andrew Martini[2]
Autor de contato: engenhariaottoni@gmail.com

[1] Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil
[2] Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo principal analisar a resposta carga-deformação específica de pilares produzidos com concreto de ultra alto desempenho reforçado com fibras metálicas (CUADRF). Os pilares, ensaiados em laboratório, apresentavam seção de 10 cm x 10 cm e 80 cm de comprimento e foram submetidos à compressão centrada. As deformações foram avaliadas através de LVDTs (transdutor de deslocamento variável linear) e através da metodologia DIC (Digital Image Correlation). Foram produzidos pilares com duas taxas de adição de fibras metálicas, 1,5% e 3%, devidamente armados longitudinalmente e transversalmente. Os resultados obtidos através das duas metodologias foram equivalentes, demonstrando a viabilidade do uso da metodologia DIC para avaliação do processo de ruptura de pilares submetidos à compressão axial. Além disso, observou-se que o grau de confinamento e a resposta da estrutura aos esforços foram similares para ambas as porcentagens de fibras testadas.

Palavras-chave: Correlação digital de imagem; Capacidade de deformação plástica; Curva tensão-deformação; Ruptura dúctil

ABSTRACT

The main objective of this work is to analyze the specific load-strain response of columns produced with ultra-high-performance concrete reinforced with metallic fibers (CUADRF). The pillars, tested in the laboratory, had a section of 10 cm x 10 cm and 80 cm in length and were submitted to centered compression. Deformations were evaluated through LVDTs (Linear Variable Displacement Transducer) and through DIC (Digital Image Correlation) methodology. Columns were produced with two rates of addition of metallic fibers, 1.5% and 3%, properly reinforced longitudinally and transversally. The results obtained through the two methodologies were equivalent, demonstrating the feasibility of using the DIC methodology to evaluate the failure process of columns submitted to axial compression. Furthermore, it was observed that the degree of confinement and the response of the structure to the efforts were similar for both percentages of fibers tested.

Keywords: Digital image correlation; Plastic deformation capacity; Stress-strain curve; Ductile rupture.

1. INTRODUÇÃO

Conhecer os deslocamentos e deformações de elementos de concreto, quando submetidos a diferentes solicitações, é de fundamental importância para o entendimento de seu comportamento. Estes resultados permitem analisar a distribuição de fissuras e os modos de falha do elemento. No entanto, obter tais dados pode se tornar um desafio devido a algumas limitações dos métodos comumente empregados, com a utilização de LVDTs e extensômetros elétricos, nos quais a sua complexidade e alta sensibilidade podem, por vezes, dificultar esse processo. Desta forma, a correlação digital de imagem (DIC) surge como uma possibilidade para contornar essas restrições. Como um método que trabalha sem contato, essa técnica utiliza da comparação de imagens entre o estado inicial e o estado final (deformado), onde são analisados os deslocamentos sofridos pelos pontos aplicados na superfície de interesse.

A metodologia DIC tem apresentado grandes perspectivas para o acompanhamento e evolução da abertura de fissuras no concreto, sendo possível monitorar de forma contínua o aumento de sua largura, principalmente na fase inicial, onde ainda não é possível vê-las a olho nu, penetração de tinta ou microscópio (Mccormick; Lord, 2012). Outra vantagem da técnica é ser muito barata quando comparada com sensores e preços de outros sistemas de aquisição de dados (Smrkić; Košćak; Damjanović, 2018).

Alguns estudos têm sido realizados com uso de metodologias tradicionais e do DIC. Liu *et al.* (2020) apresentaram, a partir de alguns modelos de estruturas em concreto armado, uma forma de trabalho com intuito de otimizar medições bidimensionais através do DIC 2D. Para mostrar a efetividade da estrutura de otimização, os autores compararam os valores dos resultados experimentais com dispositivos de ponto de contato (*clip gauge* e LVDTs) e com o método alternativo sem contato (ESPI). Os padrões de utilização no DIC, propostos para estruturas em concreto, demonstraram-se uma referência útil, podendo ser empregados por engenheiros estruturais interessados em explorar as ferramentas disponíveis pela DIC 2D.

Para validar os resultados DIC, Pan *et al.* (2009) examinaram os valores de deflexão e abertura de fissuras para três lajes de concreto armado, os quais foram obtidos a partir da correlação digital de imagem e através de LVDTs. Assim, os autores constataram que quando comparados os dados entre DIC e resultados dos sensores LVDTs, a abertura de fissuras tinha uma variação de 7%. Para níveis mais baixos de carga, essa variação chegava até 15% de diferença.

Da mesma forma que o DIC, o método dos elementos finitos (FEM) aparece como uma metodologia de alta precisão, podendo ser utilizada com a ideia de contornar problemas de medição de técnicas convencionais, como a presença de descontinuidades, por exemplo. Roux e Hild (2006) com a proposta de medir o desempenho da técnica DIC com a modelagem FEM, observaram que a primeira pode desenvolver melhor a medição de níveis de tensão, chegando a possuir até 7% menos incerteza em comparação a segunda.

Zanuy, Ulzurrun e Díaz (2019) ao pesquisarem a reação interfacial de vigas em concreto armado reforçadas com concreto de ultra alto desempenho com adição de fibras (CUADRF), examinaram o comportamento da curva carga x deflexão em diferentes estágios, analisando a evolução do padrão de fissuras e dos deslocamentos relativos da interface concreto convencional e CUADRF, fazendo uso da correlação digital de imagem. Como conclusões, os autores determinaram que a DIC é uma técnica confiável que auxilia o acompanhamento dos deslocamentos horizontais e verticais nas interfaces, do mesmo modo que a formação e crescimento de fissuras. Ainda, os autores verificaram que as propriedades do CUADRF, em camadas mais espessas, adicionam uma

melhoria considerável à resistência e ductilidade, quando comparados ao concreto armado de referência, isso para vigas críticas ao efeito de cisalhamento. Já para vigas críticas à flexão, camadas mais finas tendem a um melhor comportamento, devido à fragmentação ser menos sensível na zona de compressão.

A partir dessa perspectiva promissora do uso da metodologia DIC comparativamente a métodos tradicionais de leitura de deslocamentos e deformações em superfícies de amostras de concreto armado, este trabalho buscou avaliar o comportamento da curva carga-deformação específica em pilares produzidos com uso de fibras metálicas, com porcentagens de 1,5% e 3,0%, submetidos à compressão centrada. Além disso, avaliou-se o comportamento da propagação de fissuras através do *software* Gom Correlate, que permite uma visualização anterior ao que pode ser vista a olho nu.

2. MATERIAIS

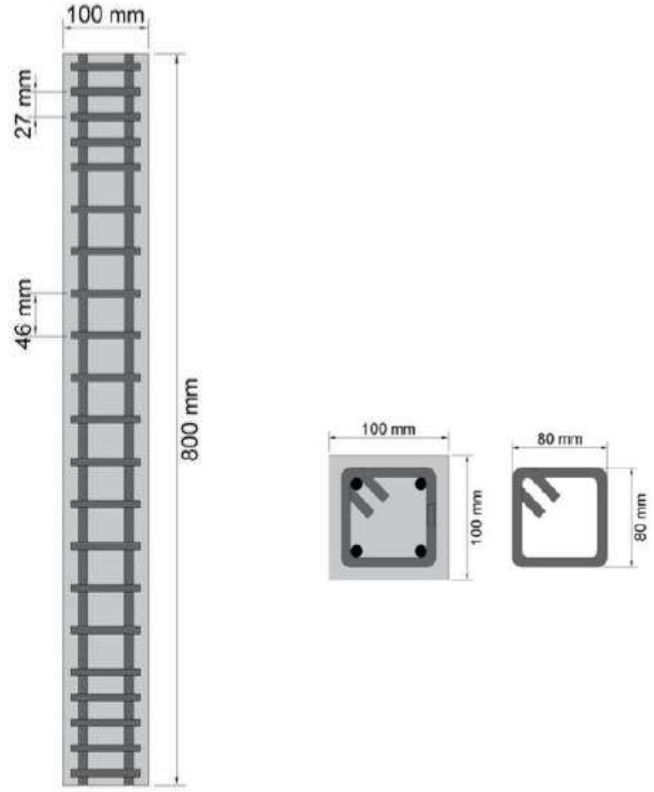
Para a produção do CUAD, utilizaram-se cimento Portland de alta resistência inicial CP V-ARI, sílica ativa não densificada, pó de quartzo com alto teor de pureza, areia fina e areia média, aditivo superplastificante e aditivo modificador de viscosidade. As fibras metálicas utilizadas possuem resistência à tração de 2800 MPa, dimensões de 0,2mm de diâmetro e 13mm de comprimento. Para os pilares de CUAD com 1,5% de fibras, a resistência média foi de 115,2 MPa, enquanto que para os pilares de CUAD com 3,0% de fibras, a resistência média foi de 113,6 MPa.

A produção do concreto foi realizada em um misturador vertical com volume máximo de 70 litros. Adicionaram-se os materiais em partes e com o misturador ligado, de forma a facilitar o processo de homogeneização. A resistência do concreto foi especificada considerando a capacidade de carga das prensas do laboratório de ensaio e a aplicabilidade do concreto na construção civil, sem tratamento de cura especiais e sem a utilização de materiais com difícil disponibilidade.

As armaduras dos pilares foram dimensionadas com o propósito de garantir o mesmo efeito de confinamento para ambas as porcentagens de fibras utilizadas, permitindo desta forma que a única variável entre as tipologias avaliadas fosse a porcentagem de fibras utilizada. Foram moldados dois exemplares para cada um dos traços. Para os pilares moldados, foi adotada uma armadura longitudinal composta por 4 barras de 10 mm de diâmetro e estribo de 8 mm, espaçados a cada 46 mm, conforme apresentado na Figura 2.

Nas extremidades dos pilares, o espaçamento foi reduzido a fim de evitar o esmagamento das bases dos pilares e ocorrer a ruptura primária nestes locais. Além disso, fez-se uso de camisas metálicas nas bases dos pilares, como medida protetiva a fim de evitar a ruptura nestes locais. Utilizaram-se espaçadores de 10 mm, dispostos nas extremidades das armaduras para garantir o correto posicionamento da armadura e garantir o cobrimento adequado. Mais detalhes deste trabalho podem ser encontrados no estudo de Silva (2022).

Figura 2 - Especificação da armadura utilizada



Fonte: os autores.

3. MÉTODOS

A tomada de medidas de deslocamentos na superfície da amostra dos pilares, deu-se através de duas metodologias distintas. A primeira delas foi através da utilização de dois LVDTs da marca HBM com curso de +/- 25 mm e precisão de 0,01 mm, posicionados em cada uma das laterais do corpo de prova. Além desta metodologia tradicional, fez-se uso da correlação digital de imagem, metodologia que necessita da preparação do corpo de prova para que o mesmo possa ser filmado durante o ensaio à compressão e depois seja possível realizar a avaliação através do programa Gom Correlate, o qual vem ganhando mercado nos principais laboratórios e empresas no mercado nacional devido a sua versatilidade.

A preparação das amostras avaliadas através da metodologia DIC passa por duas etapas. A primeira delas consiste na limpeza da superfície da amostra e a realização de duas demãos de pintura na cor branca fosca. Após a secagem da tinta na superfície, é realizado o espraiamento com spray preto fosco, a fim de produzir uma pintura de contraste, chamado padrão estocástico, com pontos escuros na superfície branca. Este padrão de pintura estocástica é capaz de ser identificado e avaliado pelo *software* Gom Correlate. O sequenciamento destas etapas, está apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Preparação das amostras para a metodologia DIC; (a) Passagem de duas demãos de tinta branca fosca; (b) Espraiamento com spray fosco preto; (c) Posicionamento das retas para obtenção dos deslocamentos.



(a) (b) (c)

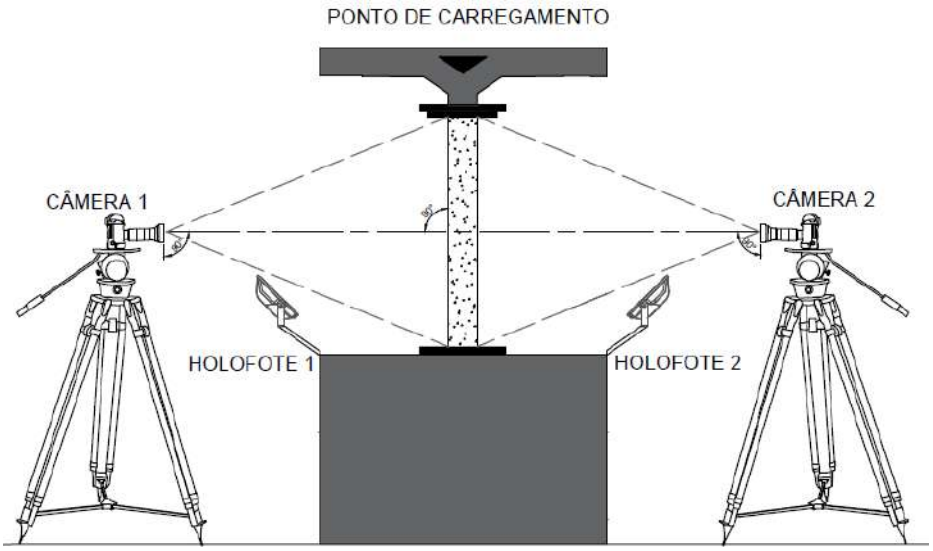
Fonte: os autores.

Optou-se por confeccionar duas amostras para cada tipologia, onde os resultados apresentados através da extensometria tradicional são originados da média dos dois LVDTs utilizados e os resultados apresentados através do DIC referem-se a média obtida através das duas câmeras. Para a metodologia DIC, como observado na Figura 3.c, realizou-se o cálculo do deslocamento superficial através de 10 retas em ambas as superfícies dos pilares.

As filmagens foram realizadas com duas câmeras digitais modelo Cyber-Shot, marca Sony, full HD, capazes de capturar 30 quadros por segundo, posicionadas de forma a estar a 90° da região do centro do prisma, em ambas as faces. Buscou-se reduzir a interferência da incidência da luz externa e efeitos de vibrações e ruídos externos. Os pilares foram iluminados com refletores de LED de cor branca, um em cada face de filmagem, de maneira a obter uma melhor qualidade de filmagem que proporcionasse uma melhor análise no *software*.

O posicionamento das câmeras a 90° da amostra ensaiada, para captura das imagens para sua posterior análise no programa é de extrema importância para a qualidade dos resultados alcançados. Por se tratar de um procedimento manual, a pintura e a captura de imagens podem conter erros de leitura, que foram atenuados com o esmero na preparação e realização dos ensaios. A Figura 4 ilustra o *layout* para captura das deformações através da metodologia DIC.

Figura 4 – Layout para captura de deformações através da metodologia DIC



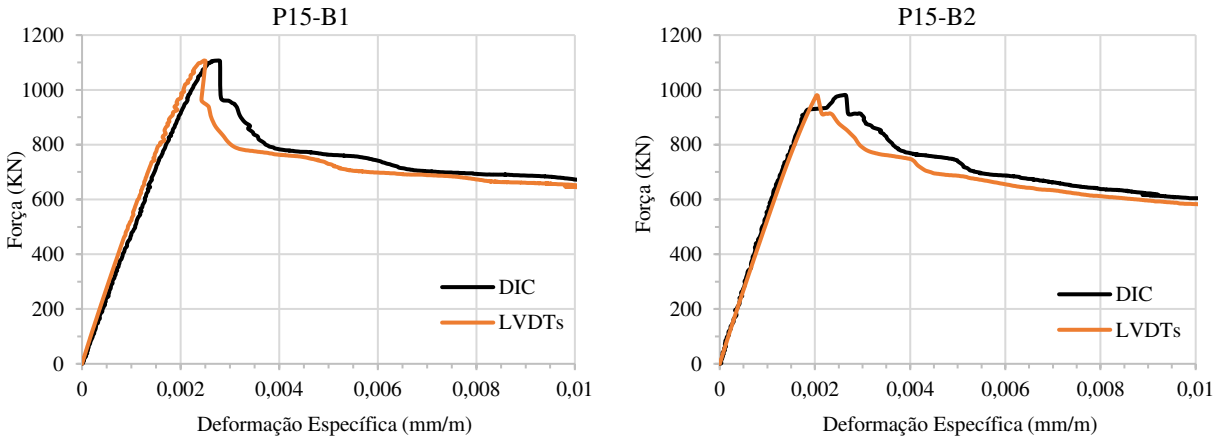
Fonte: os autores.

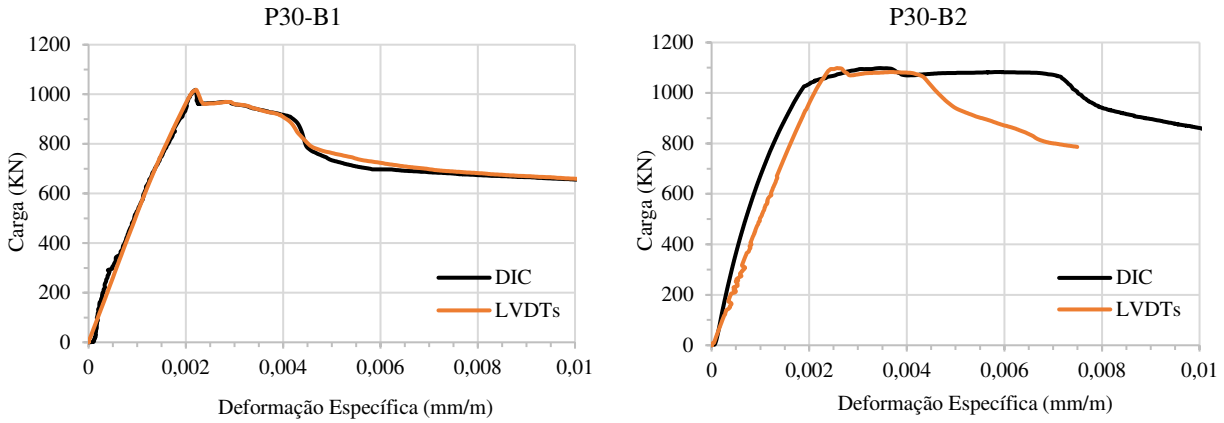
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os pilares foram ensaiados com idade de 28 ± 1 dia, numa prensa hidráulica da marca Shimadzu, com capacidade de carga de 2000 kN, definindo-se uma velocidade de carregamento de 0,008 mm/s. A aquisição de dados dos ensaios, através dos LVDTs, 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.

Os comportamentos das curvas carga-deformação específica das amostras testadas, através de ambas as metodologias propostas, estão apresentados de forma sobreposta na Figura 5.

Figura 5 – Diagrama carga-deformação específica





Fonte: os autores.

Através dos resultados apresentados na Figura 5, verifica-se que o comportamento pós pico dúctil é devido ao uso de fibras metálicas. Assim, a estrutura ao sofrer sua ruptura, ainda tem capacidade de suporte, embora com valor menor que seu pico máximo. Esse comportamento é de bastante interesse para projetos estruturais, haja visto que a capacidade resistente total da estrutura não é esgotada após a ruptura. Além disso, percebe-se que os pilares com 3,0% de fibras apresentam maior capacidade de suporte pós pico, haja vista a maior atenuação da curva observada após o pico de ruptura.

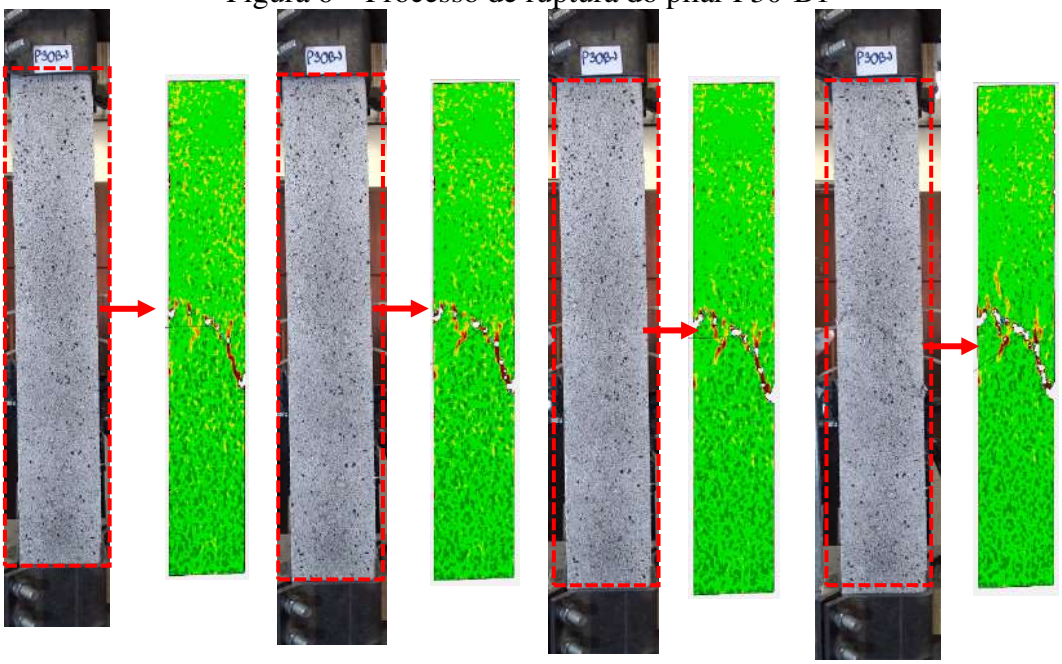
O comportamento da curva carga-deformação específica, avaliada pelo *software*, permite uma tomada de medida muito próxima à calculada através dos LVDTs. Assim sendo, por ser uma técnica de baixo custo, a metodologia DIC se desponta como uma alternativa bastante promissora na avaliação de deslocamentos e deformações superficiais.

O comportamento pós pico de ruptura apresentado pelo pilar P30-B2, pode ser explicado possivelmente devido à perda da referência inicial da imagem após o pico de ruptura.

Outros autores, como Pan *et al.* (2009), Abeer; Dawood; Ghalib (2020), Zanuy, Ulzurrun e Díaz (2019) ao avaliarem diferentes estruturas de concreto armado com uso de LVDTs e DIC 2D, concluíram que os resultados tiveram menos de 10% de diferença entre as duas metodologias. Além disso, Roux e Hild (2006) ao avaliarem o desempenho da técnica DIC com a modelagem através do método dos elementos finitos (FEM), observaram que a técnica DIC pode ter um melhor desempenho e medir o nível de tensão com 7% menos incerteza em comparação ao FEM.

Além disso, através do processamento das imagens pelo programa, é possível, através do mapa de deformação em cores fornecido, prever onde a ruptura ocorrerá antes mesmo do que é verificado visualmente, a olho nu. A Figura 6 ilustra frames captados no mesmo intervalo de tempo através do programa e visualmente.

Figura 6 – Processo de ruptura do pilar P30-B1



490s 500s 550s 600s

Fonte: os autores.

Através da Figura 6, observa-se que o local de ruptura, na região central deste pilar, perceptível através da inspeção visual aos 600s de carregamento, já vinha sendo anunciada pelo programa, neste local, muitos segundos antes, uma vez que o programa consegue identificar os pontos de maiores tensões e deformações na superfície da amostra.

5. CONCLUSÕES

Os dados obtidos através do DIC apresentaram proximidade com os dados obtidos através dos extensômetros elétricos (LVDTs), para os pilares avaliados. Além disso, o uso de fibras metálicas permitiu aumentar a ductilidade dos pilares pós pico de ruptura, mostrando ser um material fundamental que permite com que a estrutura não esgote repentinamente sua capacidade de suporte.

Após a resistência última dos pilares ser alcançada, as deformações continuam ocorrendo nas amostras ensaiadas ao passo que a capacidade resistente vai diminuindo com o tempo. Este comportamento permite visualizar uma ruptura que já não é explosiva e repentina, sendo benéfico para estruturas do cotidiano da construção civil.

Verificou-se que a técnica DIC é apropriada para realizar medições também para peças estruturais em concreto armado submetidas à compressão axial centrada, além de ser possível realizar o mapeamento e surgimento de fissuras muito antes da avaliação visual ou quadro a quadro, sendo possível dessa forma descrever de forma mais apurada o modo de ruptura do material.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos às instituições financiadoras desta pesquisa, em especial a Vtech Consulting Ltda, CAPES, CNPq, BIC/UFRGS e a PROPESQ/UFRGS pelo suporte financeiro na aquisição de materiais para a pesquisa.

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

PAN, B.; QIAN, K.; XIE, H.; ASUNDI, A. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: A review. **Measurement Science and Technology**, v. 20, n. 6, 2009. Disponível em: https://doi.org/10.1088/0957-0233/20/6/062001

ROUX, S.; HILD, F. Stress intensity factor measurements from digital image correlation: Post-processing and integrated approaches. **International Journal of Fracture**, [*s. l.*], v. 140, n. 1–4, p. 141–157, 2006. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s10704-006-6631-2

SILVA, A. R. **Avaliação da influência do confinamento e da adição de fibras metálicas na resistência e ductilidade de pilares curtos produzidos com concreto de ultra alto desempenho**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022**.**

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

LIU, Q.; LOOI, D. T-W.; CHEN, H. H.; TANG, C.; SU, R.K. L. Framework to optimise two-dimensional DIC measurements at different orders of accuracy for concrete structures. **Structures**. v. 28, p. 93–105, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.08.056

SMRKIĆ, M.F.; KOŠĆAK, J.; DAMJANOVIĆ, D. Application of 2D digital image correlation for displacement and crack width measurement on RC elements. **Gradjevinar**, v. 70, n. 9, p. 771–781, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.14256/JCE.2407.2018

MCCORMICK, N.; LORD, J. Digital image correlation for structural measurements. **Nuclear Engineering International**, v. 57, n. 693, p. 28–31, 2012.