







Uma abordagem à correlação de imagens digitais para medições de amostras de alvenaria em laboratório

J. H. Chávez-Gómez¹ , M. Mesa-Lavista^{1*} , J. Álvarez Pérez¹ ,
F. Yépez-Rincón¹ , E. Valencia-Guzmán¹ , R. González-Alcorta¹ 

* Autor de Contato: mmesal@uanl.edu.mx

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v14i2.705>

Recebido: 24/10/2023 | Correções recebidas: 09/04/2024 | Aceito: 27/04/2024 | Publicado: 15/05/2024

RESUMO

O objetivo do trabalho é empregar a técnica de Correlação de Imagens Digitais (DIC) para analisar deslocamentos em muros ou paredes de alvenaria submetidos a compressão axial, sem usar um programa comercial. Um algoritmo foi desenvolvido empregando o método numérico de Newton Raphson para este propósito. Os resultados obtidos foram comparados com as medições do transdutor diferencial linear variável, validando a eficácia do algoritmo e comparando-os com estudos anteriores, com erros aceitáveis. Este trabalho faz parte de um projeto em andamento no Instituto de Engenharia Civil da Universidade Autónoma de Nuevo León, estabelecendo as bases para futuras pesquisas sobre a implementação da técnica para análise de problemas patológicos a partir de estados de deformação em estruturas de alvenaria. Como principal conclusão, chegou-se à determinação de que o DIC pode ser utilizado como um método confiável para medir deslocamentos e deformações em ensaios de laboratório.

Palavras-chave: correlação de imagens digitais; alvenaria.

Citar como: Chávez-Gómez, J. H., Mesa-Lavista, M., Álvarez Pérez, J., Yépez-Rincón, F., Valencia-Guzmán, E., González-Alcorta, R. (2024), “Uma abordagem à correlação de imagens digitais para medições de amostras de alvenaria em laboratório”, Revista ALCONPAT, 14 (2), pp. 174 – 190, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v14i2.705>

¹ Departamento de Ingeniería Estructural y Peritajes, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León, Nuevo León, México.

Contribuição de cada autor

En este trabajo los autores J.H. Chávez-Gómez, M. Mesa-Lavista, y J. Álvarez Pérez contribuyeron equitativamente con la concepción metodológica del proyecto (33% cada uno). El autor E. Valencia-Guzmán contribuyó con la instrumentación del método DIC (90%) y la autora F. Yépez-Rincón (10%). E. Valencia-Guzmán contribuyó con la programación del método (80%) y J.H. Chávez-Gómez (20%). Los autores J.H. Chávez-Gómez (20%), M. Mesa-Lavista (20%), J. Álvarez Pérez (20%), F. Yépez-Rincón (20%), R. González-Alcorta (20%) contribuyeron de manera equitativa en la escritura y conclusiones generales del trabajo. Todos los autores participaron en el análisis y discusión de los resultados obtenidos.

Licença Creative Commons

Copyright (2023) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no primeiro número do ano 2025, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2024.

An approach to digital images correlation for measurements of masonry specimens in laboratory

ABSTRACT

The aim of the work is to employ the Digital Image Correlation (DIC) technique to analyze displacements in masonry wall specimens under axial compression, without using commercial software. An algorithm was developed using the Newton Raphson numerical method for this purpose. The results obtained were compared with measurements from the Linear Variable Differential Transformer (LVDT), validating the effectiveness of the algorithm and comparing them with previous studies, with acceptable errors. This work is part of an ongoing project at the Civil Engineering Institute of the Autonomous University of Nuevo León, laying the groundwork for future research on the implementation of the technique for obtaining pathologies and deformation states in masonry structures. As the main conclusion, it was determined that DIC can be used as a reliable method for measuring displacements and deformations in laboratory tests.

Keywords: digital image correlation; masonry.

Un acercamiento a la correlación de imágenes digitales para mediciones de especímenes de mampostería en laboratorio

RESUMEN

El objetivo del trabajo es emplear la técnica de Correlación de Imágenes Digitales (DIC) para analizar los desplazamientos en muretes de mampostería sometidos a compresión axial, sin usar un programa comercial. Se desarrolló un algoritmo empleando el método numérico de Newton Raphson para este propósito. Los resultados obtenidos fueron comparados con las mediciones del transductor diferencial lineal variable (LVDT), validando la eficacia del algoritmo y comparándolos con estudios previos, con errores aceptables. Este trabajo forma parte de un proyecto en curso en el Instituto de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León, estableciendo las bases para futuras investigaciones sobre la implementación de la técnica para la obtención de patologías y estados de deformación en estructuras de mampostería. Como principal conclusión se llegó a la determinación que el DIC podrá ser empleado como un método de medición fiable de desplazamientos y deformaciones en ensayos de laboratorio.

Palabras clave: correlación de imágenes digitales; mampostería.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

1. INTRODUÇÃO

A correlação de imagem digital (*Digital Image Correlation*, DIC por suas siglas em inglês) é um método de medição óptico, preciso e prático; capaz de mapear todo um campo de deslocamentos sobre um objeto de interesse que foi deformado. Consiste no processamento de imagens fotográficas tiradas sobre uma superfície previamente preparada com um padrão de pontos aleatórios. Esta superfície sofre deformações por estar sujeita a um estado de carga. Com a utilização do processamento de imagens é possível obter o campo de deslocamento em uma estrutura específica. É uma alternativa aos dispositivos de medição tradicionais e pode mapear todo um campo de deslocamento. Atualmente está sendo realizado um projeto que visa avaliar a eficácia da técnica de correlação de imagens digitais em paredes de alvenaria. As paredes foram fabricadas em laboratório com blocos vazados de concreto e submetidas à compressão axial. Dentro deste projeto, além disso, o método tradicional de medição de deslocamentos é utilizado com o uso de um transdutor de deslocamento elétrico (Linear Variable Differential Transformer, LVDT). Esses dois métodos foram comparados no presente projeto de pesquisa para validar a técnica de DIC. O desenvolvimento da técnica de DIC ocorreu desde sua origem na década de 1980 e está em constante mudança e evolução com o objetivo de reduzir o custo computacional e aumentar sua aplicabilidade.

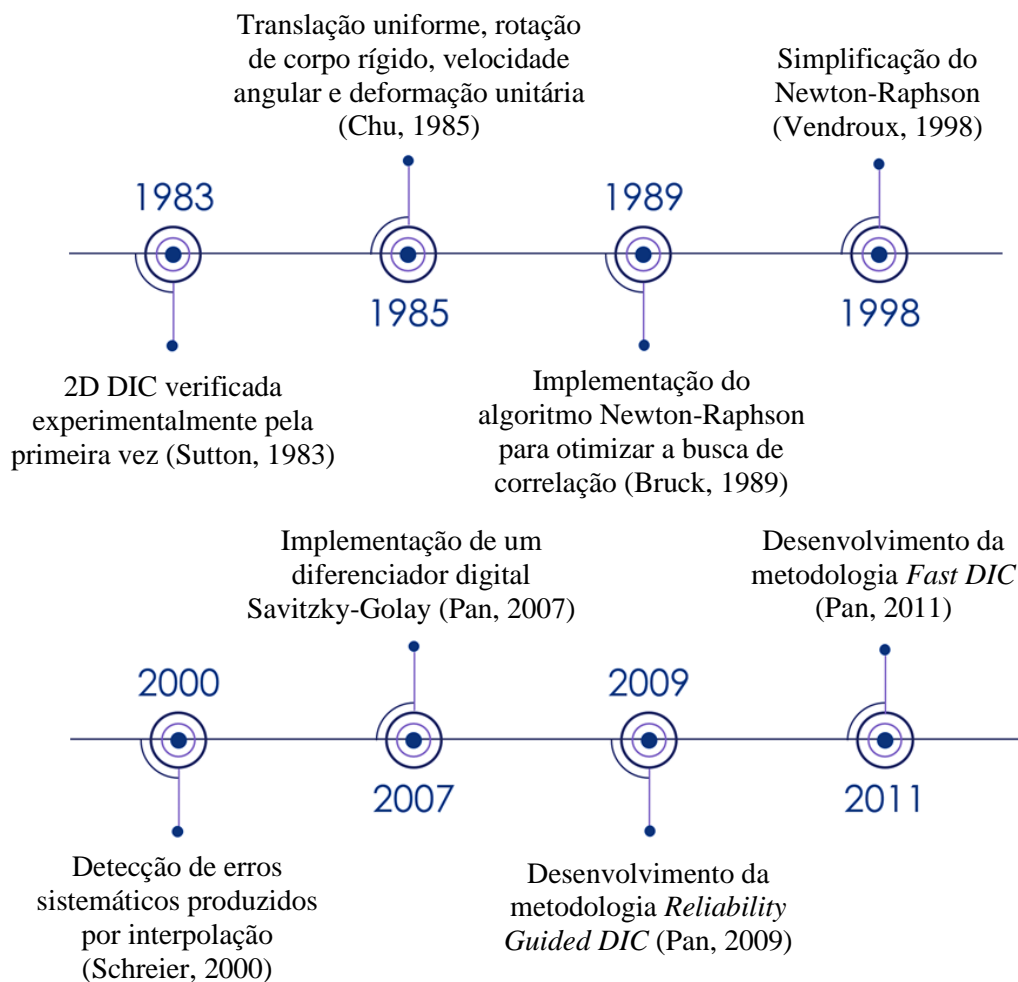


Figura 1. Cronologia da evolução do método de DIC

A Figura 1 apresenta a evolução de sua implementação em uma linha do tempo. Porém, a partir de 2010 (Destrebecq et al., 2011), sua implementação iniciou-se em alguns problemas de engenharia civil como: vigas de concreto armado, paredes de alvenaria (Mojsilović e Salmanpour, 2016), entre outros (Bruck et al., 1989; Chu et al., 1985; Pan, 2009; Pan and Li, 2011; Schreier et al., 2009; Schreier et al., 2000; Vendroux and Knauss, 1998).

1.1 Técnicas do DIC

O DIC possui diferentes ramos que dependem do objetivo da experimentação, por sua vez, cada um deles pode ser executado com diferentes metodologias que surgiram a partir da evolução da técnica. As variantes já estabelecidas do DIC são 2D-DIC, 3D-DIC e DVC que cumprem a tarefa de obter deformações 2D, deformações 3D e deformações volumétricas respectivamente (Hubert et al., 2010). As metodologias incluem fatores como algoritmos de correlação, formas de preparação de superfície, métodos de interpolação e calibração.

2D-DIC é conhecido como a variante de correlação de imagem digital que requer apenas uma câmera (Bermudo Gamboa et al., 2019). Este é um método de medição óptica sem contato que utiliza os princípios da mecânica contínua para extrair o campo dos deslocamentos de um objeto submetido a uma carga (Sutton et al., 2008). Uma das principais vantagens desta variante é que reduz consideravelmente o tempo de implementação porque nem sempre requer calibração antes da captura da imagem; tendo redução no custo computacional e fornece resultados com precisão comparável às variantes 3D- DIC em problemas de tensão plana (e/ou) deformação (Bermudo Gamboa et al., 2019). No entanto, as suas desvantagens são a incapacidade de detectar movimentos fora do plano e o fato da câmara ter de estar perpendicular à superfície do objeto (Sutton et al., 2008). Nesse sentido, cada movimento fora do plano, seja por rotação ou translação, será interpretado como um deslocamento. Isso pode ser verificado teoricamente com as equações do modelo da câmera *pinhole*. (Sutton et al., 2008).

Stereo DIC ou 3D DIC é um método estabelecido usado para reconstrução de formas de objetos e análise de tensor de deformação tridimensional (Zhenxing Hu et al., 2010). Para sua aplicação são utilizadas 2 câmeras para obter o campo de deslocamento tridimensional de um objeto físico. Posteriormente, a técnica de *Stereovision binocular* é utilizada para reconstruir uma cena 3D a partir de dois pontos de vista diferentes por meio de triangulação (Orteu, 2009). Isto é possível devido aos pressupostos de que a posição relativa e a orientação das câmeras são conhecidas e que as projeções de cada câmera estão sincronizadas para que correspondam ao mesmo ponto físico P do objeto de estudo (Orteu, 2009). Esta variante 3D não possui as limitações do 2D DIC já que pode ser utilizado para fazer medições em objetos de múltiplas geometrias e com movimentos fora do plano. A principal desvantagem está na aplicação da técnica, tanto para a calibração quanto para o algoritmo de correlação (Bermudo Gamboa et al., 2019).

A Correlação Volumétrica Digital (DVC) é uma extensão do 2D-DIC (Jiroušek et al., 2011). O DVC pega os conceitos de padrão de pontos, registro de imagem e correlação de subconjuntos e os expande para o volume de um objeto de interesse (Quintana et al., 2016). O registro de imagens não é feito com câmeras, mas sim técnicas como *computed tomography*, *confocal imaging microscope* y *magnetic resonance imaging*, que são utilizadas principalmente em engenharia biomecânica (Hubert et al., 2010). Esses métodos antecedem o DIC e eram normalmente utilizados para obter informações sobre as dimensões e densidade do material, porém, com o surgimento do DVC esta informação tem maior potencial (Quintana et al., 2016). Em vez de usar tinta como padrão de pontos como no 2D-DIC, o registro da imagem é baseado nas características da amostra (Quintana et al., 2016). A técnica baseia-se na realização de uma varredura inicial com os métodos de registro de imagem citados para obter o volume de referência sem deformação. Posteriormente, uma força externa é aplicada e são feitas varreduras sequenciais e consecutivas que representam o processo de deformação do objeto (Hubert et al., 2010). Finalmente, com subconjuntos cúbicos de

voxels é feita uma correlação para encontrar os deslocamentos u , v e w nas imagens deformadas (Quintana et al., 2016). A vantagem deste método é que se obtém um campo completo de deslocamentos dos volumes, não apenas da superfície do objeto como nas variantes 2D-DIC e 3D-DIC (Jiroušek et al., 2011). A desvantagem é que são necessários equipamentos especializados e as aplicações são mais limitadas a microestruturas de Biomecânica e problemas específicos da Mecânica de meios contínuos (Buljac et al., 2018).

Devido às limitações que surgem nos equipamentos necessários à aplicação do DIC, optou-se por implementar a variante 2D-DIC na presente investigação. Desenvolvendo um algoritmo que permita obter o campo de deslocamento no processamento de imagens.

1.2 Aplicações do DIC na engenharia civil

O DIC tem sido aplicado em diferentes áreas da Engenharia e Biomecânica. No que diz respeito à Engenharia Civil, tem sido utilizado principalmente para problemas estruturais de vigas (Sutton et al., 1983), alvenaria (Allaoui et al., 2018; Mojsilović e Salmanpour, 2016; Zahra et al., 2021; Zahra et al., 2023) e pontes (Dhanasekar et al., 2019; Malesa et al., 2010), entre outros problemas de engenharia civil. Nestas estruturas, a informação relevante são as deformações e a medição da propagação e geometria das fissuras. Este último é de grande importância na análise de manifestações patológicas nas estruturas.

Na pesquisa de (Malesa et al., 2010) foram utilizadas 2 câmeras para adquirir imagens em diferentes pontos de uma ponte em tamanho real na Polônia. A metodologia seguida foi utilizar um sensor global e local para capturar imagens da ponte enquanto um trem de 120 toneladas passava e retornava repetidamente em 4 velocidades diferentes. Mais de 30 experimentos foram realizados capturando de 20 a 80 imagens por teste. Os resultados experimentais foram comparados com um modelo de elementos finitos da ponte e os resultados do DIC concordaram satisfatoriamente.

A técnica DIC também foi aplicada com sucesso em vigas de concreto armado. Na pesquisa de (Fayyad e Lees, 2014) foram realizadas 2 séries de 7 vigas de concreto armado, cada uma delas ensaiadas em flexão de 3 pontos. Foi utilizada uma câmera do tipo DSLR com resolução de 5472 x 3648 pixels e o software Geo PIV que utiliza um critério de correlação cruzada normalizado. Foram extraídas informações sobre cada amostra da propagação da abertura da fissura. Isto foi comparado com um medidor C-Clip e o método DIC foi considerado eficaz para visualizar e quantificar propriedades de fratura em concreto armado e para monitorar fissuras em vigas de concreto armado.

Na pesquisa de (Mojsilović e Salmanpour, 2016) foram ensaiadas 10 paredes de alvenaria às quais foi aplicado o método DIC 2D. Para capturar as imagens, foram testadas duas câmeras diferentes, a Nikon D3 com 12,1MP e a Nikon D800E com 36,3MP. Para cada amostra testada, foram tiradas aproximadamente 500 imagens. O processamento das imagens foi realizado com o software VIC 2D e o critério de correlação foram diferenças quadráticas normalizadas. Foi encontrada uma boa relação entre os deslocamentos medidos pelo DIC e pelos LVDTs nas direções horizontal, diagonal e vertical.

O método 2D DIC foi aplicado por (Allaoui et al., 2018) para medir o comportamento compressivo de um prisma de tijolo de duas fileiras. Os autores usaram software de correlação 7D e uma câmera comercial de dispositivo de carga acoplada (CCD). Nesta pesquisa, referente ao DIC, o tamanho das grades na junta de argamassa foi delimitado e otimizado para alcançar o correto processamento das imagens.

Os pesquisadores (Howlader et al., 2021) realizaram ensaios em 8 paredes de alvenaria perfuradas não reforçadas. Os ensaios foram realizados em escala real sob carregamento cíclico no plano e carregamento vertical de pré-compressão constante. Para medir a deformação da parede durante os ensaios e capturar fissuras completas, eles usaram o método 2D DIC em paralelo com a instrumentação LVDT tradicional. As imagens foram analisadas utilizando o software VIC-2D

para validar com sucesso os resultados do DIC em relação às medições registradas pelos LVDTs. Por sua vez, (Zahra et al., 2021) também aplicaram o método DIC 2D para determinar as deformações em ensaios de compressão de prismas de alvenaria feitos de blocos ociosos de concreto. Os autores usaram uma câmera monocromática a uma velocidade de 10 quadros por segundo. Posteriormente, compararam os resultados obtidos com a técnica DIC com micromodelos de elementos finitos.

Mais recentemente, (Zahra et al., 2023) aplicaram a técnica DIC para obter as deformações de tensão produzidas em um painel de alvenaria ensaiado em flexão fora do plano. Foi utilizada uma câmera monocromática que permitiu realizar a análise de deformação/tenacidade. Nesta pesquisa também utilizaram o método 2D DIC em uma análise lateral do painel.

De acordo com a literatura consultada, pode-se concluir que a técnica DIC tem sido aplicada satisfatoriamente em diversos problemas estruturais na área da engenharia civil. Devido à resistência que a técnica demonstrou para medir o campo de deformação e detectar o início e propagação de fissuras, decidiu-se começar a aplicar a técnica em projetos de pesquisa em andamento. Neste sentido, o objetivo desta investigação foi avaliar a eficácia do método DIC 2D em paredes de alvenaria fabricadas no nosso laboratório (FIC-UANL) sob carga de compressão axial de acordo com a regulamentação europeia (Eurocode-6, 2005).

2. METODOLOGIA

O projeto foi realizado desenvolvendo a seguinte metodologia:

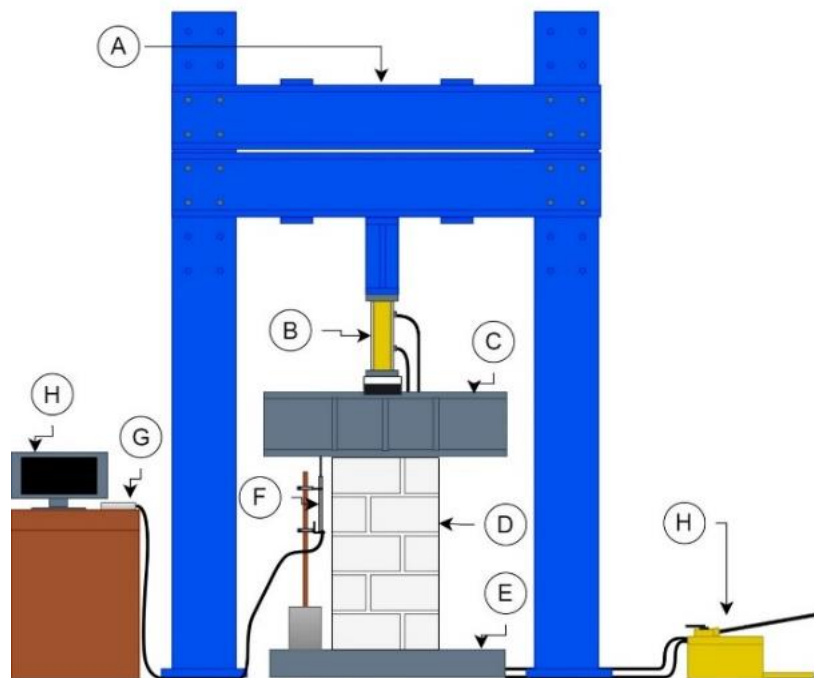
- 1) *Preparação de amostras em laboratório.* Como parte do projeto em que esta pesquisa foi desenvolvida, foram estabelecidas 3 etapas fundamentais: (i) caracterização dos materiais (blocos e argamassas) de acordo com as normas (NMX-C-036-ONNCCE-2013, 2013; NMX-C - 061-ONNCCE-2015, 2015), (ii) construção dos corpos de prova, e (iii) ensaio de compressão dos corpos de prova de acordo com a regulamentação europeia (Eurocódigo-6, 2005).

Foram realizadas 7 paredes com 5 fileiras de blocos e meios blocos de nº 6 com dimensões modulares de 400x150x200mm (Comprimento x largura x altura). Os blocos foram adquiridos de uma empresa local. A resistência média dos blocos foi de 6,61 MPa em área bruta e as dimensões das paredes foram de 104 cm de altura e 61 cm de espessura. As paredes foram testadas em compressão axial no âmbito de outro projeto de investigação em curso que persegue outros objetivos específicos.

- 2) *Preparação do pórtico de carregamento.* A estrutura de carregamento foi preparada conforme visto na Figura 2. Foi colocado um LVDT para medida dos deslocamentos e sua posterior comparação com os resultados obtidos pela técnica DIC.
- 3) *Preparação da técnica DIC.* A preparação da técnica consistiu em adicionar uma camada de tinta branca no centro do corpo de prova e pulverizar a camada de tinta branca com spray preto. Isto gerou um padrão de pontos que foram posteriormente analisados através de fotografias para obter a imagem deformada à medida que o teste avançava (ver Figura 3). A Figura 3A mostra 4 paredes que foram preparadas com as características da câmera F5 com ISO 500 e velocidade do obturador de 1/13 s. Na Figura 3 B, as outras 3 paredes são apresentadas com as características da câmera F5 com ISO 250 e velocidade do obturador de 1/25 s. Adicionalmente, foram utilizados pontos de controle em cada teste para o posterior cálculo de erros devido a possíveis movimentos do sistema de captura de fotos ou do quadro de carregamento. Os pontos de controle são mostrados na Figura 3 C.
- 4) *Captura de imagens.* Para a captura das imagens foi utilizada uma câmera NIKON D5600 lentes de 18mm a 58 mm de 24 MPX com controle remoto e um tripé Manfrotto. Além disso, foram utilizadas duas fontes de luz da marca GTC, luz fria 3900 lm, com guarda-

chuvas fotográficos, conforme Figura 4. A captura da imagem foi realizada enquanto as paredes eram ensaiadas sob compressão axial.

- 5) *Algoritmo DIC.* Para a aplicação da técnica DIC foi desenvolvido um algoritmo na linguagem de programação Python. O script do algoritmo pode ser consultado na referência (Valencia-Guzmán, 2021). Para o seu desenvolvimento foram utilizados diferentes métodos e recomendações de pesquisas anteriores (Su et al., 2019). Para o algoritmo foi seguido o fluxograma apresentado na Figura 5 e a metodologia explicada a seguir (Figura 6).



Descrição de elementos	
A	Pórtico de carregamento constituído por 2 pilares, 2 vigas calhas
B	Macaco hidráulico de 50 Ton ENERPAC com célula de carregamento
C	Viga de aço
D	Corpo de prova
E	Placa de aço de 9 cm de espessura
F	LVDT marca RDP modelo ACT3000A
G	Bloco terminal para placa de aquisição de dados National Instruments
H	Bomba hidráulica com acionamento manual da Enerpac

Figura 2. Esquema da estrutura de carregamento para o ensaio do corpo de prova

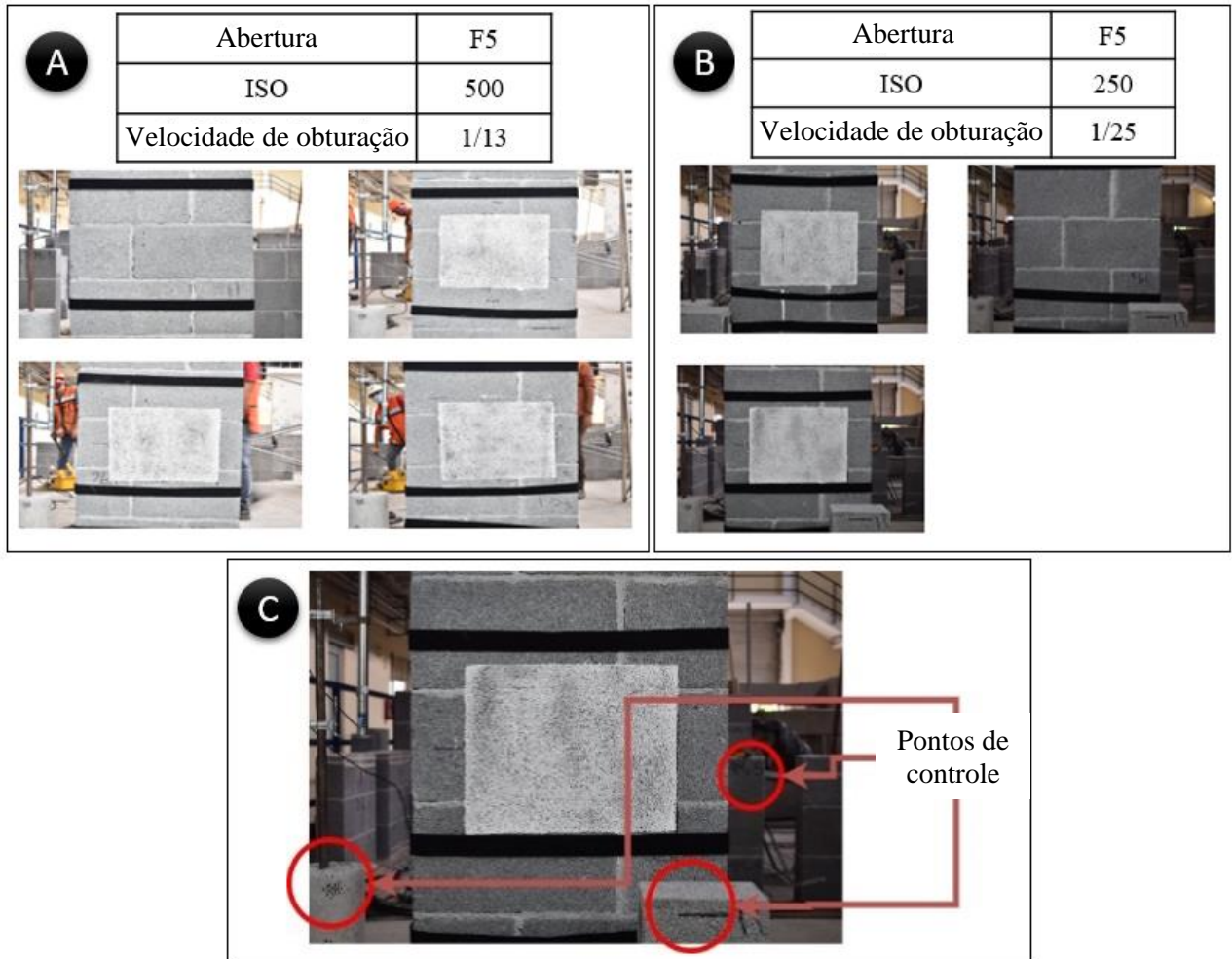


Figura 3. Preparação da técnica DIC. A) Paredes para teste com câmera ISO 500, velocidade do obturador 1/13 s e abertura F5, B) paredes para teste com câmera ISO 250, velocidade do obturador 1/25 s e abertura F5, C) pontos de controle usados para experimentação



Figura 4 Ensaios laboratoriais e implementação da técnica de captura de imagens.

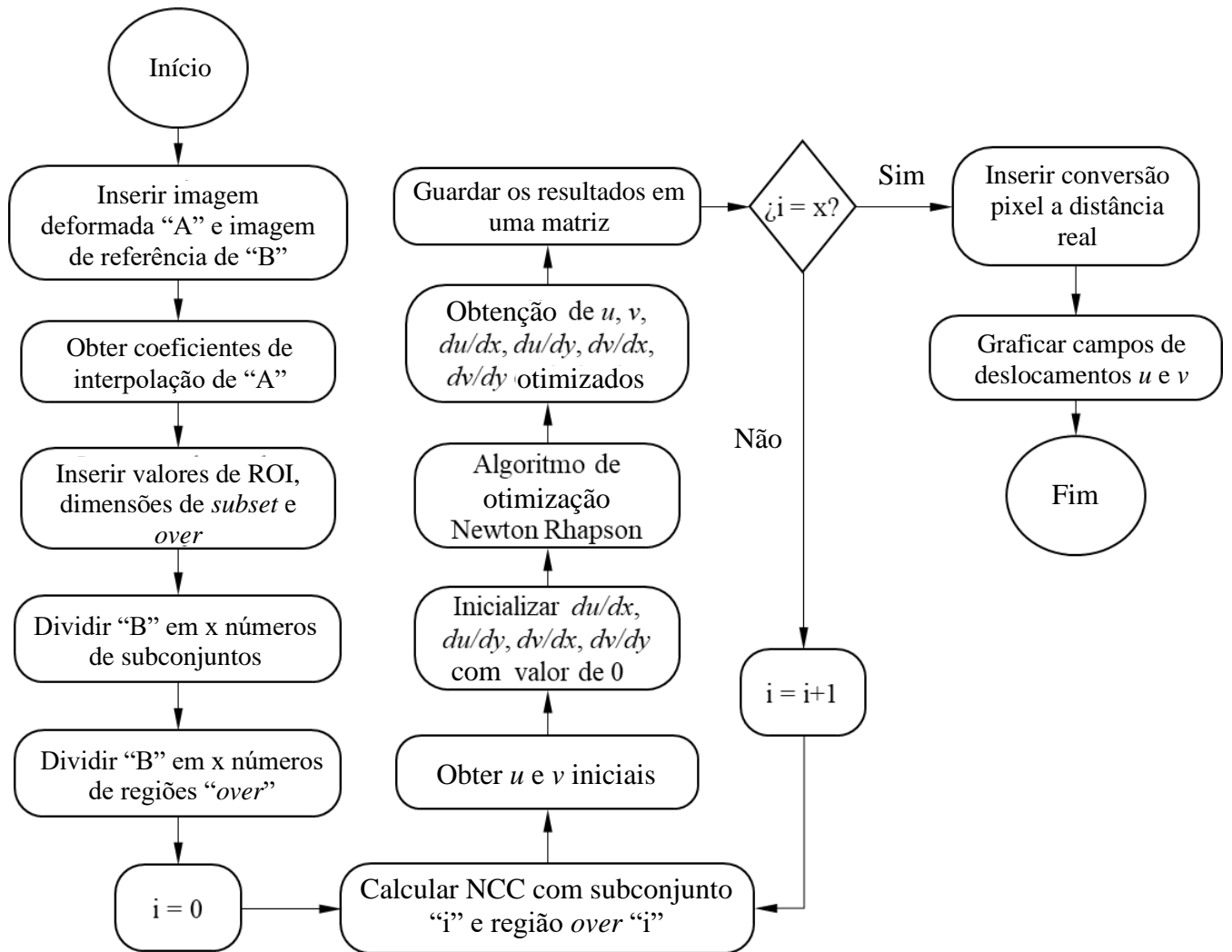


Figura 5. Diagrama de fluxo do algoritmo desenvolvido para aplicação da técnica DIC (Valencia-Guzmán, 2021)

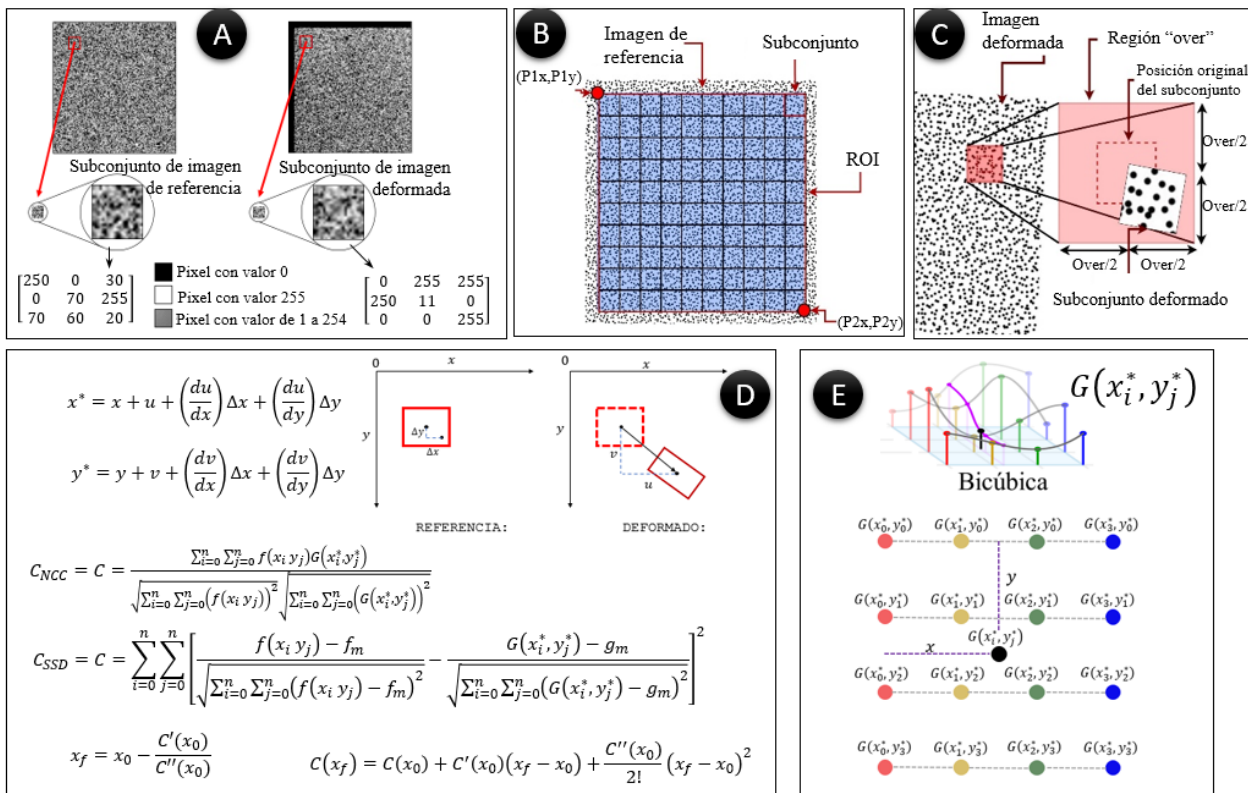


Figura 6. Metodología seguida para a implementação do algoritmo (Valencia-Guzmán, 2021)

A Figura 6 mostra a implementação do algoritmo utilizado para aplicação da técnica DIC neste trabalho. Primeiramente, um subconjunto do padrão de pontos foi obtido na imagem de referência e o mesmo subconjunto na imagem deformada após o teste (Figura 6A). Os subconjuntos foram classificados em pixels na seguinte escala de cinza: 0 (preto) a 255 (branco). Posteriormente, os subconjuntos foram subdivididos de forma otimizada, selecionando a região de referência conhecida como “região de interesse” (*Region Of Interest*, ROI por suas siglas em inglês) (Figura 6B). Uma vez definidos os subconjuntos dentro da ROI, a posição de pesquisa dentro da imagem distorcida é determinada. Isto é feito definindo uma distância arbitrária “over”, que depende das deformações máximas esperadas (Figura 6C). Na Figura 6D mostram-se as equações que foram utilizadas para determinar as coordenadas dos pontos deformados (x^*, y^*) a partir dos deslocamentos horizontal (u) e vertical (v). Para isso foram utilizadas as funções de interpolação no estado indeformado $f(x_i, y_j)$ e deformado $G(x_i^*, y_j^*)$. Para calcular os coeficientes de correlação, foram utilizados o critério de Correlação Cruzada Normalizada (C_{NCC}) e Diferenças ao Quadrado de Soma Zero (C_{SSD}) (Pan et al., 2010). A busca por valores extremos de correlação é feita pelo método de Newton Raphson (Steven e Raymond, 2015). Para obtenção das funções de interpolação 'f', 'G' e 'C' foi utilizado o critério de interpolação bicúbica (Figura 6E), uma vez que a demanda computacional é relativamente baixa se comparada a outros métodos de interpolação (Schreier et al., 2000).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O algoritmo proposto foi verificado utilizando uma imagem sintética no software livre *Speckle Generator*. O erro relativo máximo em termos do campo de deslocamento (u , v , $alpha$) na verificação do algoritmo foi de 0,053% para o deslocamento horizontal, u , em um determinado subconjunto em condições ideais, ou seja, não houve distorções, e não foram observados movimentos indesejados (ver Tabela 1).

Tabela 1. Erros em translações e rotação

Variáveis	Valor esperado	Valor obtido	Erro relativo
u	32.897 px	32,9144px	0,053%
v	-36,5146px	-36.497 px	0,048%
α	0,0523599 rad	0,0521625 rad	0,378%

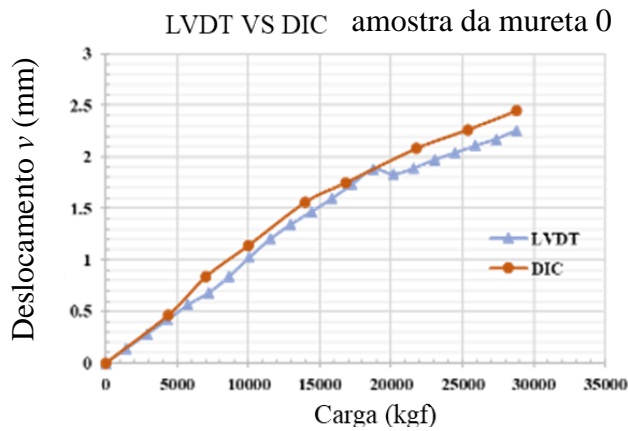
Após a verificação do algoritmo, foram obtidos os gráficos carga x deslocamento para cada ensaio realizado em intervalos de carga previamente selecionados (ver Figura 7e Figura 8). Como os LVDT apenas registram o deslocamento linear vertical em um segmento de reta (l_0) e a técnica DIC possui entre 1000 a 4000 pontos dependendo da superfície de referência da parede, optou-se por obter uma média dos deslocamentos verticais na reta (l_D) para o centro da superfície de referência (ver Figura 9), para fazer a comparação entre os resultados do DIC e do LVDT.

Dos testes realizados nas 7 paredes, no corpo de prova 4, não foi possível captar a informação do LVDT. A Figura Figura 7Figura 8mostram os resultados das paredes ensaiadas, denominadas ensaios 0, 1, 2, 3, 5 e 6. Além disso, são mostrados os erros relativos calculados entre os deslocamentos obtidos pelas medições do LVDT e aqueles obtidos com a técnica DIC.

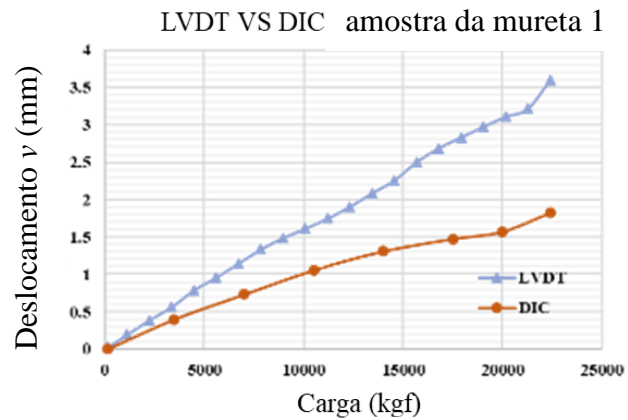
Obteve-se uma diferença absoluta máxima de 1,77 mm no ensaio na parede 1 (Figura 7) e um erro relativo médio máximo de 54,37% no ensaio na parede 3 (Figura 8). Esses erros são substanciais e podem ser atribuídos aos seguintes motivos:

- (1) Movimentos indesejados da placa e do tripé.
- (2) No ensaio da parede 3 ficou evidente o aparecimento e propagação de uma fissura, que produziu valores irregulares e subconjuntos irreconhecíveis.
- (3) Distorção da lente.

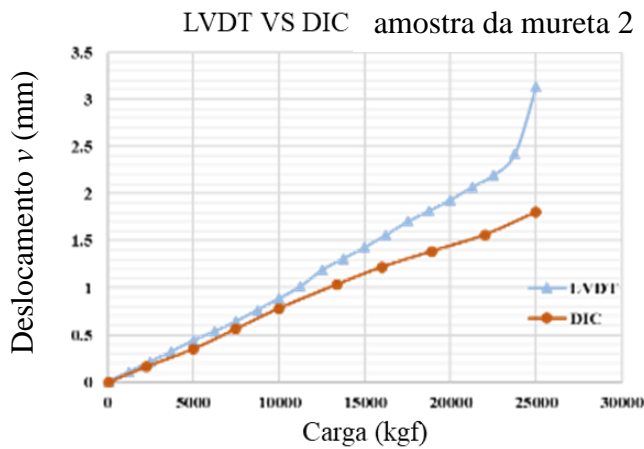
Utilizando os pontos de controle mostrados na Figura 3, verificou-se que não houve movimentos significativos do tripé. Nas paredes dos testes 0, 2, 5 e 6 foram observados erros médios inferiores que foram de 10,99%, 21,65%, 5,47% e 20,22% respectivamente. Porém, é importante ressaltar que esses erros ainda ultrapassam a precisão desejada, principalmente em testes que ultrapassam níveis de carga de 15.000 kgf (15 toneladas), onde são registradas as maiores diferenças.



Carga (kgf)	Foto	DIC (mm)	LVDT (mm)	Error %
0	0	0	0	0.00
4400	1	0.46884	0.42461	10.42
7017	2	0.83672	0.66432	25.95
10000	3	1.14050	1.01596	12.26
14000	4	1.55988	1.43100	9.01
16800	5	1.74735	1.68510	3.69
21800	6	2.08113	1.89955	9.56
25400	7	2.26296	2.08188	8.70
28800	8	2.44464	2.25545	8.39
Erro médio				10.99

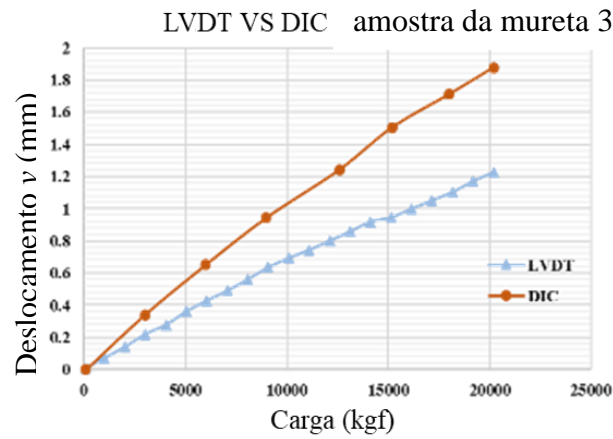


Carga (kgf)	Foto	DIC (mm)	LVDT (mm)	Error %
140	0	0	0	0.00
3500	1	0.39987	0.59235	-32.49
7000	2	0.73110	1.19257	-38.70
10500	3	1.05501	1.66167	-36.51
14000	4	1.30750	2.16988	-39.74
17500	5	1.47337	2.77619	-46.93
20000	6	1.57064	3.08693	-49.12
22400	7	1.82140	3.59156	-49.29
Erro médio				-41.83

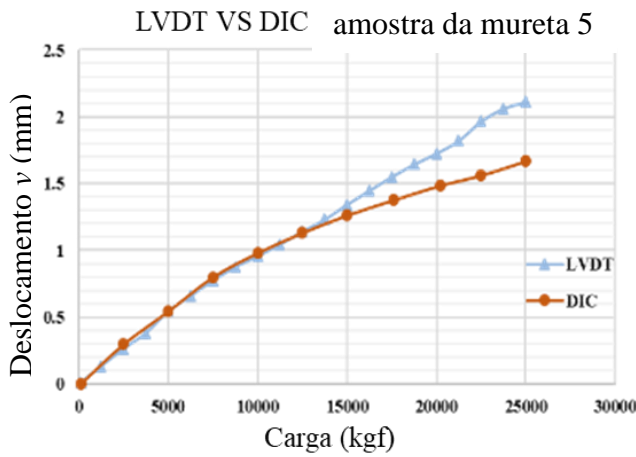


Carga (kgf)	Foto	DIC (mm)	LVDT (mm)	Error %
100	0	0	0	0.00
2300	1	0.16446	0.19899	-17.35
5000	2	0.34966	0.44025	-20.58
7500	3	0.56413	0.64394	-12.39
10000	4	0.78138	0.88666	-11.87
13400	5	1.03805	1.27676	-18.70
16000	6	1.22117	1.53646	-20.52
18900	7	1.38908	1.83196	-24.18
22000	8	1.56459	2.14444	-27.04
25000	9	1.80847	3.13240	-42.27
Erro médio				-21.65

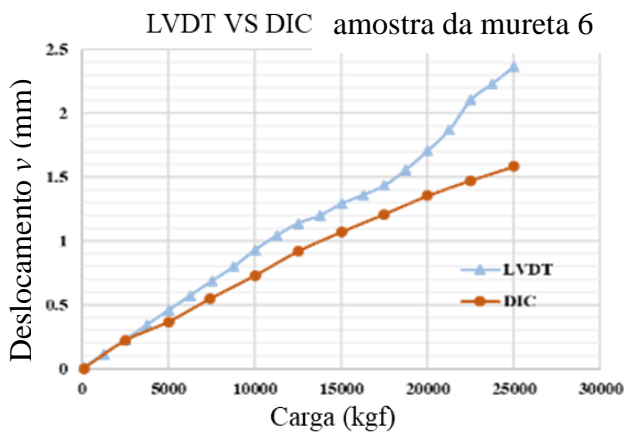
Figura 7. Resultados da comparação entre o LVDT e o DIC para as paredes 0, 1 e 2.



Carga (kgf)	Foto	DIC (mm)	LVDT (mm)	Error %
100	0	0	0	0.00
3000	1	0.33960	0.21630	57.00
6000	2	0.65058	0.42292	53.83
9000	3	0.94384	0.62682	50.58
12600	4	1.24236	0.82598	50.41
15200	5	1.50514	0.94703	58.93
18000	6	1.71005	1.09216	56.58
20200	7	1.87693	1.22462	53.27
Erro médio				54.37



Carga (kgf)	Foto	DIC (mm)	LVDT (mm)	Error %
100	0	0	0	0.00
2500	1	0.29695	0.26187	13.40
5000	2	0.54353	0.54129	0.41
7500	3	0.79931	0.77204	3.53
10000	4	0.98015	0.95489	2.64
12500	5	1.13096	1.14003	-0.79
15000	6	1.26176	1.34216	-5.99
17600	7	1.37609	1.55677	-11.61
20200	8	1.48394	1.73981	-14.71
22500	9	1.56148	1.96488	-20.53
25000	10	1.66718	2.11064	-21.01
Erro médio				-5.47



Carga (kgf)	Foto	DIC (mm)	LVDT (mm)	Error %
100	0	0	0	0.00
2500	1	0.21805	0.22858	-4.61
5000	2	0.36459	0.45716	-20.25
7400	3	0.54477	0.67659	-19.48
10000	4	0.72692	0.92808	-21.68
12500	5	0.91711	1.13738	-19.37
15000	6	1.06770	1.28948	-17.20
17500	7	1.20852	1.43366	-15.70
20000	8	1.35222	1.70581	-20.73
22500	9	1.47283	2.10386	-29.99
25000	10	1.58116	2.36550	-33.16
Erro médio				-20.22

Figura 8. Resultados da comparação entre o LVDT e o DIC para as paredes 3, 5 e 6.

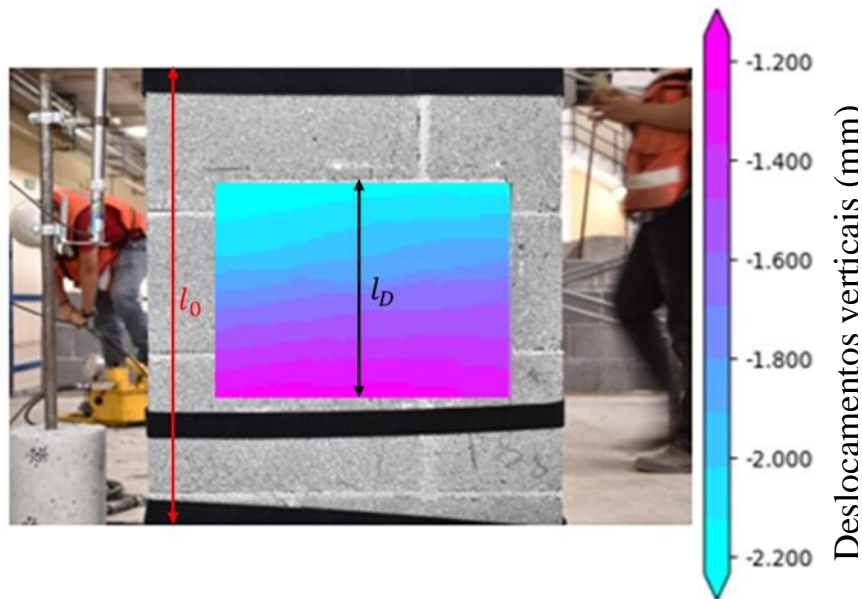


Figura 9. Resultados dos deslocamentos verticais obtidos através do algoritmo utilizado no DIC para o ensaio da parede 5 com carga máxima de 25.000 kgf.

Na Figura 9, os resultados referentes aos deslocamentos verticais para a parede do ensaio 5 podem ser observados na foto tirada momentos antes da ruptura, com carga máxima de 25.000 kgf. Esses deslocamentos foram obtidos em todo o domínio medido com a aplicação da técnica DIC.

Na pesquisa de (Zahra et al., 2021) foram realizados ensaios experimentais de prismas de compressão com blocos vazados de concreto com características semelhantes às da presente pesquisa. Utilizando a técnica do método 2D-DIC, eles apresentaram seus resultados em termos de deformações. A Tabela Tabela 2 Percebe-se que os erros relativos foram da ordem de 21%, tomando como padrão aqueles apresentados na pesquisa de (Zahra et al., 2021). Essas diferenças são atribuídas às variações existentes entre as duas investigações, como o formato dos corpos de prova (prisma vs. paredes). Contudo, os resultados obtidos são encorajadores e motivam-nos a continuar a implementar a técnica em linhas de investigação experimentais.

Tabela 2. Comparação dos resultados obtidos com pesquisas anteriores

Referência	Deformações verticais máximas em compressão	Deslocamentos verticais médios máximos em compressão
(Zahra et al., 2021)	0,007 mm/mm	2,8 mm
Investigação atual, deslocamentos verticais momentos antes da falha	-	2,2 mm
Erro relativo		21 %

4. CONCLUSÕES

- O algoritmo proposto foi efetivamente verificado utilizando uma imagem sintética no software livre *Speckle Generator*. O erro relativo máximo obtido no campo de deslocamento foi de 0,053% para o deslocamento horizontal.
- Ao comparar os deslocamentos verticais entre as técnicas DIC e LVDT, constatou-se que estas apresentam grandes erros relativos, sendo a média máxima de 54,37% no teste da parede 3. Isso se deve a fatores como: distorção da lente, movimentos indesejados e aparecimento de fissuras ou descontinuidades no meio.
- Foram identificados os fatores que precisam ser calibrados para atingir a precisão desejada com a metodologia implementada.
- Esta pesquisa inicia o processo de implementação da técnica DIC e pode servir de base para futuras pesquisas e trabalhos experimentais.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Departamento de Engenharia Estrutural e Perícia do Instituto de Engenharia Civil da FIC, UANL e ao programa PAICYT: 595-IT-2022, 496-IT-2022 e 598-IT-2022.

6. REFERÊNCIAS

- Allaoui, S., Rekik, A., Gasser, A., Blond, E., Andreev, K. (2018). *Digital Image Correlation measurements of mortarless joint closure in refractory masonries*. Construction and Building Materials, 162, 334-344. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.055>
- Bermudo Gamboa, C., Martín-Béjar, S., Trujillo Vilches, F. J., Castillo López, G., Sevilla Hurtado, L. (2019). 2D–3D Digital Image Correlation Comparative Analysis for Indentation Process. *Materials*, 12(24).
- Bruck, H. A., McNeill, S. R., Sutton, M. A., Peters, W. H. (1989). *Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correction*. Experimental Mechanics, 29(3), 261-267. <https://doi.org/10.1007/BF02321405>
- Buljac, A., Jailin, C., Mendoza, A., Neggens, J., Taillandier-Thomas, T., Bouterf, A., Smaniotto, B., Hild, F., Roux, S. (2018). *Digital Volume Correlation: Review of Progress and Challenges*. Experimental Mechanics, 58(5), 661-708. <https://doi.org/10.1007/s11340-018-0390-7>
- Chu, T. C., Ranson, W. F., Sutton, M. A. (1985). *Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics*. Experimental Mechanics, 25(3), 232-244. <https://doi.org/10.1007/BF02325092>
- Destrebecq, J. F., Toussaint, E., Ferrier, E. (2011). *Analysis of Cracks and Deformations in a Full Scale Reinforced Concrete Beam Using a Digital Image Correlation Technique*. Experimental Mechanics, 51(6), 879-890. <https://doi.org/10.1007/s11340-010-9384-9>
- Dhanasekar, M., Prasad, P., Dorji, J., Zahra, T. (2019). *Serviceability Assessment of Masonry Arch Bridges Using Digital Image Correlation*. Journal of Bridge Engineering, 24(2), 04018120. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001341](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001341)
- Eurocode-6. (2005). *Design of masonry structures*. In Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures.
- Fayyad, T. M., Lees, J. M. (2014). *Application of Digital Image Correlation to Reinforced Concrete Fracture*. Procedia Materials Science, 3, 1585-1590. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.06.256>

- Howlader, M. K., Masia, M. J., Griffith, M. C. (2021). *Digital image correlation for the analysis of in-plane tested unreinforced masonry walls*. Structures, 29, 427-445. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.11.051>
- Hubert, S., Jean-José, O., Sutton, M. A. (2010). *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-0-387-78747-3>
- Jiroušek, O., Jandejsek, I., Vavřík, D. (2011). *Evaluation of strain field in microstructures using micro-CT and digital volume correlation*. Journal of Instrumentation, 6(01), C01039. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/6/01/C01039>
- Malesa, M., Szczepanek, D., Kujawińska, M., Świercz, A., Kołakowski, P. (2010). *Monitoring of civil engineering structures using Digital Image Correlation technique*. EPJ Web of Conferences, 6. <https://doi.org/https://doi.org/10.1051/epjconf/20100631014>
- Mojsilović, N., Salmanpour, A. H. (2016). *Masonry walls subjected to in-plane cyclic loading: application of digital image correlation for deformation field measurement*. International Journal of Masonry Research and Innovation, 1(2), 165-187. <https://doi.org/10.1504/IJMRI.2016.077473>
- NMX-C-036-ONNCCE-2013. (2013). *Resistencia a la compresión de bloques, tabiques o ladrillos y tabicones y adoquines*. In (pp. 10).
- NMX-C-061-ONNCCE-2015. (2015). *Determinación de la resistencia a la compresión de cementantes hidráulicos*. In (pp. 12).
- Orteu, J.-J. (2009). *3-D computer vision in experimental mechanics*. Optics and Lasers in Engineering, 47(3), 282-291. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2007.11.009>
- Pan, B. (2009). *Reliability-guided digital image correlation for image deformation measurement*. Applied Optics, 48(8), 1535-1542. <https://doi.org/10.1364/AO.48.001535>
- Pan, B., Li, K. (2011). *A fast digital image correlation method for deformation measurement*. Optics and Lasers in Engineering, 49(7), 841-847. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2011.02.023>
- Pan, B., Xie, H., Wang, Z. (2010). *Equivalence of digital image correlation criteria for pattern matching*. Applied Optics, 49(28), 5501-5509. <https://doi.org/10.1364/AO.49.005501>
- Quintana, K. T., Reu, P., Jimenez, E., Kramer, S. (2016). *Digital Volume Correlation for Materials Characterization* 19th World Conference on Non-Destructive Testing,
- Schreier, H., Orteu, J.-J., Sutton, M. A. (2009). *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements. Basic Concepts, Theory and Applications* (1 ed.). Springer New York, NY. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-0-387-78747-3>
- Schreier, H. W., Braasch, J. R., Sutton, M. A. (2000). *Systematic errors in digital image correlation caused by intensity interpolation*. Optical Engineering, 39, 2915-2921.
- Steven, C. C., Raymond, P. C. (2015). *Métodos numéricos para ingenieros*.
- Su, Y., Zhang, Q., Fang, Z., Wang, Y., Liu, Y., Wu, S. (2019). *Elimination of systematic error in digital image correlation caused by intensity interpolation by introducing position randomness to subset points*. Optics and Lasers in Engineering, 114, 60-75. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2018.10.012>
- Sutton, M. A., Wolters, W. J., Peters, W. H., Ranson, W. F., McNeill, S. R. (1983). *Determination of displacements using an improved digital correlation method*. Image and Vision Computing, 1(3), 133-139. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0262-8856\(83\)90064-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0262-8856(83)90064-1)
- Sutton, M. A., Yan, J. H., Tiwari, V., Schreier, H. W., Orteu, J. J. (2008). *The effect of out-of-plane motion on 2D and 3D digital image correlation measurements*. Optics and Lasers in Engineering, 46(10), 746-757. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2008.05.005>
- Valencia-Guzmán, E. (2021). *Aplicación de correlación de imagen digital en muretes fabricados en laboratorio* Universidad Autónoma de Nuevo León].

- Vendroux, G., Knauss, W. G. (1998). *Submicron deformation field measurements: Part 2. Improved digital image correlation*. *Experimental Mechanics*, 38(2), 86-92. <https://doi.org/10.1007/BF02321649>
- Zahra, T., Thamboo, J., Asad, M. (2021). *Compressive strength and deformation characteristics of concrete block masonry made with different mortars, blocks and mortar beddings types*. *Journal of Building Engineering*, 38, 102213. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102213>
- Zahra, T., Thamboo, J., Dorji, J., Asad, M., Kasinski, W., Nardone, A. (2023). *Out-of-plane flexural behaviour of reinforced mortarless concrete block masonry: An experimental study*. *Construction and Building Materials*, 384, 131448. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131448>
- Zhenxing Hu, Huimin Xie, Jian Lu, Tao Hua, Jianguo Zhu. (2010). *Study of the performance of different subpixel image correlation methods in 3D digital image correlation*. *Applied Optics*, 49(21), 4044-4051. <https://doi.org/10.1364/AO.49.004044>