

Correlação de Imagem Digital aplicada à alvenaria: uma revisão bibliográfica

Digital Image Correlation Applied to Masonry: a bibliographic review

Correlación de Imagen Digital aplicada a la albañilería: una revisión bibliográfica

Laura Barreto Azeredo¹
Niander Aguiar Cerqueira²

Resumo: A técnica de Correlação de Imagem Digital (DIC) tem se destacado na construção civil pela medição não invasiva e precisa dos campos de deslocamentos. Este artigo examina suas aplicações na Engenharia Civil, com ênfase na análise de alvenarias de fechamento e estruturais. A metodologia utilizada consiste em uma revisão sistemática da literatura, utilizando a *Web of Science (WoS)* como base para a seleção e análise de estudos relevantes sobre o uso da DIC. Os resultados mostraram a eficácia da DIC em diferentes contextos da Engenharia Civil. No entanto, quando restrita às alvenarias, apesar de evidenciar medições precisas e aplicações bem-sucedidas, ainda há necessidade de mais estudos para aprimorar sua aplicação, especialmente em alvenarias estruturais.

Palavras-chave: Correlação de Imagem Digital; Alvenaria estrutural; Monitoramento estrutural; Deslocamentos; Deformações.

Abstract: The Digital Image Correlation (DIC) technique has stood out in civil construction for its non-invasive and precise measurement of displacement fields. This article examines its applications in Civil Engineering, with an emphasis on the analysis of enclosing and structural masonry. The methodology used consists of a systematic review of the literature, using the Web of Science (WoS) as a basis for the selection and analysis of relevant studies on the use of DIC. The results showed the effectiveness of DIC in different Civil Engineering contexts. However, when restricted to masonry, despite showing precise measurements and successful applications, there is still a need for more studies to improve its application, especially in structural masonry.

Keywords: Digital Image Correlation; Structural masonry; Structural monitoring; Displacements; Deformations.

Resumen: La técnica de Correlación de Imágenes Digitales (DIC) ha destacado en la construcción civil por su medición no invasiva y precisa de campos de desplazamiento. Este artículo examina sus aplicaciones en Ingeniería Civil, con énfasis en el análisis de cerramientos y albañilería estructural. La metodología utilizada consiste en una revisión sistemática de la literatura, utilizando la Web of Science (WoS) como base para la selección y análisis de estudios relevantes sobre el uso de DIC. Los resultados mostraron la efectividad del DIC en diferentes contextos de Ingeniería Civil. Sin embargo, cuando se restringe a la albañilería, a pesar de mostrar mediciones precisas y aplicaciones exitosas, todavía se necesitan más estudios para mejorar su aplicación, especialmente en albañilería estructural.

Palabras-clave: Correlación de Imágenes Digitales; Albañilería estructural; Seguimiento estructural; Desplazamientos; Deformaciones.

Submetido 01/08/2024

Aceito 25/11/2024

Publicado 07/01/2025

¹ Graduanda em Engenharia Civil. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9572-009X>. E-mail: laurabarretoazeredo@gmail.com.

² Doutor em Engenharia Civil. Professor Associado da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8888-0871>. E-mail: niander@uenf.br.

Considerações Iniciais

Desenvolvida ao longo da década de 1980, quando pesquisadores começaram a explorar a visão computacional e o processamento de imagem, a técnica de Correlação de Imagem Digital (DIC), criada por pesquisadores da Universidade da Carolina do Norte, tornou-se objeto de estudo de diversos pesquisadores e cientistas que buscam aprimorá-la para aplicações nas mais diversas áreas. Ao longo dos anos, a evolução da técnica DIC trouxe contribuições significativas para vários setores, incluindo a Engenharia Civil.

A DIC foi originalmente projetada para analisar padrões de deformações por meio do processamento de imagens digitais, e por este motivo, no contexto da Engenharia Civil, destaca-se como uma ferramenta de grande importância para a análise de deformações e movimentos em estruturas. Essa importância decorre da crescente demanda por métodos de monitoramento não invasivos e precisos, que ofereçam uma compreensão aprofundada do comportamento estrutural. Desde então, muitos estudiosos têm investigado sua eficácia na área.

Esta técnica possibilita a análise de deformações sem contato físico, sendo simples, flexível e adaptável a diferentes materiais e situações. Sua aplicação divide-se em três etapas: preparação do corpo, obtenção dos dados e análise. Para sua aplicação, é necessária uma câmera fotográfica digital e um computador equipado com um software de correlação de imagens, tornando-a uma técnica de fácil uso e baixo custo, aplicável em diversas áreas (Beleza, 2017).

Atualmente, com a constante evolução tecnológica, que abrange melhorias significativas na qualidade das câmeras fotográficas, avanços computacionais e desenvolvimento contínuo de softwares especializados, os resultados alcançados por meio desta técnica estão atingindo níveis crescentes de precisão. Essa notável progressão tecnológica não apenas aprimora a fidelidade e a clareza das imagens capturadas, mas também contribui para a otimização do tempo necessário para a execução de tais procedimentos, proporcionando uma melhor eficiência na aplicação dessa técnica, como destacado por Silva (2019).

Este artigo analisa a aplicação da técnica DIC na construção civil, com foco especial em alvenarias. A abordagem inclui uma análise abrangente da literatura existente, explorando as metodologias adotadas e os resultados obtidos em estudos anteriores, visando proporcionar uma compreensão mais aprofundada do atual estado da DIC nesta área de estudo. A técnica DIC, conforme Oliveira (2022), sobressai-se em relação aos métodos convencionais de medição de deformações e deslocamentos. Sua capacidade de avaliar integralmente uma superfície a torna

aplicável a uma ampla variedade de materiais e condições de ensaio. Assim, a relevância deste artigo reside em contribuir para o avanço tecnológico no setor, no sentido de promover práticas mais precisas e eficazes para a análise de deformações e deslocamentos, consolidando a DIC como uma ferramenta valiosa na construção civil.

Técnica DIC

As deformações causadas por cargas aplicadas são cruciais para compreender as propriedades dos materiais utilizados nas estruturas. Para um projeto de dimensionamento estrutural, é fundamental quantificar as deformações que essas estruturas podem suportar para cumprirem seus objetivos, além de possibilitar a análise das distribuições de tensões e a determinação de outras propriedades essenciais para a Mecânica dos Materiais (Beleza, 2017).

A medição da deformação sempre foi central para o desenvolvimento da engenharia estrutural. Com o aumento da complexidade das estruturas contemporâneas, há uma necessidade crescente por técnicas de monitoramento em campo mais robustas, que, em conjunto com modelos numéricos, possam avaliar se essas estruturas atendem aos seus propósitos. As tecnologias atuais de extensômetros conseguem fornecer apenas um número limitado de medições pontuais, o que frequentemente não é suficiente para avaliar estruturas complexas (Hoult *et al.*, 2013).

Nesse contexto, a DIC surge como uma alternativa promissora, viabilizando a análise detalhada das deformações na superfície do corpo sem a necessidade de contato físico. Essa técnica envolve a análise de imagens consecutivas, capturadas opticamente antes e depois da deformação do corpo, por meio de um algoritmo de correlação de imagens. Para realizar a correlação, o algoritmo divide a imagem inicial em diversas seções que serão procuradas na imagem subsequente, onde cada seção irá corresponder a um conjunto de *pixels*.

Através da correlação, o algoritmo irá buscar a nova posição desses conjuntos de *pixels* na imagem posterior, determinando assim a intensidade desses *pixels*, para ser possível calcular os movimentos realizados por esses blocos de uma imagem para outra, em uma determinada região de interesse, obtendo assim os deslocamentos. As imagens podem ser adquiridas por uma câmera digital relativamente comum, com o suporte de uma iluminação adequada para garantir maior precisão nos resultados. A DIC é capaz de medir deformações no plano (2D) e fora do plano (3D), no entanto, para o 3D, são necessárias múltiplas câmeras, configuração e

calibração específica, o que possibilita a obtenção de informações mais abrangentes sobre o comportamento da estrutura (Beleza, 2017).

A técnica DIC é baseada na comparação e no rastreamento das posições de subconjuntos de *pixels* em imagens digitais. No entanto, sua precisão depende da qualidade das imagens capturadas, o que é influenciado diretamente pelas condições de iluminação e pela precisão da calibração dos equipamentos, interferindo assim nos resultados. Outro ponto relevante é que a área de interesse deve conter um padrão aleatório de alto contraste, fundamental para garantir que o software utilizado na análise consiga reconhecer com eficácia as posições dos subconjuntos correspondentes à superfície deformada.

Alvenaria convencional e Alvenaria Estrutural

A alvenaria convencional, também conhecida como alvenaria de vedação, é o modelo mais popular no Brasil devido à sua grande disponibilidade e versatilidade. Pode ser definida como um sistema não dimensionado para suportar cargas além do seu próprio peso, o que permite que seja cortada para a passagem de sistemas hidráulicos e elétricos, possuindo, assim, grande mobilidade arquitetônica. Além de promover conforto, é também responsável por proteger o ambiente de agentes externos, como ventos e chuvas (Gonçalves *et al.*, 2022). Ainda segundo Gonçalves *et al.*, (2022), por não ser autoportante, a alvenaria convencional é normalmente utilizada em conjunto com estruturas de concreto armado, que suportam os esforços e os transferem para as fundações, evitando que a alvenaria receba carregamento; por isso, deve ser projetada segundo os projetos arquitetônicos.

A alvenaria estrutural, técnica tradicional e consolidada, tem evoluído constantemente com os processos construtivos, resultando em uma ampla variedade de blocos com diferentes resistências e dimensões. Cerqueira *et al.* (2022, p.2) definem a alvenaria estrutural como “processo construtivo caracterizado por utilizar as paredes como principal estrutura de sustentação de edificação”, ou seja, suas paredes atuam como estruturas autoportantes. De acordo com Neto, Peluso e Carvalho (2015), seus blocos transmitem cargas diretamente para as fundações, diferentemente da alvenaria convencional. Na alvenaria estrutural, a resistência depende exclusivamente das alvenarias argamassadas, sejam blocos cerâmicos, de concreto ou tijolos de cerâmica maciça, todos com alta resistência à compressão, que, de forma combinada, resistem aos esforços de compressão.

Nesse contexto, a aplicação da DIC se destaca como uma ferramenta valiosa para a análise de alvenarias, tanto convencional quanto estrutural. Como evidenciado por Jank (2021), a DIC captura com precisão as deformações e tensões, apresentando resultados comparáveis aos de LVDTs, mas sem a necessidade de contato físico com os corpos de prova. Isso evidencia o potencial da DIC para uma avaliação detalhada do comportamento estrutural das alvenarias, facilitando a identificação de regiões críticas e contribuindo para a segurança das edificações.

Metodologia

Este estudo explora a aplicação da técnica DIC na Engenharia Civil, com foco em alvenarias. A metodologia adotada é qualitativa e aplicada, centrada em uma revisão bibliográfica sistemática da literatura para aprofundar a compreensão da técnica. A revisão bibliográfica sistemática, segundo Conforto, Amaral e Silva (2011, p.1), “é um método científico para busca e análise de artigos de uma determinada área da ciência”. Ainda segundo Galvão e Ricarte (2020), trata-se de uma abordagem metodológica estruturada que segue protocolos rigorosos, visando organizar, analisar e sintetizar um grande volume de documentos científicos. Essa técnica garante a reprodutibilidade dos resultados, detalhando bases de dados consultadas, estratégias de busca, critérios de seleção e exclusão, e limitações identificadas, proporcionando uma visão clara e confiável do estado da arte em um campo específico.

A base de dados escolhida foi a *Web of Science (WoS)*, uma renomada plataforma criada em 1964 pela *Clarivate Analytics*, que possui mais de 74 milhões de registros. A plataforma é conhecida por sua coleção núcleo, que inclui as revistas mais influentes, além de suas ferramentas analíticas e indicadores bibliométricos que avaliam o desempenho e impacto das pesquisas (Costa, Silva e Assunção, 2023 *apud* Alperstedt, 2016). O período analisado é de 2013 a 2023, com descritores como "Correlação de Imagem Digital", "DIC", "construção civil", "alvenarias" e "análise estrutural". Esta etapa possibilita o acesso a informações atualizadas e relevantes sobre a técnica.

Na etapa seguinte, foram analisados qualitativamente no *VOSviewer* os dados exportados da plataforma *WoS*, focando especificamente nos artigos da área de Engenharia Civil. Os dados exportados incluíram informações bibliográficas completas, como títulos, autores, palavras-chave, resumos, referências, entre outras informações disponíveis na plataforma. Esses dados foram então processados pelo *software VOSviewer*, utilizado para criar

mapas de redes bibliométricas, que permitem a análise detalhada das citações, cocitações, palavras-chave e padrões de colaboração entre autores e países. A ferramenta gera visualizações que ilustram as relações entre autores, instituições e países, facilitando a identificação de padrões e tendências na literatura.

A análise dos artigos científicos selecionados foi a etapa subsequente. Esta análise foi estruturada em duas partes principais:

1. Visão Geral da Aplicação da DIC: Consistiu em uma revisão dos artigos para entender como a técnica DIC tem sido aplicada em contextos gerais da Engenharia Civil. Foram identificados os principais métodos de aplicação, áreas de uso e os tipos de projetos onde a DIC tem sido implementada.

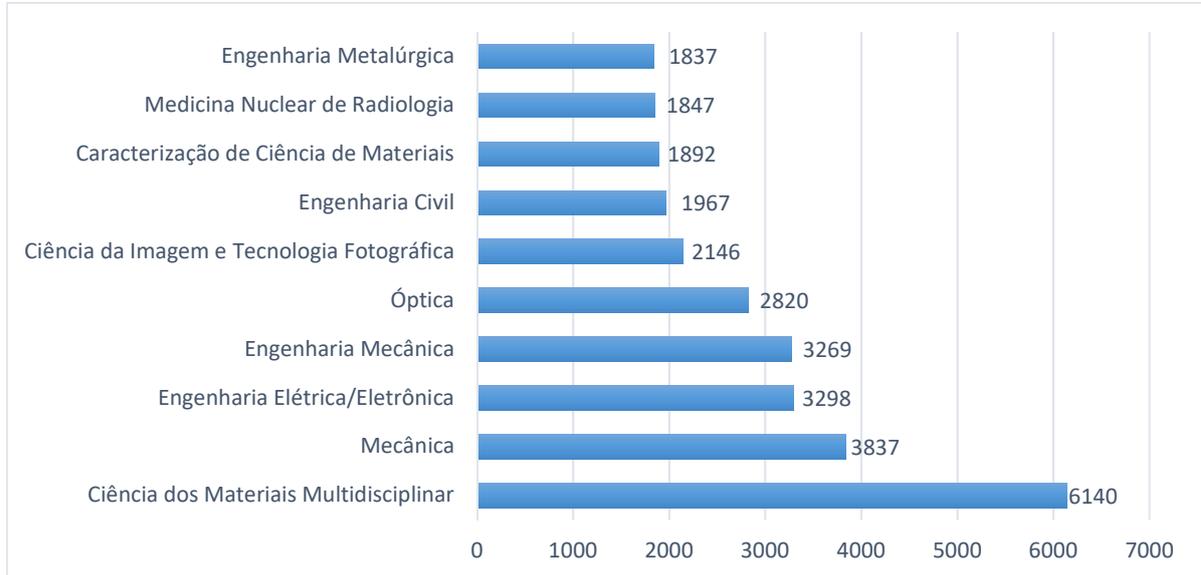
2. Enfoque Específico em Alvenarias: esta parte da análise envolveu a avaliação detalhada dos artigos que discutem a aplicação da DIC em alvenarias de fechamento e estruturais, investigando como a técnica foi aplicada a esses contextos e os resultados obtidos.

Cada estudo foi analisado para compreender os métodos de aplicação da DIC, sob a luz dos objetivos da pesquisa e os resultados obtidos. Essa análise detalhada permitiu identificar as diferentes formas de utilização da técnica DIC, seus benefícios e limitações, fornecendo uma compreensão mais profunda de sua eficácia e aplicação prática.

Análise de Dados e Resultados

A pesquisa começou com uma investigação sobre a técnica DIC na plataforma *WoS*, utilizando suas ferramentas de análise para refinar os resultados. Esse levantamento inicial indicou que, nos últimos anos, foram publicados 32.119 estudos relacionados à técnica DIC. Para concentrar o foco na aplicação específica na Engenharia Civil, foi utilizado o filtro “Áreas de Conhecimento”, o que resultou na identificação de 1.967 publicações voltadas para essa área. Esse resultado é apresentado no gráfico da Figura 1, que mostra a distribuição das publicações por áreas, destacando os trabalhos dedicados à Engenharia Civil.

Figura 1 - Publicações por categorias



Fonte: Elaborado pelos autores com base nos dados coletados na *Web of Science* (2024).

Os dados coletados na *WoS* revelaram uma clara ascensão no interesse e na pesquisa sobre a DIC na Engenharia Civil. Este crescimento é evidenciado pelo significativo aumento no número de publicações entre os anos de 2013 e 2023. Durante este período, observou-se um salto notável de 53 publicações para 346 em um único ano, indicando um avanço substancial no conhecimento e na aplicação da DIC neste campo específico de estudo.

Figura 2 - Gráfico com indicativo de publicações por ano.



Fonte: Elaborado pelos autores com base nos dados coletados na *Web of Science* (2024).

a quantidade de citações recebidas por cada autor, uma vez que os dados exportados incluem as referências de cada artigo. As citações representam o número de vezes que os trabalhos desses autores foram citados por outros artigos na base de dados. Essa análise facilita a avaliação dos dados, eliminando a necessidade de ler todos os artigos individualmente. A partir dos dados obtidos pela *WoS* e *VOSviewer*, elaborou-se a tabela 1, a seguir, com os 10 principais autores. Destaca-se ainda que, três desses pesquisadores são chineses e, considerando o somatório das respectivas publicações, reafirma-se o que foi apresentado anteriormente na figura 3 que mostra a China como o país com o maior número de estudos sobre o tema.

Tabela 1 – Autores mais relevantes.

AUTOR	DOCUMENTOS	CITAÇÕES	PAÍS DE DESTAQUE
Aggelis, Dimitrios G.	19	335	Bélgica
Chen, Xudong	19	113	China
Moreira, Pedro M. G. P.	18	119	Portugal
Kim, Youngsoo Richard	17	402	Estados Unidos
Tsangouri, Eleni	17	392	Bélgica
Romeo, Elena	17	343	Itália
Wang, Lei	17	245	China
Tavares, Paulo J.	17	179	Portugal
Hoult, Neil A.	16	285	Canadá
Li, Jian	16	95	China

Fonte: Elaborado pelos autores com base nos dados extraídos na *Web of Science* e *VOSviewer* (2024).

Os autores têm contribuído significativamente para a evolução da técnica DIC, com pesquisas relevantes em diversas áreas. Aggelis, em estudo conduzido por Dzaye *et al.* (2019), aplicou a DIC na quantificação de recalques e retração em argamassa de cimento fresca, enquanto Chen, um dos autores do estudo de Bu *et al.* (2020), analisou a propagação de fissuras em concreto sob diferentes taxas de carregamento. Dentro do âmbito de materiais asfálticos, a técnica DIC foi empregada em estudos para verificar a análise de campos de deformação e

fenômenos de fissuração e para a caracterização destes materiais, pesquisas estas feitas por Kim (em Buttlar *et al.*, 2014) e Romeu (2013), respectivamente.

Wang *et al.* (2023), em suas pesquisas, investigaram o comportamento mecânico à fratura do concreto reforçado com fibras de basalto submetido a altas temperaturas através da técnica DIC. Em colaboração com Al-Salih *et al.* (2019), Li explorou a eficácia da DIC em testes de cargas em tempo real para grandes estruturas, visando à inspeção de pontes. Dentre os pesquisadores mencionados acima, outros dois também contribuíram com estudos a respeito da utilização da técnica DIC em grandes estruturas. Moreira (em Barros *et al.*, 2022) utilizou a DIC para monitorar os deslocamentos de uma passarela de pedestres, enquanto Tavares, em coautoria com Souza *et al.* (2019) realizou medições das deflexões de uma ponte. Essas pesquisas destacam os avanços e a diversidade de aplicações da DIC na Engenharia Civil, ressaltando sua importância crescente no campo.

Ao realizar uma análise das palavras-chave mais frequentemente associadas (gráfico da figura 4), é evidente a correlação entre o uso da DIC e suas aplicações primárias em acompanhamento de deslocamentos, análise de deformações, avaliação de comportamento e análise de propriedades mecânicas. Termos esses que oferecem uma visão abrangente dos objetivos e das potencialidades da técnica DIC.

que não é 100% confiável.

Para isso, testes laboratoriais foram conduzidos em vigas de concreto armado para avaliar a capacidade da DIC em medir deformações e deslocamentos. Na pesquisa, foram utilizadas câmeras de imagens digitais para a captura das imagens, com correlações feitas pelo software ARAMIS, um software de análise de imagens que possibilita averiguar a geometria da superfície de deslocamento e deformações. Medições de campo em três pontes reais foram realizadas para validar a eficiência da técnica DIC no monitoramento estrutural.

A DIC foi utilizada para realizar demonstrações da quantificação de lascamentos, monitorar fissuras e rastrear o movimento relativo entre diferentes membros estruturais, que demonstrou a eficácia da técnica para o monitoramento da saúde estrutural de pontes, concluindo assim, que a técnica pode medir deformações e deslocamentos, localizar fissuras não visíveis a olho nu e quantificar os lascamentos, com resultados similares aos obtidos por extensômetros de fibra óptica. Contudo, apesar do evidente potencial, deve-se ressaltar a necessidade de mais pesquisas para enfrentar alguns desafios e restrições de sua utilização para garantir maior eficácia.

Santos *et al.* (2015) estudaram o efeito escala, utilizando a DIC, um aspecto de grande relevância para estruturas de concreto, que tem influência sobre a resistência, fragilidade e ductilidade das estruturas. Os testes foram conduzidos em laboratórios, submetendo vigas a ensaios de flexão em três pontos. Para aplicar a DIC, as imagens foram capturadas por um microscópio USB de alta resolução com sensor de imagem de 2.0 Megapixels e iluminação provida pelos próprios *leds* integrados, com o qual as imagens foram capturadas em 5 quadros por segundo.

As imagens foram tratadas pelo software LabView, para analisar os movimentos de translação e rotação dos padrões. Antes dos ensaios, as vigas foram polidas e marcadas por uma malha de espaçamentos regulares para melhor monitoramento dos padrões. Os resultados obtidos através da DIC foram comparados com resultados de ensaios tradicionais, o que possibilitou concluir que a DIC é uma técnica efetiva para cálculo de deslocamentos e observação do efeito escala na ductilidade estrutural das vigas estudadas, sem a necessidade de contato físico.

Santos *et al.* (2015) realizaram um estudo sobre o uso da técnica DIC para a determinação do módulo de elasticidade do concreto devido às significativas vantagens do uso

dessa técnica, quando comparadas a métodos tradicionais, como precisão ajustável, flexibilidade de aplicação e custo-benefício. Para isso, foi utilizado um microscópio USB com captura de imagens a cada cinco quadrados por segundo em uma região de 2,0 cm por 1,5 cm, com sensor de imagens de 1,2 megapixels e resolução de captura de vídeo de 1280 x 960 pixels. A iluminação foi provida por lâmpadas de LED e um software de processamento de imagens foi desenvolvido através do LabVIEW para obter os deslocamentos e deformações.

As imagens capturadas durante os testes de compressão foram correlacionadas com as cargas aplicadas para gerar uma curva tensão-deformação, permitindo, assim, a determinação do módulo de elasticidade longitudinal do concreto submetido à compressão. Para fins de comparação, os resultados obtidos a partir da DIC foram cotejados com os resultados obtidos por meio do método tradicional de Clips Gauges. A partir dessa análise, foi possível comprovar a eficácia da técnica DIC, uma vez que, com o uso da DIC, os resultados se mostraram similares aos do método tradicional usado, provando que a técnica pode ser usada na determinação das propriedades mecânicas do concreto e que é possível aplicá-la a materiais heterogêneos.

Le *et al.* (2019) conduziram uma pesquisa sobre a aplicação da técnica DIC para medição de deformações de estruturas de concreto em altas temperaturas, visto que a confiabilidade dos dados sobre como o concreto se deforma em altas temperaturas é crucial para prever com eficácia o seu comportamento. Neste artigo, os autores fazem uma análise dos métodos já existentes para medir as deformações de concretos em altas temperaturas, destacando seus desafios e limitações, para em seguida apresentar um método recém-desenvolvido que utiliza a tecnologia 3D DIC.

Para este estudo foram utilizadas 5 câmeras de 5 *megapixels* com lentes de 75mm, as imagens capturadas foram analisadas pelo software VIC - 3D para ser possível extrair os deslocamentos e deformações necessárias. Contudo, para garantir a qualidade das imagens, algumas medidas foram necessárias. Assim, um filtro de passagem de banda Midopt BP470 foi utilizado para limitar a quantidade de radiação térmica transmitida para as câmeras e um filtro de luz azul EFFI- Lase-Power-CM-C02-465 foi usado para melhorar a iluminação.

A metodologia adotada envolveu o uso de painéis radiantes para garantir condições térmicas consistentes e os ensaios foram realizados em cilindros de concreto com padrões de *speckle* nas superfícies. Por fim, os resultados obtidos pela DIC foram comparados com dados coletados durante os ensaios por um atuador e extensômetros de deformação, que demonstraram

uma boa concordância, podendo assim comprovar a confiabilidade da técnica DIC, tanto em temperatura ambiente quanto sob temperaturas elevadas.

Assis *et al.* (2021) realizaram um estudo visando à elaboração de mapa de previsão de fratura utilizando a DIC 2D – CID 2D, com o intuito de prever fraturas induzidas por compressão axial, um aspecto de considerável importância para a construção civil. Assim, cinco corpos de provas com resistência à compressão de 40 MPa foram testados, conforme a ABNT NBR 5739/2018, adquirindo-se imagens digitais dos corpos de concreto durante os testes conforme a DIC-2D.

A metodologia incluiu um sistema de aplicação de cargas capaz de causar deformações nos corpos devido à compressão axial. As imagens foram captadas por uma câmera digital Canon EOS 70D, com lente de 18-55mm, montada em um tripé a um metro do alvo. Lâmpadas UV foram utilizadas para evitar sombras nas imagens. Um algoritmo digital do software NCORR correlacionou as imagens, dividindo-as em blocos para determinar sua nova posição pela função de custo de correlação cruzada normalizada, permitindo calcular o movimento do bloco de uma configuração para outra.

Um mapa de deformação e sua sobreposição na imagem do corpo de prova foi elaborado para verificar se a fratura correspondeu à previsão da DIC. Ao final, concluiu-se que aproximadamente 67% das amostras exibiram áreas de tensões acumuladas, indicando os locais propensos à ruptura e possibilitando elaboração do mapa de previsão de fratura, além de fornecer informações sobre a deformação e propagação de trincas em corpos de concreto.

Correlação de Imagem Digital aplicada a Alvenaria Convencional e Estrutural

Nesta parte, explora-se como a técnica foi empregada em diferentes tipos de alvenarias, investigando os métodos utilizados e os resultados alcançados.

Salmanpour e Mojsilović (2013) realizaram um estudo sobre a aplicação da DIC para medições de deformação de grandes paredes de alvenaria. A pesquisa consistiu na realização de testes estático-cíclicos em paredes de alvenaria estrutural em escala real. Ao todo, realizaram 11 testes, separados em duas fases: preliminar e principal. Foram usados blocos de argila como bloco principal e de silicato de cálcio como secundário, em que o intuito foi analisar os fatores que afetam a capacidade de deformação de sistemas de alvenaria não armada.

A técnica DIC foi utilizada para obtenção de deslocamentos e deformações em todo o

campo. A preparação da amostra iniciou-se com a aplicação de um padrão *speckle* de contraste na superfície. As amostras foram revestidas com tinta branca e, posteriormente, de forma aleatória, manchas pretas foram feitas para garantir maior precisão dos resultados. Para a obtenção das imagens, utilizaram-se duas câmeras DSLR convencionais, uma Nikon D3 e uma Nikon D800E, posicionadas a 5 e 6 metros da amostra. Um conjunto de iluminação de *flash Elinchrom Style RX 1200* garantiam uma iluminação uniforme e constante. O processamento de imagens foi realizado através do software VIC-2D para obtenção das deformações e dos deslocamentos.

Além da DIC, transdutores de deslocamento linear variável (LVDTs) foram usados para confirmar a precisão da técnica de correlação. Ao final dos estudos, ficou comprovada a eficiência da técnica DIC para medição de deslocamentos e deformações, mesmo em grandes dimensões, garantindo resultados com elevada precisão e resolução espacial.

Nghiem *et al.* (2014) lideraram uma pesquisa baseada no método da correlação de imagens digitais para avaliação de danos em estruturas de alvenaria devido à abertura de juntas, visando desenvolver uma nova abordagem para avaliar danos em estruturas em alvenaria. Utilizaram a DIC para analisar os deslocamentos dos blocos e identificar fissuras próximas às juntas. Quatro câmeras de alta resolução em configuração estéreo mediram deslocamentos tridimensionais, e os dados foram analisados pelo software VIC-3D, que também mediu tensões e deformações. Imagens estáticas foram usadas para quantificar erros de medição antes dos testes, e os deslocamentos obtidos foram considerados erros sistemáticos, posteriormente avaliados na análise dos danos.

O estudo utilizou um modelo físico em escala reduzida para reproduzir a interação solo-estrutura e a estrutura de alvenaria, de onde as imagens foram captadas pelo sistema de câmeras para posterior análise DIC. Em uma etapa posterior, os blocos foram reconstruídos e as fissuras quantificadas com base nos dados da DIC, considerando localização, comprimento, orientação e largura em dois exemplos de estruturas sujeitas a movimentos do solo induzidos por escavações.

Os resultados obtidos foram comparados com indicadores convencionais para avaliação de dados, garantindo informações mais precisas e detalhadas a respeito da localização, comprimento, largura e orientação das fissuras nas estruturas de alvenaria, comprovando assim, a eficácia da combinação da técnica DIC com a modelagem física em escala reduzida em

alvenaria, o que possibilita seu uso para melhor compreensão dessas estruturas sob condições de carregamento distintas. A análise DIC revelou os padrões de fissuras nas paredes de alvenaria e forneceu uma representação visual dos deslocamentos e deformações da amostra.

Por fim, a análise também mostrou a integridade dos pilares e dos tímpanos durante o carregamento cíclico. O artigo fornece procedimentos detalhados para o uso de DIC em testes de paredes de alvenaria em larga escala e discute os fatores que afetam a precisão das medições de DIC, como subconjuntos e tamanhos de degraus, o que contribui para uma melhor compreensão do comportamento e dos modos de falha das paredes de URM e demonstram a eficácia do DIC na análise destas estruturas.

Ramos *et al.* (2015) estudaram sobre a DIC 2D e 3D na Engenharia Civil, mais especificamente para medições e monitoramento em paredes de alvenaria. Foram realizados dois testes com o objetivo de demonstrar a capacidade da DIC em monitorar grandes amostras e estruturas, sendo eles, o teste de cisalhamento no plano e o teste cíclico fora do plano.

Para medir os campos de deslocamentos, utilizaram-se duas câmeras CMOSIS de 4.1 megapixels, lentes Schneider-Kreuznach de 16 mm e o software VIC-3D para análise das imagens. Para os testes de cisalhamento no plano, a técnica aplicada foi a DIC-2D. Assim, apenas uma câmera foi necessária para realizar as medições. Já para as medições em 3D, foi empregado um padrão de calibração de 1,5 x 1,5 metros para ser possível medir os parâmetros intrínsecos e extrínsecos das câmaras e permitir uma reconstrução estéreo da superfície pelo VIC-3D. O corpo de prova foi uma parede de alvenaria de 4,22 x 2,20 metros com um quadro de concreto armado. Antes de aplicar a técnica DIC, a parede teve sua superfície coberta por uma tinta branca e, em seguida, um estêncil de vinil com pontos independentes de 4 mm de diâmetro foi transferido para a superfície da parede.

Para fins de comparação e comprovação de eficácia, a parede foi equipada com diversos transdutores de deslocamento linear (LVDT) ao redor do quadro para o teste no plano e perpendicular à parede de alvenaria para o teste fora do plano. Os resultados mostraram a eficácia das medições feitas pela DIC devido à concordância com as medições feitas pelos LVDTs. Técnicas de pós-processamento como filtragem e desenrolamento foram utilizadas para aprimorar os dados obtidos, revelando danos comuns em paredes de alvenaria, como o esmagamento dos cantos e a separação entre o fechamento e a estrutura. Concluiu-se que a DIC é uma técnica eficaz e versátil para o monitoramento de saúde estrutural em construções de

alvenaria.

Kumar, Aravind e Hossiney (2019) investigaram o uso da DIC para medir deformações em tijolos de alvenaria através do programa 2D MATLAB de código aberto Ncorr, visando comprovar a eficiência desta técnica, quando comparados com métodos de medições tradicionais, como extensômetros e LVDTs, que são limitados a medições pontuais. Para os testes, um prisma de alvenaria de 520 mm de altura, 220 mm de largura e 100 mm de espessura e resistência média de 7,65 MPa, foi escolhido, devido à sua heterogeneidade.

Para captura das imagens da superfície do espécime, foi utilizada uma câmera DSLR de 12 megapixels. Essa captura ocorria em intervalos regulares de 10 segundos, e a posição da câmera não foi alterada em nenhum momento do teste. A iluminação foi controlada para garantir maior precisão. Como já mencionado, as imagens foram analisadas pelo MATLAB 2D de código aberto Ncorr, juntamente com a caixa de ferramentas de processamento de imagem do MATLAB.

Comparados os valores das deformações obtidos por meio da DIC com os resultados obtidos pelos métodos convencionais, constatou-se que os resultados da deformação na ruptura foram semelhantes em ambos os métodos.

A pesquisa mostrou a precisão da DIC para capturar o padrão de falha do corpo de prova de forma progressiva e sua capacidade de localizar as coordenadas exatas dos valores da deformação mínima e máxima, realçando assim, o potencial da DIC para o fornecimento de valores precisos de deformação o seu potencial para monitoramento da saúde estrutural de alvenarias.

Howlader *et al.* (2020) estudaram a respeito do uso da DIC para análise do comportamento de paredes de alvenaria não armada (URM) sob carregamento cíclico no plano. O objetivo foi medir com precisão as deformações que ocorrem nas subestruturas dos pilares e tímpanos durante os testes e capturar a fissuração das alvenarias. Foram testadas oito paredes URM em escala real com aberturas, onde a DIC foi utilizada em paralelo com instrumentos tradicionais para a medição de deformações e para realizar o mapeamento de fissuras.

Para aplicação da DIC, foi necessária uma câmera NIKON D850 com sensor CMOS retro iluminado de 45,7 MP e quadro completo de 35,9 × 23,9 mm, equipada com lente Nikon FX 35 mm f/1.8 G, 2, um tripé para centralizar a câmera em relação à parede, ajustado para que o plano da parede estivesse paralelo ao sensor da câmera e dois *flashlights Elinchrom Style RX*

1200 para fornecer iluminação uniforme. O processamento e a correlação de imagens foram feitos pelo software VIC-2D, que possibilitou uma representação visual dos deslocamentos verticais e horizontais e os contornos de tensão principal.

Este artigo fornece procedimentos detalhados para o uso da DIC aplicada em testes de paredes de alvenaria em grande escala e discute os principais fatores que afetam a precisão desta técnica. A análise feita pela DIC revelou a existência de padrões de fissuração nas paredes de alvenaria, além da representação visual de seus deslocamentos e deformações da amostra, e de mostrar a integridade dos pilares e dos tímpanos durante o carregamento cíclico. A pesquisa foi capaz de comprovar que paredes de URM com aberturas são mais propensas a danos quando comparadas a paredes sólidas, contribuindo para uma melhor compreensão do comportamento e dos modos de falhas deste tipo de parede, demonstrando a eficácia da técnica DIC também para análise destas estruturas.

Stazi *et al.* (2020) utilizaram a DIC em seu estudo experimental para avaliar a deformação e o comportamento mecânico de um novo bloco de alvenaria feito a partir de solo extrudado. Para a DIC, utilizaram-se três câmeras Pixelink B371F, com sensor CMOS, resolução de 1280x1024 pixels, taxa de 27 fps e C-mount, sendo que, duas câmeras foram posicionadas na parte frontal e uma na traseira para medir deslocamentos e deformações.

Foram utilizadas 12 pequenas amostras construídas com os blocos extrudados, denominados *wallettes* e submetidas a testes de compressão, compressão diagonal e cisalhamento combinado. Para receber a DIC, a superfície das amostras foi preparada com pulverização de textura preta e branca. As imagens capturadas foram processadas por meio de um software que permite a aplicação da DIC-3D para obter o campo de deslocamento e deformação em cada ponto da parede.

Ao final dos testes, a DIC mostrou que a alvenaria se comportou como uma série de colunas independentes nos testes de compressão, com deslizamento diferencial entre as colunas. A técnica também determinou os campos de deformações e falhas dos blocos e forneceu informações detalhadas sobre o comportamento mecânico dos *wallettes* sob diferentes condições de carga, auxiliando os desenvolvedores dos blocos a identificar adaptações necessárias para melhorar o produto.

Basha *et al.* (2022) conduziram um estudo sobre o efeito dos padrões de ligação estrutural nas características mecânicas da alvenaria de tijolos cerâmicos sob diferentes

carregamentos, utilizando a técnica DIC, em que dois padrões de ligação estrutural, do tipo flamenga e empilhada, foram analisados sob condições de compressão, flexão e cisalhamento. Para isso, tijolos de argila de $225 \times 105 \times 48$ mm foram fabricados localmente por extrusão e testados.

Para continuidade dos estudos, dois modelos de prisma de alvenaria foram construídos: um utilizando meio tijolo de espessura e outro um tijolo inteiro, mantendo uma junta de argamassa fixa de 12 a 15mm. Em seguida, ambos foram testados sob controle de deslocamento a uma taxa de 0,5 mm por minuto usando um sistema de aquisição de dados. Para medir a deformação e as tensões ao longo de toda a superfície dos prismas utilizou-se a técnica DIC.

Para a aplicação da DIC, a superfície dos prismas foi limpa e submetida à aplicação de uma camada de contraste branco, onde se aplicou um padrão de pontos pretos para permitir o rastreamento dos pontos individuais pelo algoritmo. A captura das imagens foi feita por uma câmera de varredura de área CMOS Falcon 2, equipada com uma lente telefoto Nikon de longa distância focal 1: 2,8D de 14mm com resolução de 12 megapixels. Para garantir uma iluminação uniforme, a escolha foi por luzes de estúdio LED Bescor AL-576K. As imagens foram capturadas em sequência cronometrada de 1 segundo até a falha dos prismas e analisadas pelo software VIC-2D, que forneceu informações completas sobre deformações e tensões.

Concluiu-se que a técnica DIC é eficiente para avaliar as características de deformação linear e detectar danos precocemente. Além disso, o estudo mostrou que as propriedades mecânicas em alvenarias sofrem influências pelos padrões de ligação estrutural, e que a DIC se mostrou de grande relevância para a compreensão dos mecanismos de falha, ressaltando a necessidade de modelos analíticos que possam prever o comportamento de tensão-deformação compressiva de construções em alvenaria.

Considerações Finais

Os estudos revisados neste artigo enfatizam, de forma consistente, os resultados positivos a respeito da aplicação da técnica DIC em diversos setores da construção civil. Tornou-se evidente, pois, o futuro promissor desta tecnologia, que ainda se encontra em desenvolvimento, mas que já apresenta resultados positivos e significativos.

Quanto à aplicação da técnica DIC diretamente no âmbito da alvenaria e, em especial, da alvenaria estrutural, mesmo tendo sua eficiência comprovada por pesquisas que aqui foram

apresentadas, ainda é evidente a existência de lacunas consideráveis a serem preenchidas, devido à escassez de estudos mais abrangentes e detalhados nesta área, o que destaca a necessidade de pesquisas mais aprofundadas.

As pesquisas disponíveis até o momento e o constante aprimoramento das tecnologias necessárias para a sua aplicação, oferecem uma visão promissora que evidencia o potencial da DIC para estudar, avaliar as propriedades, compreender seus comportamentos e monitorar estruturas em alvenaria, através deste método não invasivo. No entanto, para consolidar plenamente sua aplicabilidade na alvenaria, é necessário um comprometimento contínuo com pesquisas adicionais e específicas, garantindo sua adaptação às demandas deste contexto construtivo.

Assim, enquanto os significativos avanços alcançados por esta técnica até o momento são reconhecidos, é crucial incentivar e apoiar novas pesquisas, visto que, este comprometimento contínuo com a investigação e inovação permitirá expandir a técnica DIC, o que irá possibilitar uma aplicação mais eficiente e confiável, contribuições estas que, certamente, são de grande valia para a evolução e crescimento da indústria da construção civil pelo mundo.

Referências

AL-SALIH, H.; JUNO, M.; COLLINS, W.; BENNETT, C.; LI, J.; SUTLEY, E. J. Evaluation of a Digital Image Correlation Bridge Inspection Methodology on Complex Distortion-Induced Fatigue Cracking. **Procedia Structural Integrity**, Amsterdã, v. 17, ago.2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.08.091>>. Acesso em: 01 jun. 2024.

ASSIS, L. S. de; ASSIS, J. T. de; PESSOA, J. R. C.; JÚNIOR, A. D. T. Elaboration of fracture prediction map using 2D digital image correlation - 2D CID. **IBRACON Structures and Materials Journal**, São Paulo, v. 15, n. 4, set./nov. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1983-41952022000400003>>. Acesso em: 28 nov. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738. Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.

BARROS, F.; AGUIAR, S.; SOUSA, P. J.; CACHAÇO, A.; TAVARES, P. J.; MOREIRA, P. M.; G. P.; RANZAL, D.; CARDOSO, N.; FERNANDES, N.; FERNANDES, R.; HENRIQUES, R.; CRUZ, P. M.; CANNIZZARO, A. Displacement monitoring of a pedestrian bridge using 3D digital image correlation. **Procedia Structural Integrity**, Amsterdã, v. 37, fev.2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.02.022>>. Acesso em: 14 jun. 2024.

BASHA, S. H; GUO, Z-X; XIE, X. Effect of Structural Bonding Patterns on Mechanical Characteristics of Clay Brick Masonry under Different Loadings Using Digital Image Correlation Technique. **Journal of Materials in Civil Engineering**, Reston, v. 32, n. 11, set./nov. 2022. Disponível em: <[https://doi.org.ez81.periodicos.capes.gov.br/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004457](https://doi.org.ez81.periodicos.capes.gov.br/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004457)>. Acesso em: 8 dez. 2023.

BELEZA, Sílvia Cristiana Almeida. **Medição de deformações através da técnica de Correlação Digital de Imagem**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2017.

BU, J.; CHEN, X.; HU, L.; YANG, H. Experimental Study on Crack Propagation of Concrete Under Various Loading Rates with Digital Image Correlation Method. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, Berlin, v. 14, n. 25, mai. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1186/s40069-020-00400-5>>. Acesso em: 14 jun. 2024.

BUTTLAR, W. G.; HILL, B. C.; KIM, Y. H.; KUTAY, M. E.; MILLIEN, A.; MONTEPARA, A.; PAULINO, G. H.; PETIT, C.; POP, I. O.; ROMEO, E.; RONCELLA, R.; SAFAVIZADEH, S. A.; TEBALDI, G.; WARGO, A. Digital image correlation techniques to investigate strain fields and cracking phenomena in asphalt materials. **Materials and Structures**, Berlin, v. 47, n.8, ago. 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1617/s11527-014-0362-z>>. Acesso em: 14 jun. 2024.

CERQUEIRA, N. A.; SOUZA, V.; ALEXANDRE, J.; XAVIER, G. C.; FEDIUK, R.; MONTEIRO, S. N.; BARRETO, M. N.; AZEVEDO, A. R. G. de. Mechanical Feasibility Study of Pressed and Burned Red Ceramic Blocks as Structural and Sealing Masonry. **Materials**, Basel, 2022, v. 15, n.5004, jun./jul.2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/ma15145004>>. Acesso em: 8 jan. 2024.

CONFORTO, E. C.; AMARAL, D. C.; SILVA, S. L. da. Roteiro para revisão bibliográfica sistemática: aplicação no desenvolvimento de produtos e gerenciamento de projetos. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO, 8, 2011, Porto Alegre. **CBGDP**. 2011. P. 1-12. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2205710/mod_resource/content/1/Roteiro%20para%20revis%C3%A3o%20bibliogr%C3%A1fica%20sistem%C3%A1tica.pdf>. Acesso em: 27 ago. 2024.

COSTA, D.; SILVA, G. J. C.; ASSUNÇÃO, M. A. de. Scopus vs. Web of Science: uma avaliação comparativa das principais bases de dados para a pesquisa acadêmica. **Cadernos do FNDE**, Brasília, v. 4, n. 9, p. 1-6, mar./dez 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.5281/zenodo.10777653>>. Acesso em: 28 ago. 2024.

DZAYE, E. D.; TSANGOURI, E. SPIESSENS, K.; SCHUTTER, G. D.; AGGELIS, D.G. Digital image correlation (DIC) on fresh cement mortar to quantify settlement and shrinkage. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, Amsterdã, v. 19, n.1, jan./mar. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.acme.2018.10.003>>. Acesso em 01 jun. 2024.

GALVÃO, M. C. B.; RICARTE, I. L. M. Revisão sistemática da literatura: conceituação, produção e publicação. **LOGEION**, Rio de Janeiro, v. 6, n. 1, set. 2019/fev. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.21728/logcion.2019v6n1.p57-73>>. Acesso em: 25 ago. 2024.

GONÇALVES, L. S.; CAZELLA, P. H. S.; AGIADO, A. C.; PEDREIRO, M. R. M. Análise comparativa entre alvenaria convencional e alvenaria estrutural. **Revista Ibero**, São Paulo, v. 8, n. 11, nov. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.51891/rease.v8i11.7851>>. Acesso em: 10 dez. 2023.

HOULT, N. A.; TAKE, W. A.; LEE, C.; DUTTON, M. Experimental accuracy of two dimensional strain measurements using Digital Image Correlation. **Engineering Structures**, Amsterdã, v.46, ago. 2011/out. 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.08.018>>. Acesso em: 30 mai. 2024.

HOWLADER, M. K.; MASIA, M. J.; GRIFFITH, M. C. Digital image correlation for the analysis of in-plane tested unreinforced masonry walls. **Structures**, Amsterdã, v. 29, jul./dez. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.11.051>>. Acesso em: 3 dez. 2023.

JANK, Dominique de Moura. **Correlação de imagens digitais em ensaios de prismas de alvenaria estrutural com blocos cerâmicos de paredes maciças**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2021.

KUMAR, S. L.; ARAVIND, H. B.; HOSSINEY, N. Digital image correlation (DIC) for measuring strain in brick masonry specimen using Ncorr open source 2D MATLAB program. **Results in Engineering**, Amsterdã, v. 4, n. 100061, ago./nov. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2019.100061>>. Acesso em: 10 dez. 2023.

LE, D. B.; TRAN, S. D.; TORERO, J. L.; DAO, V. T.N. Application of digital image correlation system for reliable deformation measurement of concrete structures at high temperatures. **Engineering Structures**, Amsterdã, v. 19, ago. 2018/mai. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.05.009>>. Acesso em: 3 dez. 2023.

NETO, Álvaro Pereira do Prado, PELUSO, Edgard de Oliveira, CARVALHO, Valdinei Tadeu Alves de. **Alvenaria estrutural**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.

NGHIEM, H; HEIB, M. A; EMERIAULT, F. Method based on digital image correlation for damage assessment in masonry structures. **Engineering Structures**, Amsterdã, v. 86, mai. 2014/jan. 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.12.021>>. Acesso em: 1 dez. 2023.

NONIS, C.; NIEZRECKI, C.; YU, T.; AHMED, S. Structural health monitoring of bridges using digital image correlation. **SPIE Digital Library**, Bellingham, v. 8695, abr. 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1117/12.2009647>>. Acesso em: 1 dez. 2023.

OLIVEIRA, Kaio César da Silva. **Aplicação da Correlação de Imagens Digitais na avaliação do comportamento à tração de elementos de concreto.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022.

PICOY, Yuliana Solanch Mayorco. **Correlação digital de imagens para medições de deslocamentos em vigas em balanço.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistema e Automação). Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.

QUINTILIANO NUNES da SILVA, Angelo. **Correlação de Imagens Digitais em ensaios de compressão diametral em rochas.** Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

RAMOS, T.; FURTADO, A.; ESLAMI, S.; ALVES, S.; RODRIGUES, H.; ARÊDE, A.; TAVARES, P. J.; MOREIRA, P. M. G. P. 2D and 3D Digital Image Correlation in Civil Engineering –Measurements in a Masonry Wall. **Procedia Engineering**, Amsterdã, v. 114, ago. 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.061>>. Acesso em: 17 dez. 2023.

ROMEU, E. Two-dimensional digital image correlation for asphalt mixture characterisation: interest and limitations. **Road Materials and Pavement Design**, Londres, v. 14, n. 4, jul. 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/14680629.2013.815128>>. Acesso em: 14 jun. 2024.

SALMANPOUR, A. H., MAJSILOVIC, N. Application of Digital Image Correlation for strain measurements of large masonry walls. *In*: ASIA-PACIFIC CONGRESS ON COMPUTATIONAL MECHANICS & INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMPUTATIONAL MECHANICS, 7., 2013, Singapura. **APCOM & ISCM**. 2013. P. 1-7. Disponível em: <https://www.sci-en-tech.com/apcom2013/APCOM2013-Proceedings/PDF_FullPaper/1128.pdf>. Acesso em: 17 dez. 2023.

SANTOS, A. H. A.; PITANGUEIRA, R. L. S.; RIBEIRO, G. O.; CARRASCO, E. V.M. Determinação do módulo de elasticidade do concreto utilizando a correlação de imagem digital. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 9, n. 4, ago. 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952016000400007>>. Acesso em: 7 jan. 2024.

SANTOS, A. H. A.; PITANGUEIRA, R. L. S.; RIBEIRO, G. O.; CALDAS, R. B. Study of size effect using digital image correlation. **IBRACON Structures and Materials Journal**, São Paulo, v. 8, n. 3, jun. 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952015000300005>>. Acesso em: 1 dez. 2023.

SOUZA, P. J.; BARROS, F.; LOBO, P.; TAVARES, P. J.; MOREIRA, P. M.G. P. Experimental measurement of bridge deflection using Digital Image Correlation. **Procedia Structural Integrity**, Amsterdã, v. 17, ago. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.08.107>>. Acesso em: 14 jun. 2024.



STAZI, F.; SERPILLI, M.; CHIAPPINI, G.; PERGOLINI, M.; FRATALOCCHI, E.; LENCI, S. Experimental study of the mechanical behaviour of a new extruded earth block masonry. **Construction and Building Materials**, Amsterdã, v. 244, n. 118368, out. 2019/fev. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118368>>. Acesso em: 8 jan. 2024.

THOMAZ, E.; FILHO, C. V. M.; CLETO, F. R.; CARDOSO, F. F. **Código de Práticas N° 01: Alvenaria de vedação em blocos cerâmicos**. São Paulo: Câmara Brasileira do Livro, 2009.

WANG, L.; ZHAO, Y.; SONG, B.; XING, Y. Fracture behavior of basalt fiber-reinforced concrete subjected to high temperatures. **Structural Concrete**, Weinheim, v. 24, n. 3, nov. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/suco.202200057>>. Acesso em: 2 jun. 2024.