



USO DA CORRELAÇÃO DE IMAGEM DIGITAL NO ENSINO DE ENGENHARIA: APLICAÇÃO EM VIGAS NA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO¹

Use of Digital Image Correlation in Engineering Education: Application in Beams in Shear Resistance¹

Leticia Col Debella Santos²

Thomás Lima de Resende³

Ricardo Pieralisi⁴

Resumo: A engenharia tem experimentado avanços tecnológicos na aquisição, armazenamento, processamento e utilização de dados. Nessa gama de tecnologias, destaca-se a correlação de imagem digital (*Digital Image Correlation* – DIC), uma técnica óptica que pode analisar estruturalmente a superfície de um elemento ou peça através do processamento de imagens digitais. Ao contrário das técnicas de medição convencionais, a DIC é versátil e econômica, tornando-se uma ferramenta atraente para análise estrutural. Nesse contexto, o presente artigo visa descrever a utilização da DIC com o propósito de aprimorar as aulas práticas de mecânica dos sólidos em instituições de ensino superior de engenharia. A escolha se justifica pela capacidade da DIC em mensurar deslocamentos e deformações em superfícies, contribuindo para uma melhor compreensão do comportamento mecânico dos materiais. Como exemplo, a aplicação da DIC foi demonstrada em um estudo experimental envolvendo vigas de concreto com fibras de aço, sem armadura transversal, possibilitando o acompanhamento da fissura diagonal principal, o que, por sua vez, permite uma análise mais profunda da ruptura dessas vigas. A robustez do método é evidenciada a partir da capacidade resistente ao cisalhamento dessas vigas, calculada com dados obtidos a partir do experimento, e também com dados teóricos. Com os dados específicos e experimentais de cada viga, a resposta da resistência máxima mostrou ser mais precisa em comparação aos valores obtidos por variáveis teóricas. Foi, portanto, possível perceber que a metodologia pode proporcionar uma experiência imersiva aos alunos na aprendizagem teórica e analítica do comportamento dos materiais e estruturas.

Palavras-chave: Correlação de imagem digital (DIC). Engenharia. Ensino superior.

¹ Este artigo é um recorte da tese de doutorado intitulada “Análise do comportamento à força cortante do concreto reforçado com fibras de aço” (Santos, 2023).

² Doutora em Engenharia Civil pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Paraná (UFPR). Professora do curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3159-6738>. E-mail: leticiaacoldebella@hotmail.com.

³ Doutor em Engenharia Civil pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). Professor do Departamento de Estruturas da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4373-5504>. E-mail: thomas@eng.uerj.br.

⁴ Doutor em Engenharia da Construção pela Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Professor do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Paraná (UFPR). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8339-5324>. E-mail: ricpialisi@ufpr.br.

Abstract: Engineering has experienced technological advances in data acquisition, storage, processing, and use. Among the range of technologies, digital image correlation (DIC) stands out as an optical technique that can structurally analyze the surface of an element or part through the processing of digital images. Unlike conventional measurement techniques, DIC is versatile and cost-effective, making it an attractive tool for structural analysis. In this context, this paper aims to describe the use of DIC with the purpose of improving practical solid mechanics classes in engineering education institutions. This choice is justified by DIC's ability to measure displacements and deformations on surfaces, contributing to a better understanding of the mechanical behavior of materials. As an example, the application of DIC was demonstrated in an experimental study involving steel fiber reinforced concrete (SFRC) beams without transverse reinforcement in order to enable the monitoring of the main diagonal crack, which in turn allows a deeper analysis of the failure of these beams. The robustness of the method is evidenced from the shear-resistant capacity of these beams, calculated with data obtained from the experiment, and also with theoretical data. With specific and experimental data for each beam, the maximum resistance response proved to be more accurate compared to the values obtained by theoretical variables. It was therefore possible to realize that the methodology can provide an immersive experience for students in theoretical and analytical learning about the behavior of structures and materials.

Keywords: Digital Image Correlation (DIC). Engineering. University education.

1 Introdução

Na graduação em engenharia, é comum expor os assuntos de tensões, deformações e propriedades dos materiais no contexto da mecânica dos sólidos (Timoshenko; Gere, 1983; Coda, 2017). Dependendo do material e da configuração do ensaio, a observação do processo de fissuração pode ajudar a compreender completamente o comportamento mecânico de interesse, principalmente quando se trata de tensão de cisalhamento. Neste tipo de tensão, as fissuras podem ser a chave para a compreensão dos motivos que levaram à falha do material (Timoshenko E Gere, 1983; Fusco, 2008).

No âmbito da prática laboratorial, normalmente se enfatizam técnicas experimentais tradicionais, como medições por extensômetros. Por outro lado, pode ser interessante ter medições de superfícies inteiras, e não apenas de um ponto específico. Neste caso, a correlação de imagem digital (*Digital Image Correlation* – DIC) é uma ferramenta promissora para aprimorar aulas práticas de mecânica dos sólidos (Lava *et al.*, 2014; Sun *et al.*, 2022, VIC-Edu, 2024). Desta forma, também é possível obter medições de variáveis como deslocamentos ou deformações para identificação de outros parâmetros mecânicos mais frequentemente associados a propriedades constitutivas do material da amostra (iDICs, 2018).

Assim, este artigo descreve como a técnica DIC pode ser utilizada para práticas educacionais em engenharia (Lava *et al.*, 2014; VIC-Edu, 2024). É abordada uma proposta metodológica para utilização da técnica em ensaios em escala, especificamente para resistência ao cisalhamento. A abordagem aqui descrita permite observar a relação entre o carregamento atuante em uma viga de concreto qualquer e sua fissuração, o que permite controlar, ao longo de todo o ensaio, o desenvolvimento e deslocamentos relativos entre as faces das fissuras formadas. Essa ferramenta se torna ainda mais essencial quando se deseja investigar o comportamento estrutural de materiais menos convencionais aplicados em vigas, como o caso do concreto reforçado com fibras de aço – CRFA (Galeote; Blanco; De La Fuente, 2020; Torres; Lantsoght, 2019; Lantsoght, 2023), abordado neste artigo. O uso da correlação de imagem digital permite acompanhar a direção e a propagação da fissura de cisalhamento diagonal

crítica, relevante parâmetro no estudo de cisalhamento de vigas. A partir dessas observações, a leitura dos dados é realizada de acordo com os deslocamentos relativos da fissura de abertura (w) e de deslizamento (δ), além das características da fissura como sua inclinação, para posterior aplicação em modelos constitutivos. Para representar a robustez deste tipo de aplicação, o valor de resistência da viga de CRFA é calculado com base na normativa internacional RILEM (2005), e também em um modelo analítico da literatura (Dinh; Parra-Montesinos; Wight, 2010) no qual a inclinação da fissura (θ) e a altura da zona comprimida não fissurada (c) foram medidas. A prerrogativa desta comparação é que, com os dados específicos de cada viga, a resposta da resistência máxima seja mais precisa.

Além de discutir a metodologia proposta, este artigo fornece informações básicas relevantes relacionadas à aplicação da DIC que podem nortear sua aplicação em outras áreas. Além disso, são mostrados alguns trabalhos anteriores que utilizaram DIC em práticas educacionais de engenharia, bem como outros exemplos de como aplicar a técnica. Um dos objetivos desta abordagem é criar uma experiência mais imersiva para os alunos à medida que aprendem as teorias e conceitos usados para representar o comportamento dos materiais.

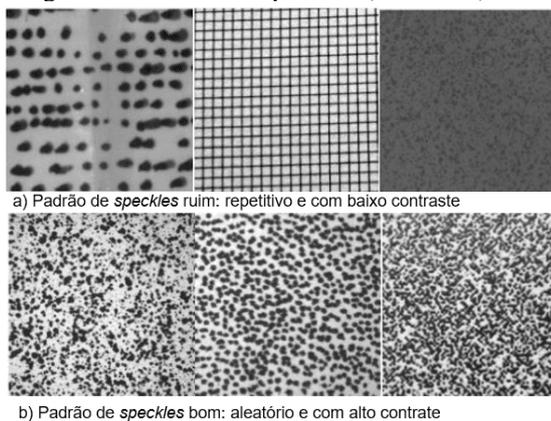
2 Fundamentação

2.1 Correlação de Imagem Digital (DIC)

A Correlação de Imagem Digital (DIC) pode ser definida como um método que fornece medições da superfície de uma amostra, comparando uma imagem de referência em um estado não deformado a uma série de imagens deformadas, rastreando pontos ou padrões entre eles (Resende; Cardoso; Shehata, 2019; Jones *et al.*, 2018). O primeiro passo é a preparação da superfície a ser avaliada com um conjunto de pontos aleatoriamente espaçados, chamados de *speckles*. De acordo com as boas práticas para o uso da DIC (Jones *et al.*, 2018), o conjunto aleatório de *pontos* pode ser feito com a aplicação de tinta branca ou preta, desde que se tenha um aumento de contraste entre o elemento a ser analisados e os pontos. A qualidade do conjunto de pontos está altamente relacionada à precisão dos resultados do DIC. O conjunto de pontos ideal deve ser não periódico e sem uma orientação preferencial, com o tamanho dos pontos dependendo do tamanho da área de interesse do corpo de prova e da resolução da câmera fotográfica digital disponível. Para equilibrar as escalas de cinza, qualquer cor pode ser usada durante a criação do conjunto de pontos e, posteriormente, a imagem pode ser convertida para uma escala monocromática. A aleatoriedade do conjunto de pontos pode ser alcançada aplicando tinta com um borrifador, respingos de tinta, ou até impressão adesiva na superfície. A Figura 1 mostra exemplos de padrões com diferentes propriedades encontrados na literatura.



Figura 1 – Padrões de speckles a) ruins e b) bons



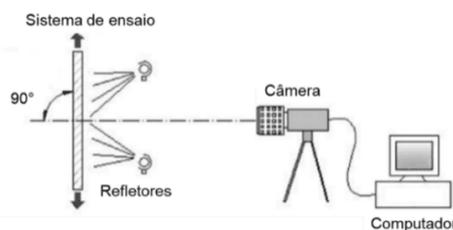
b) Padrão de speckles bom: aleatório e com alto contraste

Fonte: adaptado de Garnica (2018).

Após a preparação da superfície, posicionam-se os equipamentos para o início do procedimento. A ideia é que se obtenha essencialmente os deslocamentos e os campos de deformações da região de interesse através de imagens sucessivas ou vídeos dos ensaios laboratoriais. Para registrar essas imagens ou vídeos, pode-se usar uma única câmera para medições em um plano (2D) ou múltiplas câmeras para obter informações em três dimensões (3D). Apesar de o guia de boas práticas na DIC (Jones *et al.*, 2018) sugerir que se use análise 3D em qualquer situação, existem condições estruturais em que a avaliação 2D é suficiente. Um exemplo é quando se deseja aferir os deslocamentos relativos de fissuras provenientes do esforço cortante de vigas de concreto, já que esse é um problema essencialmente bidimensional. Para adquirir dados com precisão, é importante expor a superfície à luz difusa, com o auxílio de um refletor, e posicionar a câmera ortogonalmente a ela (Garnica, 2018). Resende (2020), em uma revisão da literatura de ensaios à força cortante em vigas de concreto armado com o uso de DIC, constatou uma faixa de erro nas leituras dos deslocamentos relativos entre as faces da fissura crítica entre 0,002 mm e 0,012 mm, o que é considerado aceitável.

A Figura 2 mostra como é usualmente o posicionamento dos equipamentos para a aplicação da DIC, e a Figura 3 mostra a diferença entre uma análise 3D (Figura 3-a) e 2D (Figura 3-b) da superfície de ruptura na análise da força cortante no concreto armado, originária do trabalho de Resende (2020).

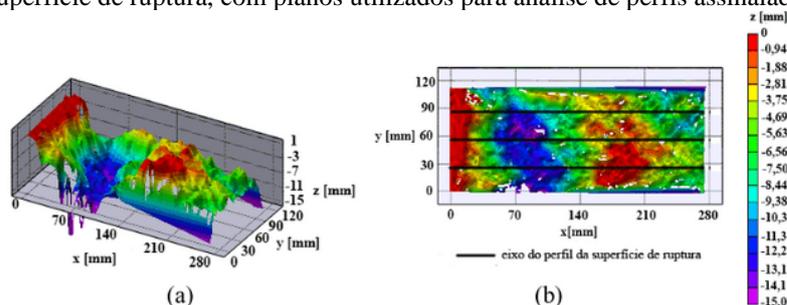
Figura 2 – Típica configuração experimental da CID no caso plano (2D)



Fonte: adaptado de Pan *et al.* (2009).



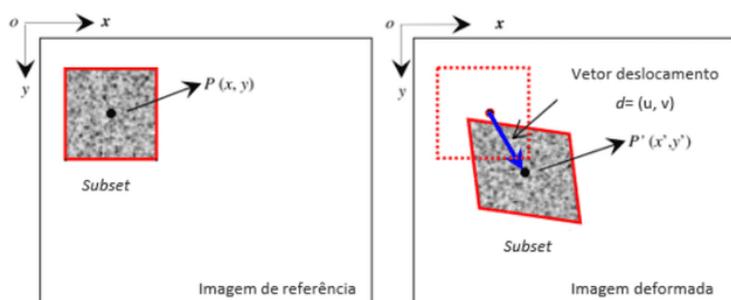
Figura 3- Análise fotogramétrica em 3D (CID-3D). (a) mapa 3D da superfície de ruptura; (b) mapa 2D da superfície de ruptura, com planos utilizados para análise de perfis assinalados



Fonte: Resende (2020).

A correlação é feita entre subconjuntos de *pixels*, chamados de *subsets* ou facetas. Os *pixels* são células sensíveis à luminosidade e armazenam sua intensidade na escala de cinza, que vai de 0 a 255. A média dos deslocamentos dos *pixels* em um *subset* é expressa em seu centro, a partir do qual é dado um *step* (passo) para investigar o próximo *subset*. Ou seja: a imagem inicial é dividida em vários blocos ou *subsets* que são procurados na imagem seguinte. Cada bloco é um conjunto de *pixels* e o objetivo do algoritmo é determinar sua nova posição, procurando os valores de intensidade dos pixels. Assim, o algoritmo calcula o movimento que o bloco realizou de uma configuração para outra, dentro de uma área de interesse, para obter os deslocamentos. A Figura 4 mostra a evolução do *subset*, que explica de forma geral como a técnica calcula os deslocamentos (Jones *et al.*, 2018; BI *et al.*, 2021). Para processar as imagens, existem softwares consolidados no mercado, como o VIC-2D/3D e o GOM Correlate (Resende; Cardoso; Shehata, 2019), e também códigos *open source*, ou seja, de acesso livre e gratuito, como o ImageJ e o OpenCV.

Figura 4 – Representação da evolução do *subset*



Fonte: Rosas (2019).

No que diz respeito à precisão e acurácia do método, alguns itens podem ser observados. A intensidade da distorção da imagem resultante da câmera está diretamente relacionada à qualidade da lente, e pode ser avaliada e corrigida por meio de ensaios e algoritmos específicos, como apresentado em Pan *et al.* (2013). Para análise 2D, o guia de boas práticas (Jones *et al.*, 2018) recomenda o uso de uma lente telecêntrica bilateral para reduzir erros de translação ou rotação fora do plano do elemento ensaiado. Se essa lente não estiver disponível, é recomendado o uso de uma lente com grande comprimento focal. Embora Hoult *et al.* (2016) tenham mencionado essa fonte de erro, eles não consideraram seus efeitos na verificação da cinemática da fissura crítica de cisalhamento.

Ainda segundo Resende (2020), uma maneira aleatória de estimar a qualidade das informações geradas pelo software de correlação de imagens é comparar duas imagens, ou dois

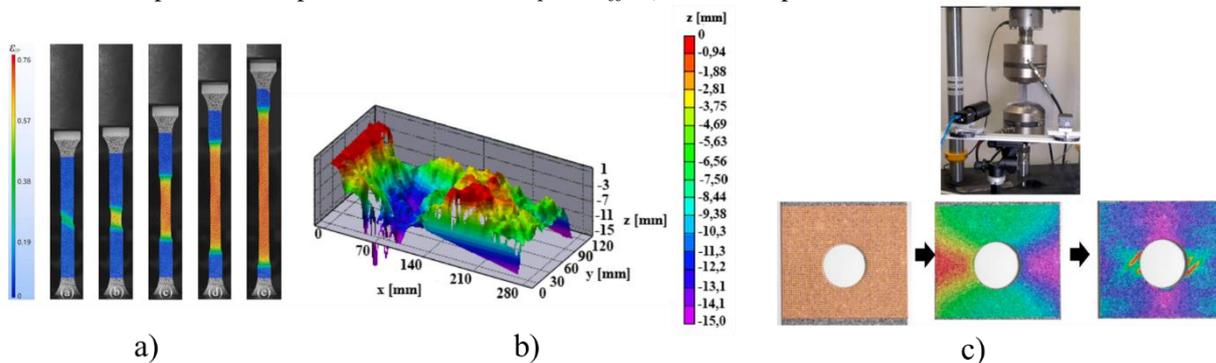


takes de vídeo, para o mesmo carregamento e situação real de ensaio (posicionamento da câmera, luminosidade, etc.), e usar a variação das medições encontradas entre essas duas imagens para essa estimativa. No caso do autor supracitado, com esse tipo de metodologia o erro encontrado foi de $(3.69 \times 10^{-3} \text{ mm})$. Gali e Subramaniam (2019), com a mesma forma de análise de erro, encontraram de 2 a $2.83 \times 10^{-3} \text{ mm}$. Para verificar a precisão em uma região específica de interesse, uma abordagem possível é comparar o resultado fornecido pelo software de correlação com aquele obtido por meio de instrumentação clássica, como um LVDT (*Linear Variable Differential Transformers*, ou transdutor de deslocamento variável linear).

Esse método apresenta algumas vantagens importantes em relação às medições tradicionais com LVDT, por exemplo. No caso específico da análise relativa à força cortante, é necessário rastrear a fissura crítica principal. Como não é possível aferir o local exato onde a fissura começa para posicionar adequadamente os LVDTs, é necessário avaliar toda a área de interesse. Nesse caso, a DIC fornece medições de campo completo e permite rastrear continuamente a evolução de cada fissura individualmente (Cavagnis; Ruiz; Muttoni, 2018; Resende, 2020).

Além de ter uma instrumentação de baixo custo, uma outra grande vantagem do DIC é a possibilidade de avaliar o campo de deformação em estruturas que necessitam de análise em superfícies, e não apenas em pontos específicos. Para demonstrar a versatilidade do método, a Figura 5 mostra algumas aplicações importantes do DIC na engenharia nos últimos anos. Na Figura 5-a é monitorado um ensaio de tração direta, onde os extensômetros físicos foram substituídos pelos virtuais. Na Figura 5-b é apresentada a superfície de ruptura de um ensaio de *push-off* em duas dimensões e em três dimensões, e na Figura 5-c a análise de placas laminadas de carbono, que é uma aplicação em materiais aeroespaciais.

Figura 5 – Aplicações do DIC). a) monitoramento de um ensaio de tração direta, b) análise fotogramétrica 3D da superfície de ruptura de um ensaio de *push-off*, c) análise de placas laminadas de carbono

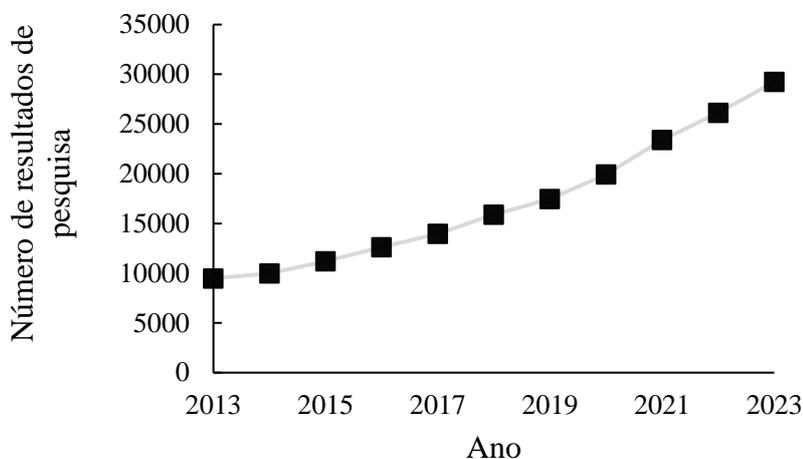


Fonte: a) Song *et al.* (2023), b) Resende (2020) e c) Feito *et al.* (2020).

Desde a sua criação, o DIC se aprimorou e ganhou espaço na engenharia. A Figura 6, por exemplo, mostra que tem havido uma tendência expressiva de aumento no número de publicações que descrevem o uso do DIC em projetos de pesquisa em engenharia, particularmente nos últimos cinco anos. Estes valores foram gerados rastreando-se o número de resultados classificados por ano de publicação a partir de uma pesquisa no banco de dados *Science Direct* usando a *string* de pesquisa “correlação de imagem digital”.



Figura 6 – Número de resultados retornados por ano pela pesquisa "Digital Image Correlation" no banco de dados Science Direct



Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

Além disso, alguns autores ao longo dos últimos anos já aplicaram o DIC como ferramenta de engenharia educacional. Ring e Lemley (2014) aplicaram a técnica em mecânica dos fluidos e McGuire e Helm (2015) em mecânica dos solos. Santa Cruz *et al.* (2013) utilizou a técnica aplicada na área de mecânica dos sólidos, em um ensaio de tração de uma liga de aço específica, e Lava *et al.* (2014) em fatores de concentração de tensão. Na mecânica dos sólidos podem ser citados dois trabalhos que utilizaram metodologias aplicáveis em conceitos próximos aos mostrados na graduação: Wang *et al.* (2017) utilizaram-nas na análise de ruptura em materiais compósitos e Blikharsky *et al.* (2022) no estudo de tração e deformação de estruturas de concreto. Todos esses trabalhos citados mostram a aplicação do DIC em algum tema específico no contexto do ensino de engenharia. Porém, há consenso sobre a versatilidade e robustez da metodologia, que pode ser aplicada em diversas áreas, conforme mostrado. A outra vantagem citada nos trabalhos é a aplicação facilitada da metodologia pelo corpo discente, que promove o conhecimento prático e aproxima a teoria e a prática.

2.1 Concreto reforçado com fibras de aço (CRFA)

O concreto convencional, apesar de suas inúmeras aplicações na engenharia, apresenta algumas limitações devido à sua baixa resistência à tração. Como alternativa, o concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) apresenta um comportamento estrutural caracterizado pela resistência à tração residual pós-fissuração, resultante da capacidade da fibra de transferir tensões (Bui *et al.*, 2020). Uma das grandes vantagens da utilização do CRFA é a possível redução do custo de construção, uma vez que pode encurtar o tempo de execução para assim eliminar ou reduzir a etapa de disposição das armaduras (Cavalaro; Blanco; Pieralisi, 2019). Especificamente, a substituição da armadura transversal por fibras de aço é interessante quando se tenta reduzir o congestionamento da armadura. Esta redução ou eliminação da armadura transversal convencional pode ser especialmente útil em obras de natureza arquitetônica, ou em concreto projetado, como é o caso da Linha 9 do metrô de Barcelona (Figura 7a), no qual são utilizados 25 kg/m³ de fibras com uma redução de 55% na blindagem convencional. Outro exemplo é o Edifício Central de Televisão da China (Figura 7b), em Pequim, onde foram utilizados concreto autoadensável, reforço convencional e fibras de aço.

Figura 7 - a) Linha 9 do metrô de Barcelona e b) Edifício Central de Televisão da China.



a)

b)

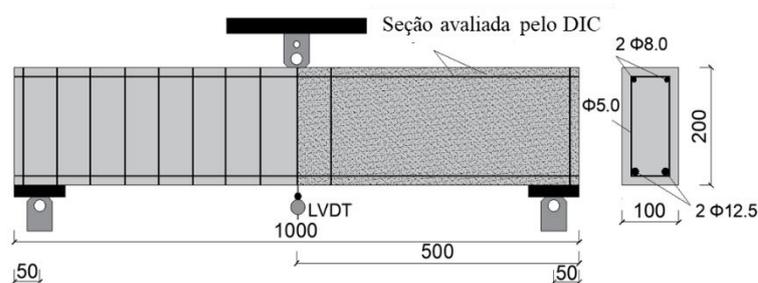
Fonte: Getty images, 2024.

Estas aplicações fazem do CRFA um material de interesse acadêmico (Torres; Lantsoght, 2019; Lantsoght, 2023; Blagojević *et al.* 2021; Wang *et al.* 2021) que ainda requer pesquisas para o completo entendimento de seu comportamento mecânico, principalmente diante de tensões de cisalhamento. Ao remover armaduras transversais em estruturas mais convencionais, como vigas, é importante estar atento à possibilidade de ruptura por cisalhamento, considerada um dos modos de ruptura mais graves para estruturas de concreto armado. Ao contrário da ruptura por flexão, por exemplo, a ruptura por cisalhamento não tem aviso, o que significa que a estrutura pode estar próxima da ruptura sem sinais visíveis. Portanto, as falhas por cisalhamento geralmente resultam em perdas drásticas e devem ser evitadas com alta prioridade (Yang *et al.*, 2017). Neste sentido, é essencial ter uma compreensão precisa da transmissão da força cortante no concreto, utilizando modelos que descrevam de forma realista o comportamento estrutural.

3 Metodologia

A metodologia empregada neste trabalho diz respeito ao ensaio de flexão de 3 pontos de uma viga biapojada. A Figura 8 mostra a representação das vigas ensaiadas, com as dimensões em milímetros, bem como a disposição das armaduras, já que se trata de uma viga de concreto armado com reforço de fibras de aço. Também se ressalta que as armaduras transversais (estribos) foram dispostas na metade não monitorada da viga, a fim de que as fissuras críticas do esforço cortante surgissem na parcela sem a presença dessas armaduras.

Figura 8 – Viga ensaiada no ensaio a flexão de 3 pontos



Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

O detalhamento da metodologia apresentada aqui consiste na exposição de 3 etapas inerentes à obtenção dos resultados da DIC. Inicia-se preparando a superfície a ser avaliada, que no presente caso foi feita a partir de respingos de tinta preta. Após essa etapa, é organizada a instrumentação necessária ao acompanhamento dos ensaios de vigas. Depois, é mostrado o roteiro de discretização de uma fissura, no qual as particularidades deste passo metodológico são apresentadas. Por fim, as variáveis envolvidas e as manipulações matemáticas necessárias ao cálculo dos deslocamentos relativos de abertura (w) e deslizamento (δ) das faces da fissura crítica são apresentados. A Figura 9 mostra o resumo dos passos metodológicos.

Figura 9 – Passos metodológicos

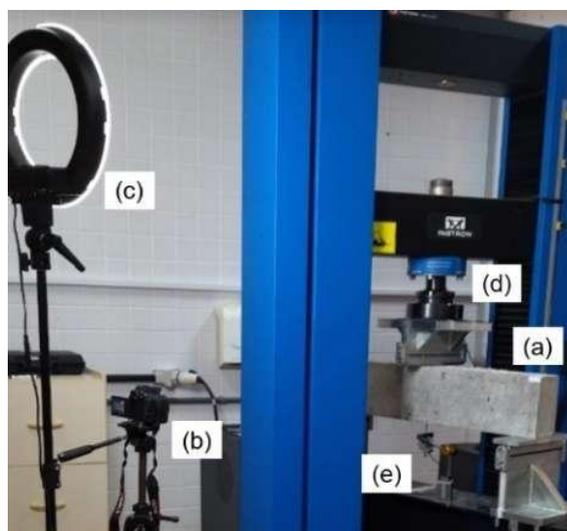


Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

3.1 Instrumentação

No presente trabalho, os equipamentos utilizados nos ensaios com auxílio da DIC estão expostos na Figura 10, onde é mostrada a viga analisada (Figura 10-a), a câmera Canon modelo DSLR EOS Rebel SL3 equipada com uma lente EF-S 40mm (Figura 10-b), um refletor (Figura 10-c), a prensa INSTRON modelo EMIC 23-300 com capacidade de 300 kN (Figura 10-d) e um LVDT localizado no vão central (Figura 10-e) para fins de validação dos resultados. Tanto a câmera quanto o refletor são posicionados ortogonalmente à viga ensaiada, evitando distorção da imagem.

Figura 10 – Equipamentos utilizados nos ensaios. Em a) a viga, b) a câmera, c) o refletor, d) a prensa e e) o LVDT.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

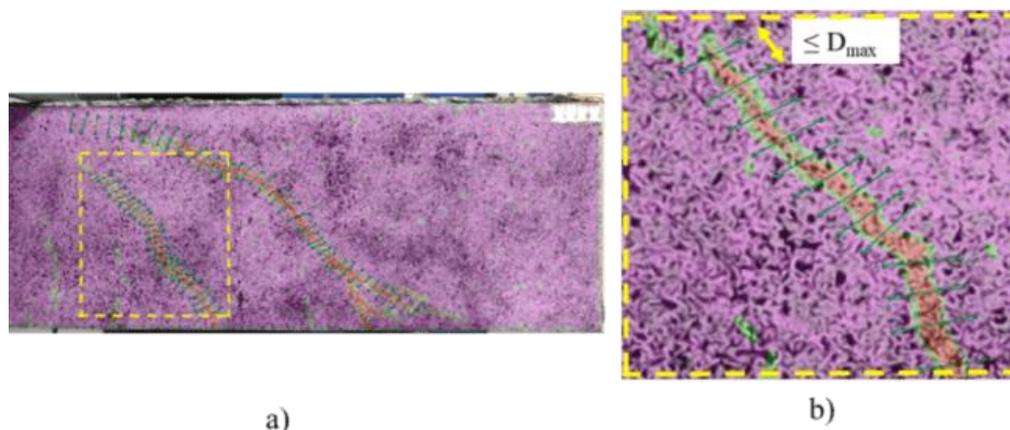


3.2 Discretização das fissuras

Após a filmagem de todo o ensaio, os vídeos resultantes passam por um processo de tratamento antes da leitura. Um *software* de edição é utilizado para reduzir a taxa de quadros por segundo do vídeo original (número de imagens obtidas por segundo de vídeo), a fim de otimizar o tamanho do vídeo a ser avaliado, permitindo que o *software* de leitura processe as imagens. No caso do presente trabalho, os vídeos utilizados tinham 2 quadros por segundo e foram editados no *software* gratuito VSDC. Após essa etapa, o *software* GOM Correlate® (GOM, 2024) foi utilizado para obter os campos de deformação e deslocamento, com um *subset* de tamanho 12 x 12 pixels, e passo de 7 pixels.

O objetivo central dessas medições é quantificar os deslocamentos relativos entre as paredes da fissura diagonal principal, isto é: a medida horizontal (abertura w) e vertical (deslizamento δ) provenientes do desenvolvimento da fissura até a ruptura. Para tanto, cada fissura foi discretizada em segmentos representados por linhas retas, cuja quantidade depende da cinemática encontrada. Para os resultados apresentados aqui, a fissura foi dividida em 6 segmentos. Em cada segmento, um conjunto de pontos perpendiculares foram monitorados em ambos os lados da fissura, conforme as Figuras 11-a e 11-b. A distância entre dois pontos consecuentes ao longo do comprimento de cada segmento seguiu a metodologia de Cavagnis, Ruiz e Muttoni. (2015), não ultrapassando o diâmetro máximo do agregado (D_{max}), que no presente caso é de 12.7 mm. A Figura 11-b também mostra a discretização da fissura e os pontos de controle em ambos os lados da abertura, não ultrapassando o valor de 12.7 mm. Assis *et al.* (2022) e Koščák *et al.* (2022) apresentaram recentemente uma metodologia semelhante, e concluíram que ela era eficiente na medição de deslocamentos relativos.

Figura 11 – Fissura seccionada em segmentos de reta em a) na visão da viga inteira, e b) com ênfase na distinção dos segmentos, e com a distância conseguinte menor ou igual a D_{max}

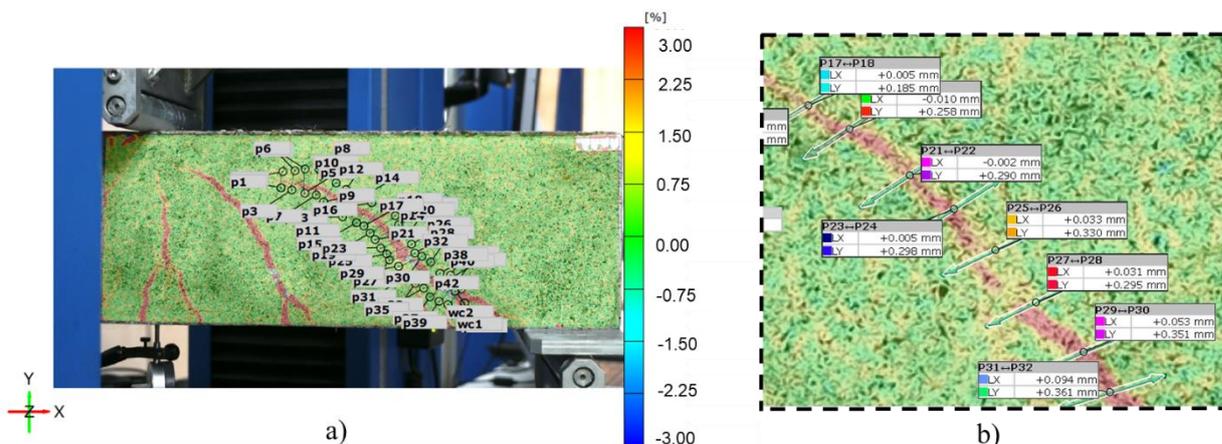


Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

Uma vez obtido o padrão de fissura e o ângulo com o eixo horizontal (α) de cada um dos segmentos, o próximo passo é calcular os deslocamentos relativos de abertura (w) e deslizamento (δ) ao longo do perfil da fissura. Os deslocamentos relativos podem ser derivados dos deslocamentos horizontais (L_x) e verticais (L_y), obtidos a partir dos pontos perpendiculares que contornam a fissura, conforme mostra a Figura 12.



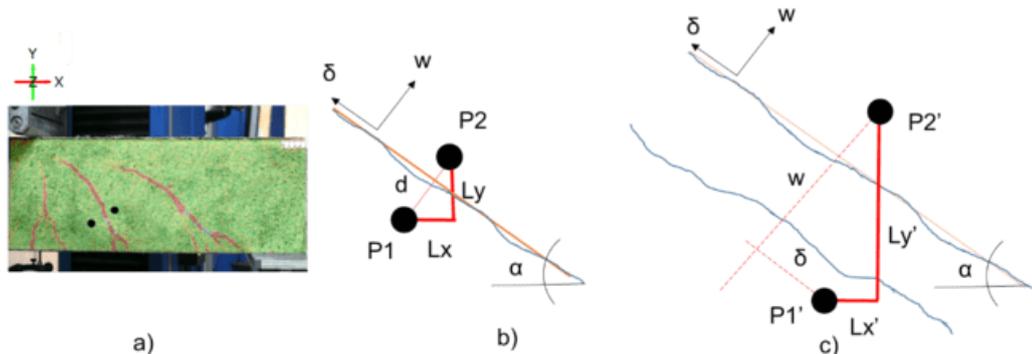
Figura 12 – Em a): pontos perpendiculares contornando a fissura, e b) zoom dos valores dos deslocamentos horizontais (Lx) e verticais (Ly)



Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

A Figura 13 mostra a relação entre os deslocamentos relativos (abertura w e deslizamento δ) e os deslocamentos horizontais e verticais (Lx e Ly). Na figura a) veem-se dois pontos de controle, na Figura 13-b o detalhamento destes, com o ângulo (α) do trecho da viga, e na Figura 13-c são mostrados os deslocamentos (Lx' e Ly') e a indicação de abertura (w) e deslizamento (δ) das faces da fissura, conforme a equação 01.

Figura 13 – Em a) dois pontos de controle, b) detalhe dos dois pontos de controle e c) relação entre os deslocamentos relativos (w) e (δ) e os deslocamentos da fissura (Lx) e (Ly)



Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

$$(\delta w) = [\cos\alpha \quad -\sin\alpha \quad \sin\alpha \quad \cos\alpha](Lx' - Lx \quad Ly' - Ly) \quad (01)$$

3.3 Outras variáveis da cinemática de fissuração para cálculo da resistência máxima ao cisalhamento (V_{max})

Segundo Bi *et al.* (2021), a obtenção dos deslocamentos relativos (w e δ) das paredes de fissuras, conforme explicado na seção anterior, é útil para o cálculo dos mecanismos de transferência de forças cortantes. Com estes dados, e avaliando a cinemática de fissuração, é possível obter explicações racionais para o comportamento de vigas de CRFA, por exemplo.



Porém, outras variáveis podem ser obtidas através do acompanhamento do teste pelo DIC. Um dos mecanismos de transferência de força cortante diz respeito à zona comprimida não fissurada do concreto. Este mecanismo é função da distância entre a ponta da fissura e a face superior não fissurada da viga (Schmidt *et al.*, 2021). Portanto, é uma medida que pode ser verificada pelo DIC sem comprometer nenhum custo computacional envolvido.

Além disso, alguns modelos analíticos que preveem a resistência máxima à força cortante (V_{max}) têm como um dos dados de entrada este valor da zona comprimida não fissurada. Além disso, a inclinação da fissura diagonal crítica principal (θ), em relação ao eixo horizontal, também aparece em alguns modelos, como em Yuan *et al.* (2020) e Rhee (2022). Assim, no instante de ruptura da viga, na imagem referente a este instante, também são medidas estas duas variáveis: altura da zona comprimida não fissurada (c) e inclinação da fissura diagonal crítica (θ).

Esses dados são aplicados no modelo de Dinh, Parra-Montesinos e Wight (2010) para predição de força máxima (V_{max}) e comparados com a equação fornecida pela normativa RILEM (2003). Essa última não possui nenhuma variável relacionada à cinemática de fissuração, enquanto o modelo de Dinh, Parra-Montesinos e Wight (2010) é baseado justamente nisso. A equação do modelo é:

$$V_{max} = V_c + V_{fib} \quad (02)$$

onde V_c é a força cortante resistida pelo concreto e V_{fib} é a força cortante resistida pela fibra, e dada por:



$$V_c = 0,13A_s f_y \quad (03)$$

$$V_{fib} = \left(1,2 \left(\frac{V_f}{0,0075} \right)^{\frac{1}{4}} \right) b(d - c) \cotan \theta \quad (04)$$

onde V_f é o volume da fibra, b é a largura da viga, d é a altura efetiva, c é a altura da zona comprimida não fissurada e θ é a inclinação crítica da fissura diagonal.

A equação do RILEM é:

$$V_{max} = V_{cd} + V_{fd} \quad (05)$$

onde V_{cd} é a resistência ao cisalhamento da viga reforçada com armadura longitudinal sem estribos e V_{fd} é a resistência ao cisalhamento proporcionada pelas fibras, dada como:

$$V_{cd} = \left[\frac{0,18}{\gamma_c} k(100 \rho f_{ck})^{1/3} \right] bd \quad (06)$$



$$V_{fd} = 0,7k_f k \tau_{fd} b d \quad (07)$$

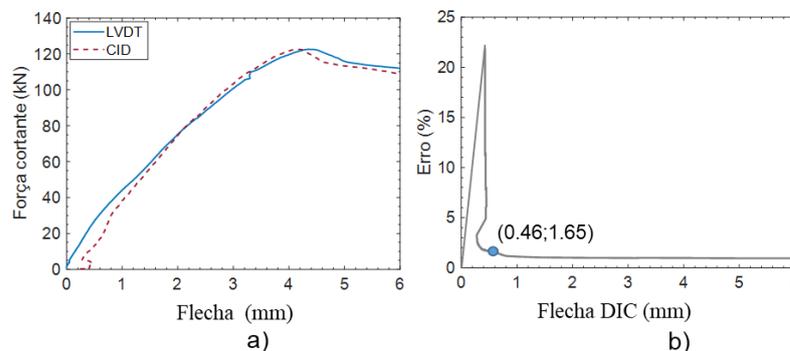
k_f é o fator para calcular a contribuição dos banzos de uma seção em T , k é o fator de escala, τ_{fd} é o valor de cálculo do aumento da resistência ao cisalhamento devido às fibras ($\tau_{fd} = 0,12f_{rk,4}$), ρ é a taxa de armadura de tração, f_{ck} é a resistência à compressão característica do concreto e $f_{rk,4}$ é a tensão residual característica para o estado limite último, proveniente do ensaio de tração na flexão EN 14651 (2007).

Os valores são então comparados com o valor resistido de V_{max} pela viga no laboratório.

4 Resultados

Inicialmente, a curva da força versus deflexão no meio do vão medida com o LVDT é apresentada em comparação com a flecha medida pela metodologia DIC na Figura 14. Observa-se uma boa correlação entre as curvas, conforme evidenciado pela Figura 14-b, que apresenta o erro absoluto entre ambas com um ponto destacado que representa a estabilização do erro entre as duas medidas. A partir do ponto destacado na Figura 14-b, percebe-se também que o erro permaneceu abaixo de 1,5%, apesar de inicialmente ser maior.

Figura 14 – Em a) diagrama flecha versus força cortante da DIC e do LVDT, e b) erro relativo entre as duas curvas

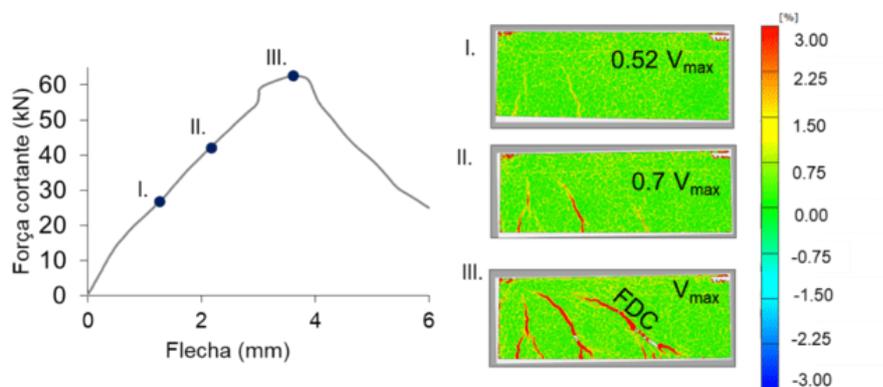


Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

Conforme mencionado anteriormente, dependendo do material, o processo de fissuração pode ser um aliado na compreensão dos motivos que levaram à falha. A Figura 15 mostra a possibilidade do acompanhamento do processo de fissuração de uma viga. As imagens do desenvolvimento das fissuras foram retiradas do software GOM Correlate (2024) após a calibração indicada na metodologia descrita. São apresentadas 3 imagens referentes ao início da fissuração: em $0,52V_{max}$, com as fissuras críticas já definidas em $0,7 V_{max}$, e também no instante da ruptura, com a fissura diagonal crítica (FDC) indicada. Nesse caso, V_{max} significa a força cortante máxima a que a viga resistiu, ou seja, sua resistência à força cortante. Essas imagens são referentes ao campo de tensões máximas, cuja escala também está representada na figura. As imagens obtidas pela DIC ainda são atreladas ao diagrama de força cortante aplicada versus flecha da viga.



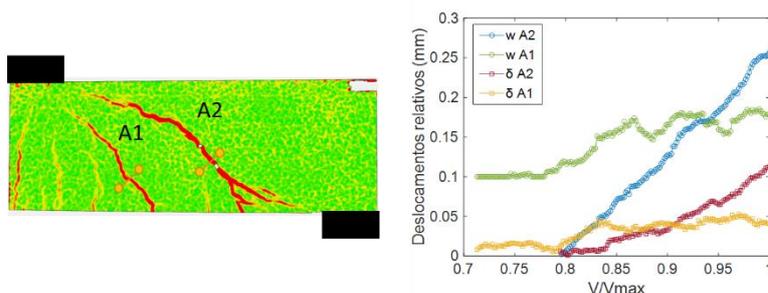
Figura 15 – Diagrama flecha versus força cortante e imagem do processo de fissuração da viga em $0,52V_{max}$, $0,7V_{max}$ e V_{max}



Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

Com o procedimento exemplificado na metodologia são obtidos os deslocamentos relativos de abertura (w) e deslizamento (δ) da fissura. É importante ressaltar que esses deslocamentos relativos são dados ponto a ponto, ou seja, seção por seção da fissura. Para exemplificar, a Figura 16 mostra apenas um ponto das duas fissuras diagonais da viga em questão, por meio do qual se pode ter uma ideia do tamanho dos valores de aberturas e deslizamentos destas fissuras. Estes dados são utilizados especialmente no cálculo dos mecanismos que transferem a força cortante, vinculados às análises apresentadas na Figura 15 (Cavagnis *et al.*, 2018; Debella *et al.* 2023).

Figura 16 – a) Viga com a representação das duas fissuras diagonais críticas (A1 e A2) e b) a quantificação dos seus respectivos deslocamentos relativos conforme equação 01

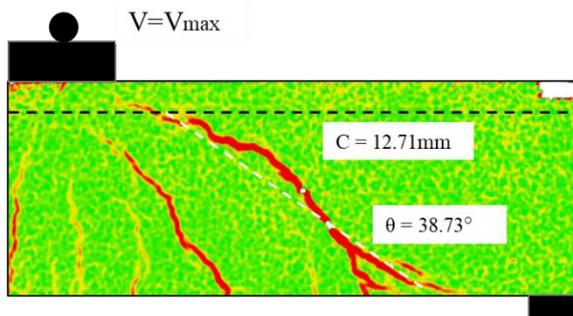


Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

Para a última etapa descrita na metodologia, a Figura 17 mostra, no instante da ruptura (V_{max}), a altura da zona comprimida não fissurada (c) e a inclinação da fissura diagonal crítica (FDC) principal. Conforme explicado, esses dados foram aplicados na equação de Diniz, Parra-Montesinos e Wight (2010) e comparados com a equação da normativa RILEM (2003), conforme apresentado na Tabela 1.



Figura 17 - Altura da zona comprimida não fissurada (c) e inclinação da fissura diagonal crítica em V_{max}



Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

Tabela 1 – Força calculada com relação ao cisalhamento máximo (V_{max})

	Cisalhamento (V) [kN]	V/V_{max}
Experimental (V_{max})	43,29	[-]
Dinh, Parra-Montesinos e Wight (2010)	37,99	0,88
RILEM (2003)	30,76	0,71

Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

A Tabela 1 deixa mais claro como a inclusão de dados sobre a cinemática de fissuração pode representar resultados mais consistentes de força cortante máxima. A equação RILEM mostrou-se mais conservadora que o modelo Dinh *et al.* (2011) e ambas evidenciam a relevância da necessidade de equações de previsão de resistência à força cortante mais racionais. Buscando suprir essa lacuna, em Resende (2020) são constatadas as potencialidades do uso dos dados da cinemática da fissura crítica obtidas por meio de DIC associados a modelos mecânicos para cada mecanismo resistente envolvidos na transferência da força cisalhante, no sentido de se promover um entendimento mais racional de seu comportamento estrutural e produzir valores de resistência teóricos mais próximos daqueles observados experimentalmente.

4 Conclusões

Este artigo propôs uma metodologia que explica as etapas para obtenção de dados por meio da DIC como ferramenta no ensino de engenharia. Foram explicadas as vantagens do método em si, os passos metodológicos detalhados, as manipulações matemáticas e alguns dados importantes a serem medidos. A metodologia foi aplicada a vigas de CRFA, por se tratar de um material cujo comportamento mecânico está intimamente ligado à cinemática de fissuração, mas também se aplica a outros elementos estruturais e materiais, o que pode ser explorado em trabalhos futuros. Por meio da avaliação dos valores da resistência máxima ao cisalhamento, por exemplo, percebe-se a penalidade que o material pode sofrer em uma equação mais conservadora. Esta explicação dos valores referentes a duas formas diferentes de cálculo da resistência máxima das vigas pode ser muito benéfica para que estudantes de engenharia entendam a importância de se ter parâmetros de entrada confiáveis.

A partir dos resultados obtidos foi possível perceber que a DIC é uma ferramenta versátil na educação da engenharia, sendo possível, com baixo custo, obter dados valiosos para uma

compreensão completa da mecânica dos materiais. A aplicação da DIC na engenharia pode trazer uma série de benefícios ao aprendizado, proporcionando uma compreensão mais profunda dos conceitos teóricos relacionados ao comportamento mecânico dos materiais. Os alunos podem visualizar, de forma concreta, como ocorrem as deformações e compreender como diferentes parâmetros influenciam o comportamento estrutural. Além disso, a DIC permite que os alunos desenvolvam habilidades práticas como manuseio de equipamentos de medição e processamento de imagens.

Por fim, entende-se que a introdução da DIC no ensino de engenharia pode promover um ambiente de aprendizagem mais dinâmico e interativo, no qual os alunos possam explorar, analisar e discutir resultados experimentais reais. Isso incentiva o pensamento crítico, a resolução de problemas e a tomada de decisões baseadas em evidências.

Referências

ASSIS, L. S. *et al.* Elaboration of fracture prediction map using 2D digital image correlation - 2D DIC. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 15, n. 4, p. 1–9, 2022.

BI, J. *et al.* A mechanical model for shear design of steel fiber reinforced concrete beams without shear reinforcements. **Structures**, v. 31, p. 216–229, jan. 2021.

BLIKHARSKYY, Y. *et al.* Review of Development and Application of Digital Image Correlation Method for Study of Stress–Strain State of RC Structures. **Applied Sciences**, Switzerland, v. 12, n. 19, 2022.

BUI, T. T. *et al.* Shear Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams Without Stirrups: Experimental Investigation. **International Journal of Civil Engineering**, v. 8, 2020. Springer International Publishing. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40999-020-00505-8>. Acesso em: 10 de março de 2024.

CAVAGNIS, F.; RUIZ, M.; MUTTONI, A. An analysis of the shear-transfer actions in reinforced concrete members without transverse reinforcement based on refined experimental measurements. **Structural Concrete**, v. 19, n. 1, p. 49–64, 2018.

CAVAGNIS, F.; RUIZ, M.; MUTTONI, A. Shear failures in reinforced concrete members without transverse reinforcement: An analysis of the critical shear crack development on the basis of test results. **Engineering Structures**, v. 103, p. 157–173, 2015.

CAVALARO, S. H. P.; BLANCO, A.; PIERALISI, R. Holistic modelling approach for special concrete: from fresh - to hardened - state. **RILEM Technical Letters**. n. 3, p. 84–90, 2019.

CODA, Humberto Breve. **Mecânica dos sólidos**. v. I. Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos, 2017.

CORRELATED SOLUTION. **VIC Educational System (VIC-EDU)**. 2024. Disponível em: <https://www.correlatedsolutions.com/vic-edu>. Acesso em: 10 de março de 2024.

DEBELLA, C. L. *et al.* Investigation of aggregate interlock contribution to shear strength of reinforced concrete and steel fiber reinforced concrete beams. **Revista IBRACON de**



SCHMIDT, M.; SCHMIDT, P.; WANKA, S.; CLASSEN, M. Shear response of members without shear reinforcement- experiments and analysis using shear crack propagation theory (SCPT). **Applied Sciences**, Switzerland, v. 11, n. 7, 2021.

SONG, P.; TRIVEDI, A.; SIVIOUR, C. R. Tensile testing of polymers: Integration of digital image correlation, infrared thermography and finite element modelling. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, v. 171, 2023. Elsevier Ltd. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2022.105161>.

SUN, W *et al.* Digital image correlation-aided non-destructive buckling load prediction of cylindrical shells. **International Journal of Solids and Structures**, v. 254–255, n. July, p. 111, 2022. Elsevier Ltd. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijstr.2022.111941>>.

TIMOSHENKO, S. P. e GERE, J. E. **Mecânica dos sólidos**, v. 1 e 2, Rio de Janeiro: LTC, 1983.

TORRES, J. A.; LANTSOGH, E. O. L. Influence of Fiber Content on Shear Capacity of Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams. **Fibers**, v. 7, n. 12, p. 102, 2019.

VIC Educational System (VIC-EDU). Irmo, Estados Unidos da América: **Correlated Solution**, 2024. Software. Disponível em: <https://www.correlatedsolutions.com/vic-edu>. Acesso em: 9 mai. 2024.

WANG, C. *et al.* Failure Analysis of Composite Structures Based on Digital Image Correlation Method. **International Conference on Sensing, Diagnostics, Prognostics, and Control Failure**. n. 2, p. 473–476, 2017.

WANG, X.; FAN, F.; LAI, J.; XIE, Y. Steel fiber reinforced concrete: A review of its material properties and usage in tunnel lining. **Structures**, v. 34, p. 1080–1098, 2021. Elsevier Ltd. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.07.086>. Acesso em: 9 mai. 2024.

YANG, Y.; WALRAVEN, J.; UIJL, J. DEN. Shear Behavior of Reinforced Concrete Beams without Transverse Reinforcement Based on Critical Shear Displacement. **Journal of Structural Engineering**, v. 143, n. 1, p. 04016146, 2017.

YUAN, T. F. *et al.* Shear Capacity Contribution of Steel Fiber Reinforced High-Strength Concrete Compared with and without Stirrup. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, Singapore, v. 14, n. 1, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s40069-020-0396-2>. Acesso em: 9 mai. 2024.

Recebido em março de 2024

Aprovado em junho de 2024