

APLICAÇÃO DA CORRELAÇÃO DE IMAGEM DIGITAL NO ESTUDO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO SEM ARMADURA TRANSVERSAL

Leticia Col Debella Santos (UEPG) E-mail: lbcdebella@uepg.br

Ricardo Pieralisi (UFPR) E-mail: ricpialisi@ufpr.br

Resumo: A indústria da construção tem experimentado avanços tecnológicos em aquisição, armazenamento, processamento, utilização e transmissão de dados. Dentre a gama de métodos existentes, a correlação de imagem digital (CID) é uma técnica óptica que mede deslocamentos e deformações de uma superfície através do processamento de imagens digitais e tem se tornado uma das tecnologias mais promissoras para o monitoramento da integridade estrutural. Ao contrário das técnicas de medição convencionais, a CID é versátil e econômica, tornando-se uma ferramenta atraente para análise estrutural na engenharia civil. Nesse contexto, a metodologia deste trabalho combina a CID com o estudo do concreto reforçado com fibras de aço, monitorando a propagação e medindo os deslocamentos relativos de fissuras críticas de cisalhamento. Dessa forma, é possível aplicar os resultados em modelos robustos baseados em teorias bem fundamentadas, em vez de variáveis empíricas ajustadas por experimentos. A pesquisa experimental apresentada neste trabalho ressalta ainda os resultados que podem ser obtidos por meio da CID, como o acompanhamento do processo de fissuração e a medição por extensômetros digitais. Isso permite uma análise mais precisa da integridade estrutural do concreto, com e sem fibras de aço, auxiliando na prevenção de possíveis falhas estruturais que podem levar a custos significativos de reparo e manutenção

Palavras-chave: Correlação de imagem digital (CID). Concreto armado. Concreto reforçado com fibras de aço (CRFA). Cisalhamento.

APPLICATION OF DIGITAL IMAGE CORRELATION IN THE STUDY OF THE STRUCTURAL BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE BEAMS WITHOUT TRANSVERSE REINFORCEMENT

Abstract: The construction industry has experienced technological advances in data acquisition, storage, processing, utilization and transmission. Among the range of existing methods, digital image correlation (DIC) is an optical technique that measures displacements and deformations of a surface through digital image processing and has become one of the most promising technologies for monitoring structural integrity. Unlike conventional measurement techniques, DIC is a versatile and cost-effective tool for structural analysis in civil engineering, making it an attractive option. In this context, the methodology of this work combines the DIC with the study of steel fibers reinforced concrete, monitoring the propagation and measuring the relative displacements of critical shear cracks. This approach enables the application of robust models based on well-founded theories, rather than empirical variables adjusted by experiments. The experimental research presented in this work highlights the benefits of using DIC, such as the monitoring of the cracking process and measuring with digital extensometers. This enables a more accurate analysis of the structural integrity of concrete, with and without steel fibers, helping to prevent potential structural failures that can result in significant repair and maintenance costs.

Keywords: Digital Image Correlation (DIC). Reinforced concrete. Steel fiber reinforced concrete (SFRC). Shear.

1. Introdução

Os avanços tecnológicos na aquisição, armazenamento, processamento, utilização e transmissão de dados têm impulsionado a inovação na construção civil, especialmente na área de monitoramento de integridade estrutural. Estruturas, como pontes e túneis

requerem avaliações periódicas de sua saúde estrutural. Nesse contexto, existem diversas técnicas para monitorar o comportamento de uma estrutura que se destacam como inovadoras (ALZABEEBEE *et al.*, 2023). Dentre estas, há um método em particular que tem ganhado ampla aceitação como uma das tecnologias mais promissoras: a correlação de imagem digital (CID).

A CID é uma técnica óptica que permite a medição de deslocamentos e deformações de uma superfície por meio do processamento de imagens digitais (ROSAS, 2019; RESENDE *et al.*, 2019). De forma resumida, imagens são coletadas em um intervalo de tempo determinado durante o experimento, que varia de acordo com o tipo de ensaio realizado. Após a coleta, softwares de correlação utilizam algoritmos de rastreamento e operações matemáticas para fornecer os valores necessários para a geração de campos de deslocamento e deformações da superfície estudada.

O que difere a CID de outras técnicas de medição convencionais é sua capacidade de medir de forma não destrutiva, com um baixo custo-benefício. Ou seja, o campo de deslocamento e demais variáveis resultantes podem ser obtidos sem danificar a estrutura, e sem necessariamente precisar um local exato para as medições, como nos casos de LVDTs e extensômetros físicos. (JONES *et al.*, 2018).

No contexto da engenharia civil, o concreto armado é um dos materiais mais empregados em estruturas. Apesar das vantagens como a versatilidade e facilidade de mão de obra, a montagem e fabricação da armadura transversal é uma das etapas mais trabalhosas do processo produtivo. Reduzir ou eliminar essa etapa da produção pode favorecer a mecanização e a produtividade, trazendo vantagens de custo (NOURI *et al.*, 2021). Em casos especiais, como lajes alveolares protendidas, por exemplo, pode-se até dispensar o uso da armadura transversal.

A problemática em elementos com baixa ou nenhuma taxa de armadura transversal diz respeito a ruptura frágil, que pode ocorrer em caso de colapso devido às solicitações tangenciais. Dessa forma, a redução da armadura transversal depende principalmente do controle efetivo da fissuração e de um comportamento mais dúctil na ruptura. Em resumo, a viabilidade estrutural de peças de concreto com pouca ou nenhuma armadura transversal requer a consideração de aspectos relativos à cinemática da fissuração, bem como meios de aumentar a ductilidade ao elemento estrutural (LANTSOGHT, 2019; MATOS *et al.*, 2020).

Para evitar o problema de ruptura frágil e aumentar a resistência em elementos estruturais de concreto armado sem armadura transversal, uma alternativa é o uso do concreto reforçado com fibras de aço (CRFA), cujas fibras são responsáveis por adicionar tenacidade à matriz. Com aplicações que vão desde pisos industriais até concreto projetado em túneis, o CRFA ainda pode ser melhor aproveitado na construção civil, desde que se tenha completo entendimento do seu comportamento estrutural (HUBER *et al.*, 2016).

Nesse cenário, o CRFA ainda abre espaço para discussões de modelos e hipóteses que o representem corretamente, sem penalidades de resistência por coeficientes de segurança relacionados à incertezas (CAVALARO *et al.*, 2019). Sob essa ótica, Lantsoght (2019), Schmidt *et al.* (2021) e Metje e Leutbecher (2023) afirmam que o CRFA ainda necessita de modelos mecânicos que representem a falha por força cortante. Portanto, a associação da CID ao estudo do comportamento CRFA é uma metodologia promissora, tendo em vista que é possível acompanhar a cinemática da fissuração e aferir os deslocamentos relativos de abertura (w) e deslizamento (δ) das fissuras críticas de cisalhamento. Através desses dados, modelos robustos baseados em teorias bem fundamentadas podem ser avaliados, sem depender de variáveis empíricas ajustadas por ensaios experimentais.

Este trabalho apresenta a metodologia CID aplicada em uma viga de concreto armado sem armadura transversal e reforçado com fibras de aço, expondo os procedimentos, instrumentação e relações matemáticas necessárias para a obtenção de variáveis como os deslocamentos relativos de uma fissura crítica de cisalhamento e campos de deformação. Os resultados aqui apresentados auxiliam não somente o entendimento do material com relação à força cortante, mas também na percepção global do comportamento estrutural do CRFA. O objetivo central é mostrar os resultados possíveis de serem obtidos através da CID, contribuindo para sua disseminação em outras áreas da engenharia civil e para o avanço do conhecimento sobre o comportamento mecânico do CRFA.

2. Fundamentação

A Correlação de Imagem Digital (CID) pode ser definida como um método que fornece medições da superfície de uma amostra, comparando uma imagem de referência em um estado não deformado com uma série de imagens deformadas, rastreando pontos ou padrões entre eles (RESENDE *et al.*, 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 CID (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 analisado e os pontos. 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. 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.

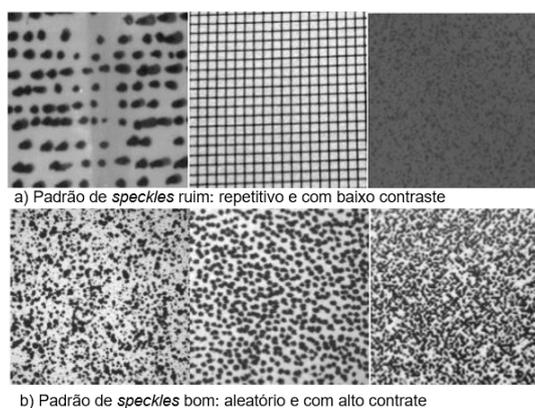


Figura 1 - padrões de *speckles* a) ruins e b) bons
Fonte: adaptado de Garnica (2018)

Após a preparação da superfície, posiciona-se os equipamentos para início do procedimento. A ideia é que se obtenha essencialmente os deslocamentos, e 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 do guia de boas práticas na CID (JONES *et al.*, 2018) sugerir que se use análise 3D em qualquer situação, existem algumas condições estruturais onde 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 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). Para exemplificar, a Figura 2 mostra a diferença entre uma análise 3D (Figura 2-a) e 2D (Figura 2-b), da superfície de ruptura na análise da força cortante no concreto armado, originária do trabalho de Resende (2020).

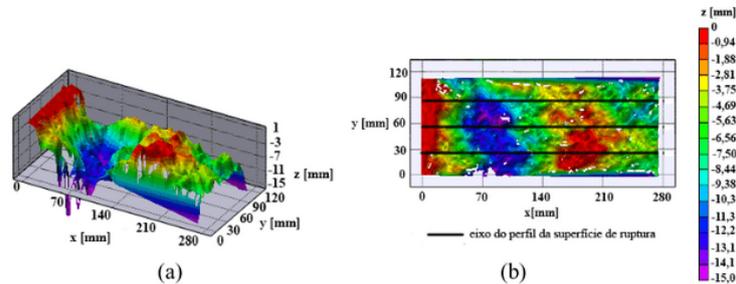


Figura 2- Análise fotogramétrica em 3D (CID-3D). (a) mapa 3D da superfície de ruptura; (b) mapa 2D da superfície de ruptura, com planos utilizados para análise de perfis assinalados

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, variando 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 3 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, o GOM Correlate (RESENDE *et al.*, 2019).

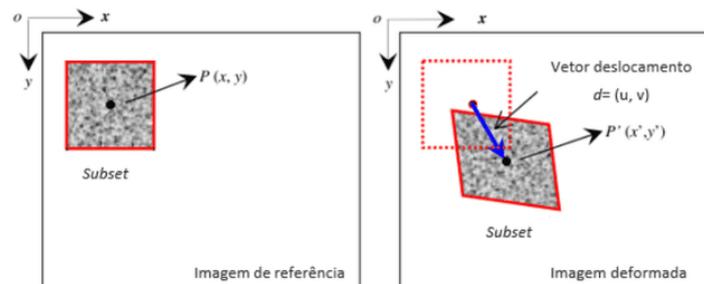


Figura 3 - Representação da evolução do *subset*

Fonte: Rosas (2019)

Segundo Resende (2020), uma maneira 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 $(3.69 \times 10^{-3} \text{ mm})$. Galí e Subramanian (2017) com a mesma forma de análise de erro, encontraram de 2 a $2.83 \times 10^{-3} \text{ mm}$. Também, para verificar a precisão em uma região específica de interesse, uma abordagem é comparar o resultado fornecido pelo software de correlação com o obtido por meio de instrumentação clássica, como um LVDT (*Linear Variable Differential Transformers*, ou transdutor de deslocamento variável linear).

Este método apresenta algumas vantagens importantes em relação às medições tradicionais com LVDT, por exemplo. No caso específico da análise 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 necessária avaliar toda a área de interesse. Nesse caso, a CID fornece medições de campo completo e permite rastrear continuamente a evolução de cada fissura individualmente (CAVAGNIS *et al.*, 2018; RESENDE, 2020).

O desenvolvimento de técnicas de correlação por imagem tem ajudado a disseminar informações sobre a cinemática e propagação da fissura diagonal crítica, tornando-se uma ferramenta importante no estudo da resistência à força cortante de vigas de concreto, com ou sem o reforço de fibras. Desde a década de 1980, quando a CID surgiu, houve discussões e aprimoramentos sobre a metodologia. Alguns marcos, bem como trabalhos que representam esse desenvolvimento, podem ser vistos na Figura 4.

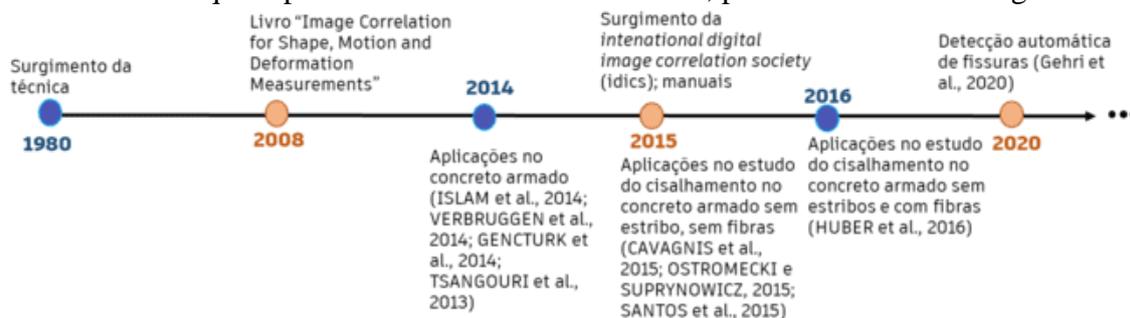


Figura 4 – linha do tempo com marcos importantes da metodologia CID

Em 2008 o livro *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements* (SUTTON *et al.*, 2009) trouxe um importante conjunto de informações sobre o procedimento da CID. Em 2014, alguns trabalhos aplicando a técnica no concreto armado convencional foram publicados, expandindo discussões sobre o comportamento do material em relação à força cortante. Em 2015, foi publicado o manual de boas práticas do *International digital image correlation society*, ampliando mais ainda a CID na academia. Nesse mesmo ano, foram realizados trabalhos importantes que aplicaram a CID no concreto armado sem armadura transversal. As lacunas observadas e discutidas nestes trabalhos abriram portas para a expansão da metodologia para o CRFA, onde o papel das fibras de aço no comportamento da força cortante ainda é discutido. Ao longo dos anos, a CID tem sido combinada com pesquisas de ponta, permitindo o desenvolvimento de técnicas de detecção automática de fissuras em estruturas, reforçando a aplicação da técnica no monitoramento da integridade estrutural (GEHRI *et al.*, 2020).

O estudo contínuo da CID permite que a técnica evolua em termos de precisão e acurácia, sendo cada vez mais aplicada em diferentes áreas da engenharia. Por ser uma técnica de análise robusta, o desenvolvimento de suas etapas de aplicação pode servir como suporte à aquisição de informações para análise quantitativa de danos em estruturas.

3. Metodologia

A metodologia empregada neste trabalho diz respeito ao ensaio de flexão de 3 pontos de uma viga bi-apoiada. A Figura 5 mostra a representação das vigas ensaiadas, com as dimensões em milímetros, bem como a disposição das armaduras, já que trata-se de uma viga de concreto armado, com reforço de fibras de aço. Também ressalta-se que as armaduras transversais (estribos) foram dispostos na metade não monitorada da viga, a

fim de que as fissuras críticas do esforço cortante surgissem na parcela sem a presença dessas armaduras.

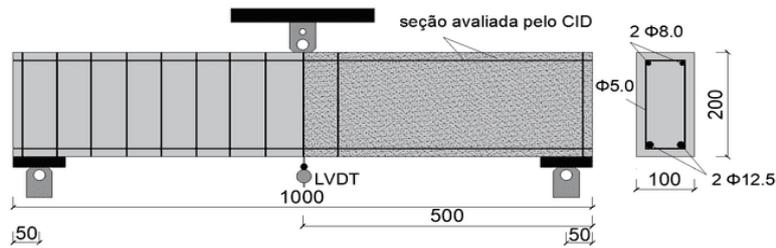


Figura 5 – viga ensaiada no ensaio a flexão de 3 pontos. Dimensões em mm.

O detalhamento da metodologia apresenta aqui consiste na exposição de 3 etapas inerentes à obtenção dos resultados da CID. 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, onde 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 6 mostra o resumo dos passos metodológicos.



Figura 6 – passos metodológicos

3.1 Instrumentação

No presente trabalho, os equipamentos utilizados nos ensaios com auxílio da CID estão expostos na Figura 8, onde é mostrada a viga analisada (Fig. 7-a), a câmera Canon modelo DSLR EOS Rebel SL3 equipada com uma lente EF-S 40mm (Fig. 7-b), um refletor (Fig.7-c), a prensa INSTRON modelo EMIC 23-300 com capacidade de 300 kN (Figura 7-d) e um LVDT localizado no vão central (Fig. 7-e) para fins de validação dos resultados. Tanto a câmera quanto o refletor são posicionados ortogonalmente à viga ensaiada, evitando distorção da imagem.

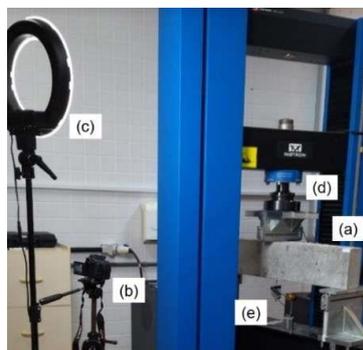


Figura 7: equipamentos utilizados nos ensaios. Em a) a viga, b) a câmera, c) refletor, d) prensa e e) LVDT.

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, a fim de otimizar o tamanho do vídeo a ser avaliado. No caso do presente trabalho, os vídeos foram utilizados com 2 quadros por segundo, editados no *software* gratuito VSDC. Após essa etapa, o software GOM Correlate® (2019) 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 a Figura 8-a e 8-b. A distância entre dois pontos consecuentes ao longo do comprimento de cada segmento seguiu a metodologia de Cavagnis (2015), não ultrapassando o diâmetro máximo do agregado (D_{max}), que no presente caso é de 12.7 mm. A Figura 8-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 Košćak *et al.* (2022) apresentaram recentemente uma metodologia semelhante, e concluíram que ela era eficiente na medição de deslocamentos relativos.

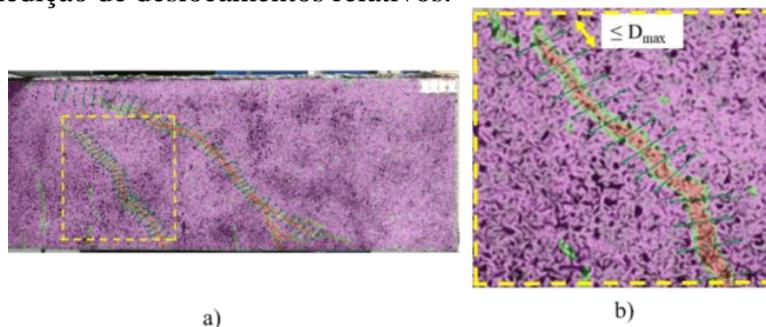


Figura 8 – fissura seccionada em segmentos de reta em a) na visão da viga inteira, e b) com ênfase na distinção dos segmentos, e com a distância conseguinte menor ou igual a D_{max}

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 dos pontos perpendiculares que contornam a fissura.

A Figura 9 mostra a relação entre os deslocamentos relativos (abertura w e deslizamento δ) e os deslocamentos horizontais e verticais (L_x e L_y). Em a) é visto dois pontos de controle, em Figura 9-b o detalhamento destes, com o ângulo (α) do trecho da viga, e na Figura 9-c são mostrados os deslocamentos (L_x') e (L_y'), e a indicação de abertura (w) e deslizamento (δ) das faces da fissura, conforme a equação 01.

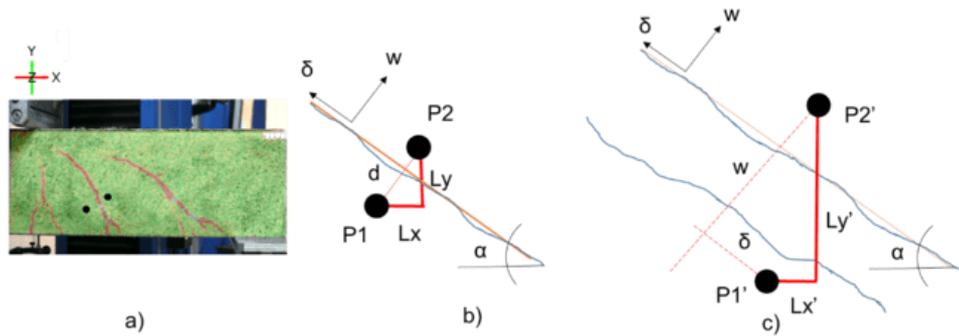


Figura 9– em a) dois pontos de controle, b) detalhe dos dois pontos de controle e c) relação entre os deslocamentos relativos (w) e (δ) e os deslocamentos da fissura (Lx) e (Ly)

$$\begin{pmatrix} \delta \\ w \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\text{sen}\alpha \\ \text{sen}\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{pmatrix} Lx' - Lx \\ Ly' - Ly \end{pmatrix} \tag{01}$$

4. Resultados

Os resultados aqui apresentados são dados de 2 formas distintas. Inicialmente é apresentada a validação da metodologia, onde o deslocamento vertical central (flecha) de uma viga obtido através da CID é comparado com os valores encontrados pelo LVDT. Também é apresentado o erro absoluto entre dois *takes* do vídeo do ensaio, conforme Gali e Subramanian (2017) e Resende (2020). A segunda parte dos resultados é referente à obtenção dos dados capazes de serem extraídos do acompanhamento pela CID. Nesse caso, são apresentados exemplos do acompanhamento da fissuração de uma viga, os campos de deformação horizontais e verticais, e um exemplo de aplicação com extensômetros virtuais. Por fim, são apresentados os deslocamentos relativos de abertura e deslizamento para as fissuras críticas da viga, que são os resultados finais da metodologia aqui apresentada, ao se aplicar a Equação 1.

4.1 Validação da metodologia

A Figura 10-a mostra o diagrama de força cortante *versus* deslocamento vertical no meio do vão (flecha). As duas curvas representadas dizem respeito à leitura pela CID e também pelo LVDT instalado nos ensaios das vigas.

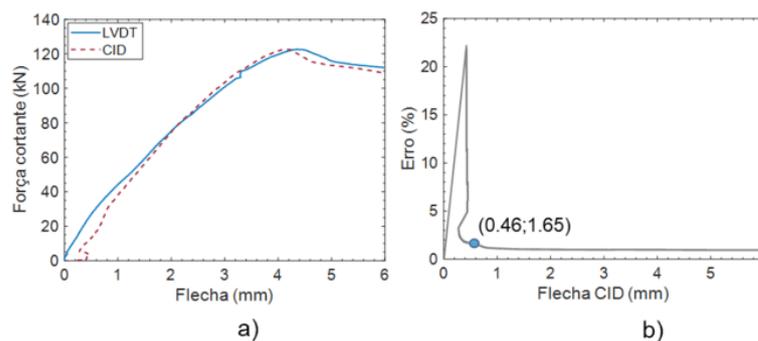


Figura 10 – em a) diagrama flecha versus força cortante da DIC e do LVDT, e b) erro relativo entre as duas curvas

Conforme visto na Figura 10, houve boa correlação entre os resultados obtidos entre a CID e o LVDT. A partir do ponto destacado na Figura 10-b, o erro se manteve abaixo de 1.5%, apesar de inicialmente o erro ser maior. Para reiterar a validação dos resultados obtidos, o erro médio absoluto também foi aferido. A técnica, como mencionado anteriormente, consiste no cálculo da média absoluta dos valores medidos para o deslocamento vertical (Ly) em duas imagens, ou *takes* sucessivos do vídeo. Uma das imagens é antes de se iniciar o ensaio, e a outra é a imediatamente posterior. No

presente caso, foi encontrado um erro de 3.87×10^{-3} milímetros. Valor este, condizente com os demais encontrados na literatura, como Belbachir *et al.* (2018) com um erro de 7 a 12×10^{-3} milímetros, e Cavagnis *et al.* (2018) com 4×10^{-3} milímetros.

4.1 Dados extraídos através da CID

A Figura 11 mostra a possibilidade do acompanhamento do processo de fissuração de uma viga. As imagens do desenvolvimento das fissuras foram retiradas do software GOM Correlate (2019) 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 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 CID ainda são atreladas ao diagrama de força cortante aplicada versus flecha da viga.

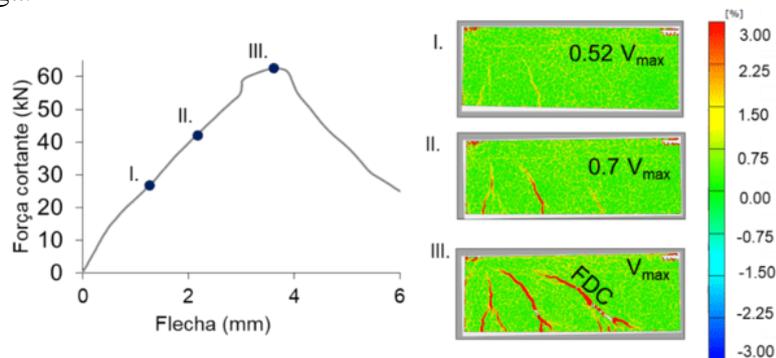


Figura 11 – diagrama flecha versus força cortante e imagem do processo de fissuração da viga em $0.52V_{max}$, $0.7 V_{max}$ e V_{max}

As imagens da Figura 11 representam apenas 3 instantes importantes do processo de fissuração da viga em questão. Entretanto, qualquer situação de mudança de comportamento no elemento estrutural, ou atividade julgada relevante pode ser documentada.

Na mesma linha de raciocínio, a Figura 12-a apresenta o campo de deformações específicas na direção horizontal, e a Figura 12-b apresenta o campo de deformações específicas na direção vertical.

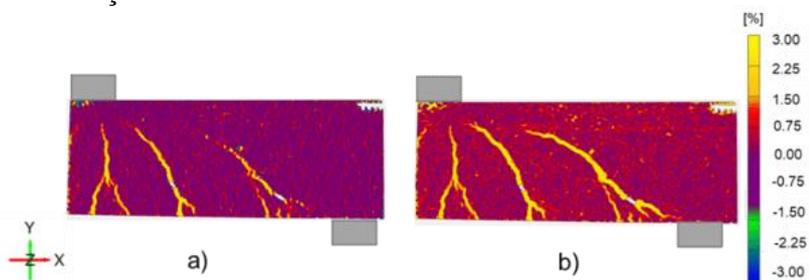


Figura 12 – campo de deformação específica a) horizontal e b) vertical

No caso de vigas de concreto armado sem estribos, era de se esperar uma maior homogeneidade dos campos de deformações na região de análise, com concentração de deformação nas fissuras (GALI E SUBRAMANIAN, 2017). Todavia, avaliar o campo de deformações pode ser útil em estruturas que demandem análises em pontos específicos, como mostra a Figura 13, onde também são mostradas algumas aplicações importantes da CID na engenharia nos últimos anos, demonstrando a robustez do

método. Na imagem 13-a, é realizado o acompanhamento de um ensaio de tração direto, onde extensômetros físicos foram substituídos pelos virtuais. Na imagem 13-b, a CID é utilizada na detecção automática de fissuras. Já na imagem 13-c, é apresentada a superfície de ruptura de um teste de *push-off* em duas dimensões e em três dimensões.

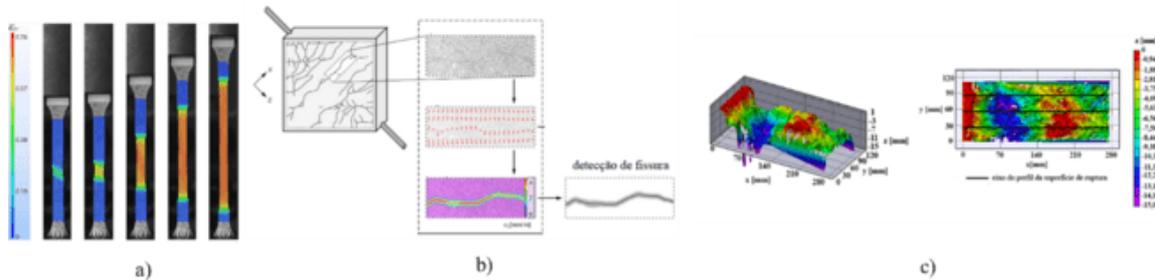


Figura 13 – Aplicações da correlação por imagem digital (CID). a)acompanhamento de ensaio de tração direto, b) detecção automática de fissuras e c) análise fotogramétrica da superfície de ruptura de um ensaio push-off

Fonte: a) Song *et al.* (2023); b) Gehri *et al.* (2020); c) Resende (2020)

Por fim, com os valores de deslocamentos horizontais (L_x) e verticais (L_y), é possível calcular os deslocamentos relativos das faces da fissura, de abertura (w) e deslizamento (δ). A Figura 14 mostra esses valores, medidos em determinados níveis de carregamento em função do V_{max} .

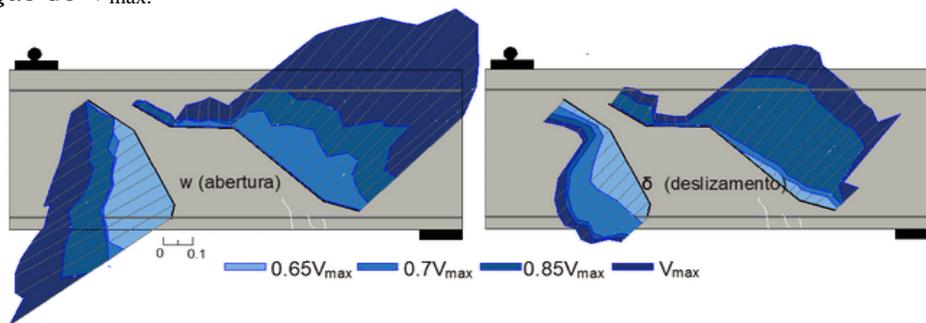


Figura 14 – deslocamentos relativos de abertura e deslizamento das paredes das fissuras para diferentes estágios de carregamento

Os valores de abertura e deslizamento de uma fissura diagonal crítica são os dados de entrada para a maior parte dos modelos que representam o comportamento do concreto perante a força cortante. Com estes valores, é possível calcular cada um dos mecanismos responsáveis pela transferência entre as faces da fissura. Alguns trabalhos recentes (GHERI *et al.* , 2020; MATOS *et al.* , 2020; BI *et al.* , 2021; ALZABEEBE *et al.* , 2023) reforçam a importância desse tipo de abordagem, pois precede o desenvolvimento de modelos condizentes com o comportamento estrutural do concreto, e também, com a influência da adição de fibras no material.

5. Conclusões

A crescente necessidade por tecnologias para o monitoramento e diagnóstico de estruturas reforçadas com fibras de aço (CRFA) é uma realidade atual. O método da correlação digital de imagens (CID) é o foco principal deste artigo e apresenta-se como uma solução eficiente, de baixo custo e fácil execução, capaz de fornecer dados relevantes sobre a eficiência e condição de uma determinada estrutura em uso. O presente trabalho mostrou e detalhou as etapas necessárias para a aplicação da metodologia da CID. Especificamente, as variáveis de interesse são as envolvidas na

análise da força cortante no CRFA, como a abertura (w) e o deslizamento (δ) da fissura crítica de cisalhamento, além dos campos de deformações horizontais e verticais.

A metodologia foi capaz de apresentar dados com boa precisão. A boa correlação entre os dados obtidos pela CID e por um LVDT foram apresentados, além do erro absoluto dentro da margem encontrada na literatura.

Os dados obtidos através da metodologia exposta são as principais variáveis de entrada em modelos que representam os mecanismos de transferência de força cortante no concreto, como o engrenamento dos agregados, por exemplo. Além disso, é possível avaliar o comportamento das fissuras ao longo do ensaio. Essa percepção torna viável, por exemplo, o desenvolvimento de modelos amparados por hipóteses sobre a cinemática da fissuração, que é uma forma racional de explicar o comportamento à força cortante do concreto.

Outras informações importantes também podem ser retiradas das análises, como as obtidas por extensômetros digitais. Além de substituir o instrumento físico, possibilita a medição em várias partes de interesse da estrutura. É uma ferramenta útil e com baixo custo no âmbito da engenharia diagnóstica.

De forma geral, a metodologia apresentada foi eficaz para o objetivo proposto. A técnica da CID mostra-se promissora para a evolução da engenharia estrutural, sendo um método de análise que necessita de poucos recursos para a sua aplicação.

Referências

ALZABEEBEE, S. et al. Multiscale soft computing-based model of shear strength of steel fibre-reinforced concrete beams. *Innovative Infrastructure Solutions*, v. 8, n. 1, p. 1–12, 2023.

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

BELBACHIR, A. et al. Size effect on the contribution of the aggregate interlock mechanism in reinforced concrete beams without shear reinforcement. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, v. 24, n. 9, p. 1363–1380, 2018.

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

CAVAGNIS, F. Shear in reinforced concrete without transverse reinforcement: from refined experimental measurements to mechanical models. *MSc Thesis*, v. 8216, p. 223, 2017.

CAVAGNIS, F.; FERNÁNDEZ 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.

CAVALARO, S. H. P.; BLANCO, A.; PIERALISI, R. Holistic modelling approach for special concrete : from fresh - to hardened - state. n. 2018, p. 84–90, 2019.

GALI, S.; SUBRAMANIAM, K. V. L. Shear behavior of steel fiber reinforced concrete using full-field displacements from digital image correlation. *MATEC Web of Conferences*, v. 120, p. 1–13, 2017.

GARNICA, Z. G. Analysis of shear transfer mechanisms in concrete members without shear reinforcement based on kinematic measurements. 2018.

GEHRI, N.; MATA-FALCÓN, J.; KAUFMANN, W. Automated crack detection and measurement based on digital image correlation. *Construction and Building Materials*, v. 256, p. 119383, 2020.

GOM Correlate, Version, 2019. Hotfix 7. gom-correlate.com

HOULT, N. A. et al. Measuring crack movement in reinforced concrete using digital image correlation: Overview and application to shear slip measurements. *Proceeding of the IEEE*, v. 104, n. 8, p. 1561-1574, 2016.

HUBER, P.; HUBER, T.; KOLLEGGER, J. Investigation of the shear behavior of RC beams on the basis of measured crack kinematics. *Engineering Structures*, v. 113, p. 41–58, 2016.

- JONES, I. et al.** A Good Practices Guide for Digital Image Correlation. International Digital Image Correlation Society, p. 1–88, 2018.
- KOŠČAK, J. et al.** Shear behavior of RC beams without transverse reinforcement: An analysis of crack kinematics and transfer mechanisms based on stereophotogrammetric measurements. *Engineering Structures*, v. 255, n. December 2021, 2022.
- LANTSOGHT, E. O. L.** How do steel fibers improve the shear capacity of reinforced concrete beams without stirrups? *Composites Part B: Engineering*, v. 175, n. June, p. 107079, 2019.
- MATOS, L. M. P. et al.** Constitutive model for fibre reinforced concrete by coupling the fibre and aggregate interlock resisting mechanisms. *Cement and Concrete Composites*, v. 111, n. April, 2020.
- METJE, K.; LEUTBECHER, T.** Verification of the shear resistance of UHPFRC beams – Design method for the German DAfStb Guideline and database evaluation. *Engineering Structures*, v. 277, n. December 2022, p. 115439, 2023.
- NOURI, A. et al.** Quantification of shear strength in reinforced concrete beams using digital image correlation: Experimental and analytical study. *Advances in Structural Engineering*, v. 24, n. 1, p. 147–164, 2021.
- PAN, P. et al.** Systematic errors in two-dimensional digital image correlation due to lens distortion. *Optics and Lasers in Engineering*, v. 51, p. 140-147, 2013
- RESENDE T. L.; CARDOSO, D.; SHEHATA, L.** Uso da técnica de correlação de imagem digital (CID) para análise das contribuições de diferentes mecanismos na resistência à força cortante de vigas de concreto. 61º Congresso Brasileiro do Concreto, n. November, 2019.
- RESENDE, T. L.** Contribuição dos mecanismos resistentes à força cortante em vigas de concreto armado sem e com fibras de aço. Tese de doutorado, 2020
- ROSAS, D. L.** Medição Das Deformações No Plano Pela Técnica De Correlação Digital. 2019.
- SCHMIDT, M. et al.** 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, n. November 2022, p. 105161, 2023.
- SUTTON, M. A.; ORTEU, J. J.; SCHREIER, H. W.** Image correlation for shape, motion and deformation measurements – basic concepts, theory and applications. 1ªed, New York: Springer, 2009