

Análise comparativa da extração de informações de fissuras utilizando luz estruturada e técnicas de SfM

Comparative analysis of crack information extraction using structured light and SfM techniques

Iane Silva Pereira¹; Samir de Souza Oliveira Alves²; Luis Augusto Koenig Veiga³

¹ Universidade Federal do Paraná, Departamento de Geomática, Curitiba/PR, Brasil. Email: ianepereira@ufpr.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9935-4746>

² Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Cartográfica, Rio de Janeiro/RJ, Brasil. Email: samir.alves@eng.uerj.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3083-0681>

³ Universidade Federal do Paraná, Departamento de Geomática, Curitiba/PR, Brasil. Email: kngveiga@ufpr.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4026-5372>

Resumo: A segurança estrutural é uma preocupação fundamental na engenharia civil, tornando essencial o monitoramento de manifestações patológicas, especialmente fissuras, que estão entre os defeitos mais frequentes em estruturas de concreto. A caracterização precisa dessas fissuras é crucial para garantir a integridade estrutural e prevenir falhas. Métodos tradicionais frequentemente dependem de ensaios destrutivos ou inspeções visuais, que podem danificar a estrutura ou depender da experiência do operador. Em contraste, técnicas não destrutivas permitem uma aquisição de dados mais confiável e reprodutível. Este estudo apresenta uma análise comparativa da caracterização de fissuras utilizando técnicas de luz estruturada e *Structure from Motion* (SfM). Ambas geram nuvens de pontos das quais é possível extrair informações geométricas, como a abertura de fissuras. O estudo foi realizado em uma fissura localizada no Restaurante Universitário Botânico, em Curitiba, Paraná. A aquisição de dados foi feita com um scanner portátil de luz estruturada e um smartphone para o SfM, utilizando alvos calibrados referenciados por estação total. Os resultados indicam que ambas as técnicas são adequadas, sendo a luz estruturada mais estável em medições locais, enquanto o SfM apresenta melhor acurácia na geometria global.

Palavras-chave: Nuvem de Pontos 1; Ensaios não destrutivos 2; Integridade Estrutural 3; Manifestação Patológica 4.

Abstract: Structural safety is a critical concern in civil engineering, making the monitoring of pathological manifestations essential, particularly cracks, which are among the most frequent defects in concrete structures. Accurate crack characterization is fundamental to ensuring structural integrity and preventing potential failures. Traditional assessment methods often rely on destructive testing or visual inspection, which may either damage the structure or depend heavily on operator expertise. In contrast, non-destructive techniques enable more reliable and repeatable data acquisition. This study presents a comparative analysis of crack characterization using structured light and Structure from Motion (SfM) techniques. Both approaches generate point clouds from which geometric features, such as crack width, can be extracted. The case study was conducted on a crack located at the Botanic University Restaurant in Curitiba, Paraná, Brazil. Data acquisition was performed using a portable infrared structured light scanner and a smartphone for the SfM approach. Calibrated targets, referenced by a total station, were used as control points. The results demonstrate that both techniques are suitable for geometric characterization, although they present distinct performance in terms of accuracy and consistency. Structured light provided more stable local measurements, while SfM showed better agreement with reference distances for global geometry.

Keywords: Point Cloud 1; Non-destructive testing 2; Structural Integrity 3; Pathological Manifestation 4.

1. Introdução

O desenvolvimento acelerado da construção civil, impulsionado pelas crescentes demandas da sociedade, tem promovido avanços científicos e tecnológicos significativos (AMBRÓSIO, 2004). Entretanto, esse crescimento rápido também tem resultado no aumento de estruturas que apresentam desempenho insatisfatório, devido a fatores como falhas não intencionais, falta de qualificação técnica, uso inadequado de materiais e erros de projeto. Tais aspectos contribuem para a deterioração estrutural e, conseqüentemente, para o surgimento de manifestações patológicas (ARIVABENE, 2015).

Dentre as diversas manifestações patológicas em edificações, as fissuras são as mais recorrentes, especialmente em estruturas de concreto, e representam uma preocupação relevante quanto ao desempenho estrutural e à durabilidade (MACHADO, 2002). A detecção precoce e a adequada caracterização desses defeitos são fundamentais para a implementação de medidas eficazes de mitigação (ZANETTI, 2020). Assim, o monitoramento contínuo, tanto durante a fase construtiva quanto ao longo da vida útil das estruturas, é essencial para prevenir falhas que possam resultar em perdas significativas de natureza humana, ambiental e econômica (MONICO, 1988).

As fissuras estão entre as manifestações patológicas mais evidentes visualmente, frequentemente causando desconforto aos usuários e levantando preocupações quanto à segurança estrutural. Segundo Veiga (1998), podem gerar sensações de insegurança, desconforto visual e dúvidas quanto à estabilidade da edificação. Além da degradação estética e de problemas de infiltração, as fissuras podem indicar falhas estruturais subjacentes e comprometer a durabilidade dos sistemas construtivos. Por essa razão, o monitoramento estrutural não deve se restringir às fases iniciais do projeto, devendo também contemplar a avaliação contínua da segurança das estruturas (GONZÁLEZ-AGUILERA *et al.*, 2008).

Tanto métodos destrutivos quanto não destrutivos podem ser empregados no monitoramento de estruturas de concreto. Os métodos destrutivos envolvem a extração de amostras de material para análise laboratorial. Embora esses ensaios deixem marcas na estrutura, geralmente não comprometem sua estabilidade. No entanto, seu uso tem se tornado menos desejável, especialmente em estruturas já em serviço (FREITAS *et al.*, 2014). Em contrapartida, os ensaios não destrutivos (END) são definidos como técnicas que não comprometem o desempenho do elemento avaliado, embora algumas possam causar danos superficiais mínimos (BUNGEY *et al.*, 2006).

Os métodos convencionais para avaliação de fissuras incluem selos de gesso ou vidro, fissurômetros e inspeção visual. Abordagens mais avançadas envolvem o uso de instrumentos como paquímetros, sensores de deslocamento, dispositivos ultrassônicos e sistemas de emissão acústica. A escolha do método mais adequado depende de fatores como custo, acessibilidade e precisão requerida (PALAORO; RODRIGUES, 2017; ROCHA, 2017).

De modo geral, a avaliação de fissuras ainda se baseia amplamente em inspeções manuais ou visuais, exigindo profissionais experientes para a análise das condições estruturais. Essas abordagens são demoradas, demandam elevado esforço operacional e podem apresentar riscos à segurança, especialmente em áreas de difícil acesso. Além disso, sua confiabilidade depende fortemente da experiência e do julgamento subjetivo do inspetor (KANG, 2018).

Diante dessas limitações, torna-se necessária a adoção de técnicas não destrutivas que possibilitem avaliações mais automatizadas, precisas e confiáveis das condições estruturais. Avanços tecnológicos recentes na engenharia têm introduzido novas abordagens de monitoramento, entre as quais se destacam os métodos baseados em nuvens de pontos.

As nuvens de pontos consistem em conjuntos de coordenadas tridimensionais (X, Y, Z) definidas em um sistema cartesiano, representando pontos capturados a partir de uma única cena ou da combinação de múltiplas cenas para descrever um objeto ou área de interesse. Esses dados podem ser gerados por meio de técnicas de reconstrução baseadas em imagens ou por tecnologias de varredura 3D, como scanners a laser e fotogrametria (VAN GENECHTEN *et al.*, 2008; MÜLLER FILHO, 2015).

Entre as diferentes técnicas de aquisição tridimensional, a fotogrametria tem recebido atenção crescente devido à sua flexibilidade, baixo custo relativo e capacidade de produzir simultaneamente informações geométricas e de textura. A evolução dos algoritmos de *Structure from Motion* (SfM) ampliou sua aplicação em inspeções de estruturas, permitindo a reconstrução tridimensional de superfícies a partir de múltiplas imagens obtidas de diferentes posições. Estudos recentes demonstram a aplicação de técnicas fotogramétricas e de nuvens de pontos derivadas de imagens na documentação de fachadas, na avaliação de condições superficiais e na caracterização de danos em estruturas civis (ZHU *et al.*, 2023; MAJIDI; OMIDALIZARANDI; SHARIFI, 2023).

No contexto específico da caracterização de fissuras, a reconstrução tridimensional baseada em imagens tem avançado de abordagens essencialmente visuais para métodos capazes de representar geometricamente o dano. Majidi, Omidalizarandi e Sharifi (2023), por exemplo, investigaram a reconstrução tridimensional de fissuras utilizando imagens obtidas por fotogrametria de curta distância, evidenciando o potencial dessas técnicas para a representação geométrica de defeitos superficiais. De forma complementar, estudos mais recentes têm explorado a combinação de informações

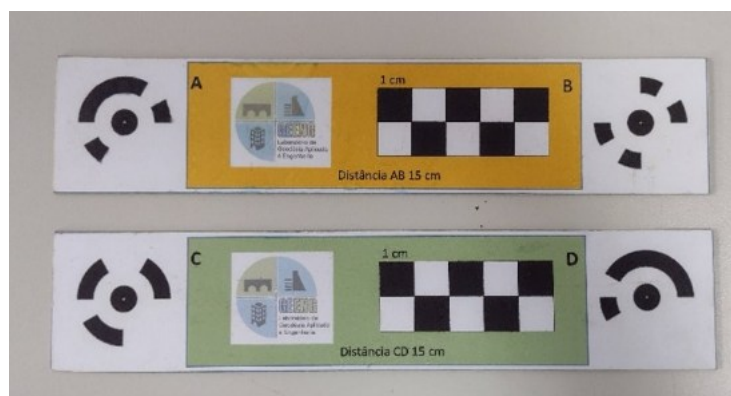
provenientes de imagens e nuvens de pontos para a extração automatizada de fissuras, incluindo aplicações voltadas à identificação de danos em estruturas de concreto e tanques industriais (ALAMDARI; EBRAHIMKHANLOU, 2023, 2024; GUO *et al.*, 2024; HU *et al.*, 2024).

Dessa forma, o presente estudo investiga o uso de nuvens de pontos obtidas por diferentes técnicas não destrutivas, especificamente luz estruturada e Structure from Motion (SfM), com o objetivo de realizar uma análise comparativa da extração de informações de fissuras, considerando a capacidade de representação e mensuração dos defeitos e a influência das características de aquisição e processamento. Busca-se, assim, contribuir para o desenvolvimento de procedimentos de inspeção mais objetivos, acessíveis e confiáveis para a caracterização de manifestações patológicas em estruturas.

2. Materiais e métodos

Para a realização desta pesquisa, foram conduzidos ensaios em uma fissura localizada no Restaurante Universitário do Setor de Ciências Biológicas, situado no campus do Jardim Botânico da Universidade Federal do Paraná. Embora se trate de uma estrutura de concreto relativamente recente, inaugurada em 2012, já apresenta manifestações visíveis de fissuração.

Para o apoio em campo, foram utilizados dispositivos de medição com comprimento de 15 cm (Figura 1), fixados com fita adesiva próximos à fissura. Esses dispositivos foram empregados como referência durante a etapa de processamento e calibrados por meio de medições realizadas com uma estação total TS15. Para isso, a estação foi devidamente nivelada, e as coordenadas dos pontos A e B, localizados nos centros dos alvos circulares, foram determinadas nas posições direta e inversa. As coordenadas X, Y e Z de cada ponto foram registradas para o cálculo dos resultados, possibilitando a obtenção da distância entre os pontos. O mesmo procedimento foi repetido para os pontos C e D.



*Figura 1 – Dispositivos de medição graduados.
Fonte: Os autores (2026).*

As medições foram realizadas com uma estação total TS15, com precisão angular de 1" e precisão na medição de distâncias de $\pm (1 \text{ mm} + 1,5 \text{ ppm})$, garantindo elevada acurácia na determinação das coordenadas dos pontos de controle. O uso de pontos de controle calibrados com uma estação total de alta precisão contribui para a redução das incertezas de medição e para o aumento da confiabilidade dos parâmetros geométricos extraídos.

2.1 Luz estruturada

A luz estruturada é uma técnica de sensoriamento ativo que utiliza uma fonte de luz controlada para escanear um objeto ou superfície, gerando dados digitais capazes de fornecer informações tridimensionais. Esse método baseia-se na projeção de padrões conhecidos sobre a superfície e na captura de suas deformações por meio de sensores ópticos. A partir dos padrões refletidos e distorcidos, é possível reconstruir a geometria do objeto sem contato físico (ROBINSON *et al.*, 2004).

2.1.1 Aquisição e processamento da nuvem de pontos

Para a aquisição da nuvem de pontos, a fissura foi escaneada utilizando o equipamento 3D Scanner Pro 1.0, um dispositivo portátil fabricado pela XYZprinting. O equipamento apresenta resolução de varredura variando entre 1 e 2,5 mm, volume mínimo de captura de $50 \times 50 \times 50$ mm e volume máximo de $1000 \times 1000 \times 2000$ mm. Sua distância operacional varia entre 300 e 500 mm em relação à superfície alvo. Por se tratar de um sistema de luz estruturada, o scanner é equipado com duas câmeras (esquerda e direita) e um projetor infravermelho.

A etapa inicial consistiu na conexão do scanner a um notebook para iniciar o processo de aquisição de dados (Figura 2). O equipamento disponibiliza quatro modos de varredura: *object* ($600 \times 600 \times 300$ mm), *head* ($800 \times 500 \times 800$ mm), *body* ($1000 \times 1000 \times 2000$ mm) e *face* (aproximadamente o tamanho de um rosto humano).



Figura 2 – Digitalização da fissura por luz estruturada.
Fonte: Os autores (2026).

Após testes preliminares, o modo “*head*” foi selecionado como o mais adequado para a captura da geometria da fissura. Para minimizar perdas de sinal e garantir a qualidade dos dados, o scanner foi movimentado de forma uniforme ao longo da superfície, evitando movimentos bruscos e oscilações. O processo de varredura teve duração aproximada de 5 minutos.

O scanner opera por meio do software proprietário XYZscan Handy, responsável pelo processamento dos dados capturados e sua conversão em nuvem de pontos. O conjunto de dados gerado pode ser visualizado no próprio software, onde são realizadas operações básicas, como medições e melhorias na qualidade, incluindo redução de ruído e preenchimento de lacunas.

Posteriormente, a nuvem de pontos foi exportada no formato *Polygon File Format* (PLY), que permite o armazenamento não apenas das coordenadas X, Y e Z, mas também de atributos adicionais, como cor, intensidade e normais de superfície. O arquivo PLY foi então importado para o software *CloudCompare* (Figura 3), no qual foram conduzidas análises mais detalhadas e medições refinadas das características da fissura.

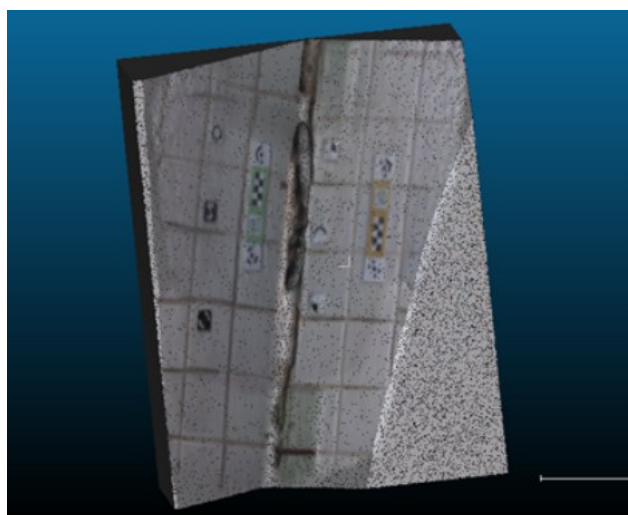


Figura 3 – Nuvem de pontos gerada por luz estruturada no CloudCompare.
Fonte: Os autores (2026).

Ressalta-se que a resolução do scanner pode limitar a detecção de aberturas muito finas de fissuras, especialmente aquelas inferiores à escala milimétrica, aspecto que deve ser considerado na interpretação dos resultados.

2.2 Structure from motion

O Structure from Motion (SfM) é uma técnica de processamento fotogramétrico que surgiu na década de 1980, impulsionada pelos avanços em algoritmos de detecção e correspondência de características. Essa abordagem permite a reconstrução de modelos digitais tridimensionais por meio da geração de nuvens de pontos (WESTOBY *et al.*, 2012).

De acordo com Graça (2019), o SfM pode ser descrito como uma sequência de etapas que incluem a detecção e correspondência automática de feições (pontos homólogos – *tie points*), o ajustamento por feixe (*bundle adjustment*), que consiste na estimativa simultânea das posições e orientações das câmeras juntamente com as coordenadas tridimensionais dos pontos homólogos, e, em muitos casos, a densificação da nuvem de pontos. O método baseia-se nos princípios fundamentais da fotogrametria, nos quais as coordenadas 3D são derivadas a partir de múltiplas imagens com sobreposição. No entanto, diferentemente da fotogrametria convencional, o SfM estima automaticamente a geometria da cena, bem como as posições e orientações das câmeras, sem a necessidade de conhecimento prévio das coordenadas no espaço objeto.

2.2.1 Aquisição e processamento de imagens

Para a aplicação do método SfM, foi utilizado um smartphone Samsung Galaxy A32, equipado com uma câmera principal de 64 MP, resolução de imagem de 9000×7000 pixels e sensor com dimensões aproximadas de $1/4.0''$. O dispositivo foi movimentado ao redor da fissura e dos alvos de referência, capturando uma série de imagens a partir de diferentes ângulos, mantendo-se a estabilidade para garantir a nitidez das imagens.

As imagens foram adquiridas com sobreposição suficiente, de modo que cada fotografia abrangesse parcialmente a área registrada na imagem anterior. Essa estratégia é fundamental para possibilitar uma correspondência precisa de feições e uma reconstrução tridimensional confiável. Após inspeção visual, foram selecionadas 53 imagens (Figura 4), com base em critérios como qualidade, nitidez, exposição adequada e nível de sobreposição, sendo descartadas imagens desfocadas ou com exposição inadequada que pudessem comprometer o processo de reconstrução. As imagens selecionadas foram então transferidas para um computador para processamento.



Figura 4 – Aquisição de imagens para o método SfM.

Fonte: Os autores (2026).

Após a aquisição das imagens, o processamento fotogramétrico foi realizado no software *Agisoft Metashape*, seguindo um fluxo de trabalho estruturado para garantir a geração de uma nuvem de pontos confiável e precisa. A primeira etapa consistiu no alinhamento das imagens. Nessa fase, o software detectou e correlacionou automaticamente feições homólogas entre imagens sobrepostas, utilizando algoritmos de detecção de características. Com base nessas correspondências, foi realizado o ajustamento por feixe (*bundle adjustment*), permitindo a estimativa simultânea dos parâmetros internos da câmera, bem como de suas posições e orientações no espaço. Como resultado, foi gerada uma nuvem de pontos esparsa, representando a geometria geral da cena. Em seguida, procedeu-se à avaliação da qualidade do alinhamento por meio da análise do erro de reprojeção e da distribuição espacial dos pontos de ligação. Quando necessário, pontos mal ajustados foram removidos, visando aumentar a robustez da solução.

Após o refinamento do alinhamento, foi gerada a nuvem de pontos densa por meio de um algoritmo de estereoscopia multivisão (*multi-view stereo – MVS*). Essa etapa aumentou significativamente a quantidade de pontos, permitindo uma representação mais detalhada da geometria da fissura. Os parâmetros de qualidade foram ajustados de modo a equilibrar o tempo de processamento e o nível de detalhamento. Na sequência, a partir da nuvem de pontos densa (Figura 5), foi criada uma malha tridimensional representando a geometria da superfície. Essa malha serviu de base para a etapa de texturização, na qual as imagens originais foram projetadas sobre o modelo, resultando em uma representação realista da superfície.



Figure 5 – Nuvem de pontos densa gerada no Agisoft Metashape.

Fonte: Os autores (2026).

Para garantir a consistência métrica, os alvos calibrados posicionados próximos à fissura foram identificados e marcados manualmente nas imagens dentro do software. Esses alvos foram utilizados como pontos de controle para definir a escala do modelo reconstruído. As distâncias de referência adotadas nesse processo correspondem aos valores obtidos por meio das medições com a estação total dos dispositivos de medição graduados. Especificamente, as distâncias entre os centros dos alvos circulares (A–B e C–D) foram inseridas no software para realizar o correto escalonamento e ajuste do modelo. Esse procedimento assegurou que a nuvem de pontos gerada apresentasse consistência métrica com as dimensões

reais da estrutura, reduzindo erros de escala e aumentando a confiabilidade das medições geométricas extraídas da reconstrução por SfM.

Destaca-se que a acurácia do método SfM depende de fatores como qualidade das imagens, condições de iluminação, calibração da câmera e nível de sobreposição entre as imagens, os quais podem influenciar diretamente a qualidade da nuvem de pontos reconstruída. Em comparação com a técnica de luz estruturada, o SfM apresenta uma solução de baixo custo e maior flexibilidade operacional, embora, em geral, apresente menor precisão geométrica.

2.3.1 Análise estatística

Para a avaliação quantitativa do desempenho das técnicas de luz estruturada e SfM, foi calculado um conjunto de métricas estatísticas com base na comparação entre as distâncias medidas e os valores de referência obtidos por meio da estação total. A análise contemplou indicadores baseados em erro e variabilidade, permitindo avaliar tanto a acurácia quanto a precisão dos métodos.

A acurácia de cada técnica foi avaliada por meio do cálculo do erro médio (*bias*) e da Raiz do Erro Quadrático Médio (Root Mean Square Error - RMSE). O erro médio foi definido como a média aritmética das diferenças entre os valores medidos e os valores de referência, possibilitando a identificação de desvios sistemáticos. O RMSE foi utilizado para quantificar a magnitude global do erro, considerando simultaneamente componentes sistemáticas e aleatórias.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{ref})^2}$$

Adicionalmente, a precisão das medições da abertura de fissuras foi avaliada por meio do desvio padrão, calculado a partir de múltiplos segmentos amostrados ao longo da fissura. Essa métrica fornece uma estimativa da dispersão dos valores medidos e reflete a consistência interna de cada técnica.

Todos os cálculos estatísticos foram realizados considerando a formulação amostral, utilizando $n-1$ no denominador para a estimativa da variância. A combinação dessas métricas permite uma avaliação abrangente dos métodos, distinguindo entre viés sistemático, acurácia global e variabilidade das medições.

As distâncias de referência obtidas com a estação total foram adotadas como valores de verdade de campo (*ground truth*) para a avaliação quantitativa da acurácia de ambas as técnicas. Com base nesses valores, foram calculadas as métricas de erro para analisar o desempenho de cada método.

3. Resultados

A fissura analisada, juntamente com os dispositivos de medição graduados posicionados, é apresentada na Figura 6, a qual ilustra a configuração espacial adotada para a extração das medidas geométricas.

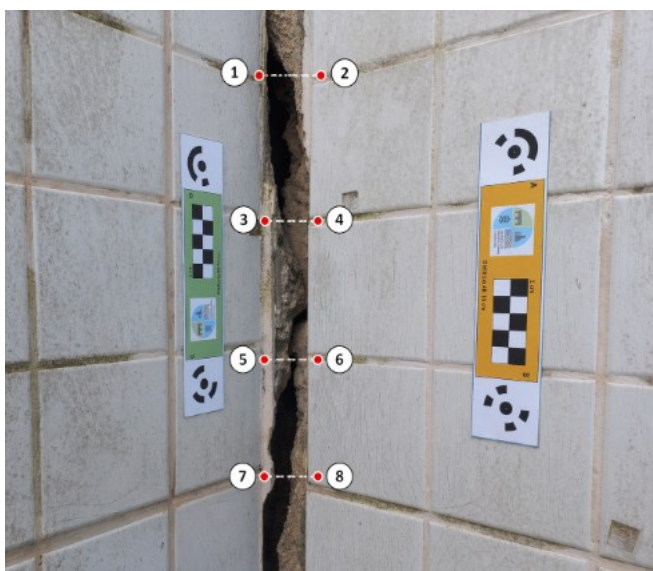


Figura 6 – Fissura e dispositivos de medição.
Fonte: Os autores (2026).

As distâncias de referência obtidas por meio da estação total (Tabela 1) foram adotadas como valores de verdade de campo (*ground truth*) para a avaliação da acurácia das nuvens de pontos geradas por ambas as técnicas. Além das distâncias nominais entre os alvos (A–B e C–D), a inclusão dos segmentos complementares (D–A e C–B) proporcionou um conjunto de dados mais robusto para a validação.

Tabela 1 – Distâncias medidas com estação total (valores de referência).

Segmento	Distância (cm)
A → B	15,01
C → D	14,99
D → A	19,66
C → B	19,52

Fonte: Os autores (2026).

3.1 Avaliação da acurácia das medições de distâncias

Para avaliar a acurácia do método de luz estruturada, as distâncias entre os mesmos pontos de referência (1–2, 3–4, 5–6 e 7–8) foram medidas utilizando a nuvem de pontos gerada. O arquivo no formato PLY foi importado para o software CloudCompare, no qual a ferramenta *Point Picking* foi utilizada para selecionar os centros dos alvos circulares e calcular automaticamente as distâncias (Figura 7).



Figura 7 – Medição das distâncias de referência por luz estruturada.
Fonte: Os autores (2026).

As distâncias extraídas da nuvem de pontos obtida por luz estruturada (Tabela 2) apresentam uma superestimação consistente quando comparadas aos valores de referência. Para os segmentos A–B e C–D, foram observados desvios de aproximadamente +0,57 cm e +0,66 cm, respectivamente. De forma semelhante, para os segmentos maiores (D–A e C–B), foram identificadas diferenças de cerca de +0,43 cm e +0,55 cm. O erro médio (*bias*) calculado foi de +0,55 cm, indicando a presença de um desvio sistemático.

A consistência do sinal do erro é um dos aspectos mais relevantes desse resultado. Em todos os quatro segmentos avaliados, as distâncias obtidas por luz estruturada foram superiores aos valores determinados pela estação total, com erros absolutos entre 0,43 e 0,66 cm. Assim, o comportamento observado não se caracteriza apenas por uma dispersão aleatória das medições, mas por uma tendência positiva relativamente uniforme. Esse resultado indica que, nas condições experimentais adotadas, a luz estruturada apresentou uma limitação predominantemente sistemática na recuperação das dimensões espaciais.

Essas discrepâncias sugerem uma tendência de superestimação associada ao método de luz estruturada, possivelmente relacionada a imprecisões no escalonamento ou a efeitos de reconstrução da superfície. Esse comportamento é reforçado pelo valor de RMSE de 0,56 cm, indicando que os desvios, além de sistemáticos, apresentam relativa uniformidade entre as diferentes distâncias analisadas. Tal padrão sugere a presença de uma distorção de escala que afeta a geometria reconstruída.

Esse resultado demonstra que uma nuvem de pontos pode apresentar elevada consistência interna e, simultaneamente, estar deslocada em relação à referência métrica. Portanto, a consistência das medições não deve ser utilizada isoladamente como indicador de acurácia. A existência de um viés sistemático reforça a necessidade de procedimentos de calibração, controle dimensional ou utilização de referências métricas quando a nuvem de pontos for empregada para quantificação de danos.

Tabela 2 – Distâncias medidas por luz estruturadas.

Segmento	Distância (cm)
A → B	15,58
C → D	15,65
D → A	20,09
C → B	20,07

Fonte: Os autores (2026).

O mesmo procedimento foi aplicado à nuvem de pontos gerada pela técnica de Structure from Motion (SfM), na qual as distâncias correspondentes foram extraídas do conjunto de dados reconstruído, seguindo os mesmos critérios de medição adotados para os dados de luz estruturada (Tabela 3).

Tabela 3 – Distâncias medidas por SfM.

Segmento	Distância (cm)
A → B	15,01
C → D	14,99
D → A	19,69
C → B	19,58

Fonte: Os autores (2026).

O erro médio foi de aproximadamente +0,05 cm, enquanto o RMSE também foi de aproximadamente 0,05 cm, indicando desvios mínimos e elevada fidelidade geométrica. Esses resultados demonstram que o procedimento de escalonamento baseado em distâncias de controle foi eficaz para garantir a consistência métrica do modelo.

A análise comparativa entre os dois métodos evidencia comportamentos distintos: enquanto a técnica de luz estruturada apresenta uma superestimação sistemática, provavelmente associada a efeitos de escalonamento ou reconstrução, o SfM apresenta viés desprezível e maior acurácia na representação da geometria global.

3.2 Análise da abertura de fissuras

As medições da abertura da fissura obtidas por ambas as técnicas são apresentadas nas Tabelas 4 e 5, com base em múltiplos segmentos amostrados ao longo da fissura.

Os resultados obtidos por luz estruturada (Tabela 4) indicam aberturas variando entre 4,44 cm e 4,69 cm, com valor médio de 4,53 cm e desvio padrão de 0,12 cm, evidenciando baixa dispersão e elevada consistência interna.

Tabela 4 – Fissura medida por luz estruturada.

Fissura	Distância (cm)
1 → 2	4,69
3 → 4	4,44
5 → 6	4,56
7 → 8	4,44

Fonte: Os autores (2026).

As medições obtidas por SfM (Tabela 5) variam entre 4,09 cm e 4,32 cm, com valor médio de 4,23 cm e desvio padrão de 0,10 cm. Embora a variabilidade também seja baixa, os valores são sistematicamente inferiores aos obtidos por luz estruturada.

Tabela 5 – Fissura medida por SfM.

Fissura	Distância (cm)
1 → 2	4,09
3 → 4	4,27
5 → 6	4,32
7 → 8	4,22

Fonte: Os autores (2026).

Essa diferença sistemática sugere que a técnica de luz estruturada tende a superestimar levemente características geométricas locais, enquanto o SfM pode subestimá-las em função de limitações relacionadas à resolução das imagens e ao processo de reconstrução da superfície.

A diferença observada entre as técnicas é de aproximadamente 0,30 cm em termos médios, com a luz estruturada apresentando média de 4,53 cm e o SfM de 4,23 cm. Apesar de ambos os métodos apresentarem baixa dispersão interna, o comportamento sistemático das médias demonstra que a diferença entre as técnicas não decorre apenas de variabilidade aleatória. Esse resultado é particularmente importante porque evidencia que a avaliação da fissura em uma nuvem de

pontos depende tanto da estabilidade das medições quanto da capacidade do método de reconstruir corretamente as bordas que delimitam a abertura.

3.3 Análise comparativa de desempenho

Os resultados estatísticos evidenciam duas características complementares das técnicas avaliadas:

- A luz estruturada fornece medições locais mais consistentes, porém apresenta um viés sistemático positivo na estimativa de distâncias;
- O SfM demonstra maior acurácia na representação da geometria global, com viés desprezível e valores de RMSE significativamente menores.

A comparação conjunta dos resultados permite identificar uma diferença importante entre precisão interna e acurácia absoluta. A luz estruturada apresentou baixa dispersão nas medições da abertura da fissura, mas os resultados das distâncias de controle revelaram um deslocamento sistemático em relação à referência. O SfM, por sua vez, apresentou maior proximidade com as distâncias determinadas pela estação total, além de reproduzir de maneira consistente as dimensões analisadas da fissura.

os resultados deste estudo não indicam simplesmente a substituição de uma técnica pela outra, mas evidenciam aplicações complementares. O SfM apresentou melhor desempenho métrico na configuração experimental analisada, particularmente na reprodução das distâncias de referência, enquanto a luz estruturada apresentou boa consistência das medições locais, embora com tendência sistemática de superestimação. A escolha entre as técnicas deve, portanto, considerar o nível de precisão requerido, a escala da área a ser levantada, as condições de iluminação, a distância de aquisição, a resolução necessária e os recursos disponíveis.

4. Conclusão

Este estudo apresentou uma avaliação comparativa da caracterização de fissuras com base em nuvens de pontos geradas pelas técnicas de luz estruturada e Structure from Motion (SfM), incorporando métricas estatísticas para a análise quantitativa de seu desempenho.

Os resultados demonstraram que o SfM alcançou maior acurácia na representação da geometria global, evidenciada pelos baixos valores de erro médio e RMSE quando comparados às medições de referência obtidas por meio da estação total. Isso indica que, quando adequadamente escalonado com base em distâncias de controle, o SfM pode fornecer informações dimensionais confiáveis para a avaliação estrutural.

Em contrapartida, a abordagem por luz estruturada apresentou uma superestimação sistemática das distâncias, porém demonstrou maior consistência nas medições da abertura de fissuras, refletida por sua baixa variabilidade. Esse comportamento sugere que a luz estruturada é mais adequada para análises locais detalhadas, nas quais a estabilidade das medições é um fator crítico.

O uso combinado de múltiplas distâncias de referência e segmentos amostrais contribuiu para uma avaliação mais robusta, permitindo distinguir entre acurácia global e precisão local. Esses resultados reforçam que o desempenho de cada técnica é fortemente influenciado por suas características intrínsecas, de modo que sua aplicabilidade depende dos requisitos específicos da análise.

De modo geral, a luz estruturada é recomendada para a caracterização local de fissuras com alta resolução, enquanto o SfM se apresenta como uma solução flexível e de baixo custo, com melhor desempenho na reconstrução geométrica em maior escala. Trabalhos futuros devem explorar a integração entre ambas as abordagens, bem como o aprimoramento dos procedimentos de calibração e escalonamento, a fim de aumentar a acurácia e ampliar a aplicabilidade de métodos baseados em nuvens de pontos no monitoramento da integridade estrutural.

Referências

Alamdari, A. G.; Ebrahimkhanlou, A. Multi-scale robotic scan ning of surface cracks in concrete structures. In: Nondestructive Characterization and Monitoring of Advanced, Aero space, Civil Infrastructure, and Transportation XVIII. SPIE, p. 197-203, 2024.

-
- Alamdari, A. G.; Ebrahimkhanlou, A. A robotic approach for crack detection through the integration of cameras and LiDARs. *Sensors and Smart Structures technologies for Civil Infrastructure, Mechanical, and Aerospace Systems 2023*. SPIE, p. 21-29, 2023.
- AMBRÓSIO, T. S. Patologia, tratamento e reforço de estruturas de Concreto no metrô de São Paulo. São Paulo, 2004. 138p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil). Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo - SP, 2004.
- Arivabene, A. C. Patologias em estruturas de concreto armado: Estudo de caso. *Revista Especialize On-line IPOG*, v. 3, n. 10, 1-22, 2015.
- Bungey, J. H. et al. *Testing of Concrete in Structures*. New York, USA: Taylor & Francis, 2006. 352p.
- Freitas, J. G. et al. Utilização de termografia infravermelha para avaliação de fissuras em fachada com revestimento de argamassa e pintura. *Ambiente Construído*, v. 14, 57-73, 2014.
- GRAÇA, N. L. S. S. Estudo da influência da geometria de voo na obtenção de produtos cartográficos empregando recobrimento aéreo com VANT e técnica fotogramétrica SFM. Curitiba, 2019. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas). Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR, 2019.
- González-Aguilera, D. et al. A new approach for structural monitoring of large dams with a three-dimensional laser scanner. *Sensors*, v. 8, 5866-5883, 2008.
- Guo, M. et al. Intelligent extraction of surface cracks on LNG outer tanks based on close-range image point clouds and infrared imagery. *J Nondestruct Eval*, 43(3):84, 2024.
- Hu, K. et al. 3D vision technologies for self-developed structural external crack damage recognition robot. *Autom Const*, 2024.
- Kang, D.; Cha, Y. J. Autonomous UAVs for structural health monitoring using deep learning and ultrasonic beacon system with geo-tagging. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, v. 33, n. 10, 885-902, 2018.
- Machado, A. P. Reforço de estruturas de concreto armado com fibras de carbono. São Paulo, São Paulo: Pini, 2002.
- Majidi, S.; Omidalizrandi, M.; Sharifi, M.A. Intelligent 3D crack reconstruction using close range photogrammetry imagery. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, n. 10, 443-450, 2023.
- MONICO, J. F. G. Ajustamento e Análise Estatística de Observações Aplicados na Detecção de Deformações. Niterói, 1988. 97f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas). Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR, 1988.
- MULLER FILHO, A. V. Ajustamento e Análise Estatística de Observações Aplicados na Detecção de Deformações. Florianópolis, 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, 2015.
- PALAORO, D.G.; RODRIGUES, L. H.C.H. Estudo de viabilidade técnica para utilização da régua potenciométrica na monitoração contínua de fissuras em concreto. Vitória, 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Pós-Graduação em Patologia nas Obras Cíveis). Instituto IDD, Vitória - ES, 2017.
- Robinson, A. et al. Methods for Indexing Stripes in Uncoded Structured Light Scanning Systems. *Journal of WSCG, Union Agency-Science Press*, v. 12, n. 1-3, 371-378, 2004.
- ROCHA, R. S. M. Posicionamento geodésico com GPS no suporte a detecção de deslocamento em barragens. Presidente Prudente, 2017. 144f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas). Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente - SP, 2017.

-
- Van Genechten, B. et al. Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning: Training material based on practical applications. Valencia, Spain: Universidad Politecnica de Valencia Editorial, 2008.
- VEIGA, M. R. Comportamento de argamassas de revestimento de paredes: contribuição par o estudo da sua resistência à fendilhação. Porto, 1998. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto-PT, 1998.
- Westoby, M. et al. Structure-from-Motion 'photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. Geomorfology, v. 179, 300-314, 2012.
- Zanetti, G. Z. et al. Monitoramento Estrutural por GNSS: Análise do PPP e Posicionamento Relativo na UHE Mauá. Anuário do Instituto de Geociências, v. 43, n. 3, 240-249, 2020.
- Zhu, Z. et al. A quantitative investigation of the effect of scan planning and multi-technology fusion for point cloud data collection on registration and data quality: a case study of Bond University sustainable building. Buildings 13(6):1473, 2023.