

MEC2007 – Tópicos Especiais em Engenharia Mecânica

Técnicas de Medição Baseadas em Imagens

Digital Image Correlation (DIC)

Fabio J. W. A. Martins

fabiomartins@puc-rio.com

Departamento de Engenharia Mecânica

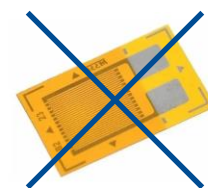


Pontifícia
Universidade
Católica do
Rio de Janeiro

10/09/2025

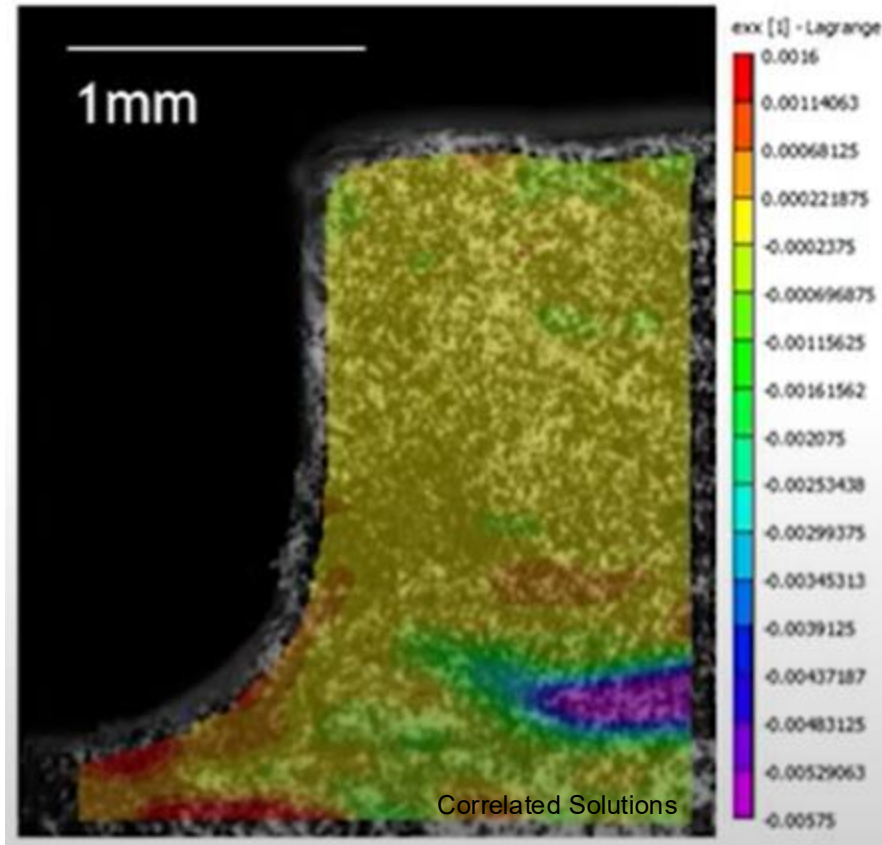
Introdução

- *Digital image correlation* (DIC) é um método óptico baseado na captura de imagens e em técnicas de correlação para medição de campos 2D e 3D de deslocamentos e deformações de objetos sólidos
- A deformação refere-se à alteração do tamanho ou da forma devido a forças externas
- As deformações locais podem indicar não homogeneidade, fissuração, concentrações de tensões, instabilidades plásticas, transformações de fase, etc.
- Os deslocamentos e deformações do objeto estudado são obtidos correlacionando duas ou mais imagens da superfície contendo texturas (naturais ou artificiais)
- Campos de velocidade, aceleração e taxas de deformação podem ser derivados dependendo da modalidade DIC empregada
- DIC permite análise de comportamentos estáticos e dinâmicos
- Não necessita de iluminação laser (custo moderado)
- Oferece vantagens em relação a transformadores diferenciais variáveis lineares (LVDT), acelerômetros e *strain gauges* devido à facilidade de implementação e medição de campos, ao invés de pontos localizados

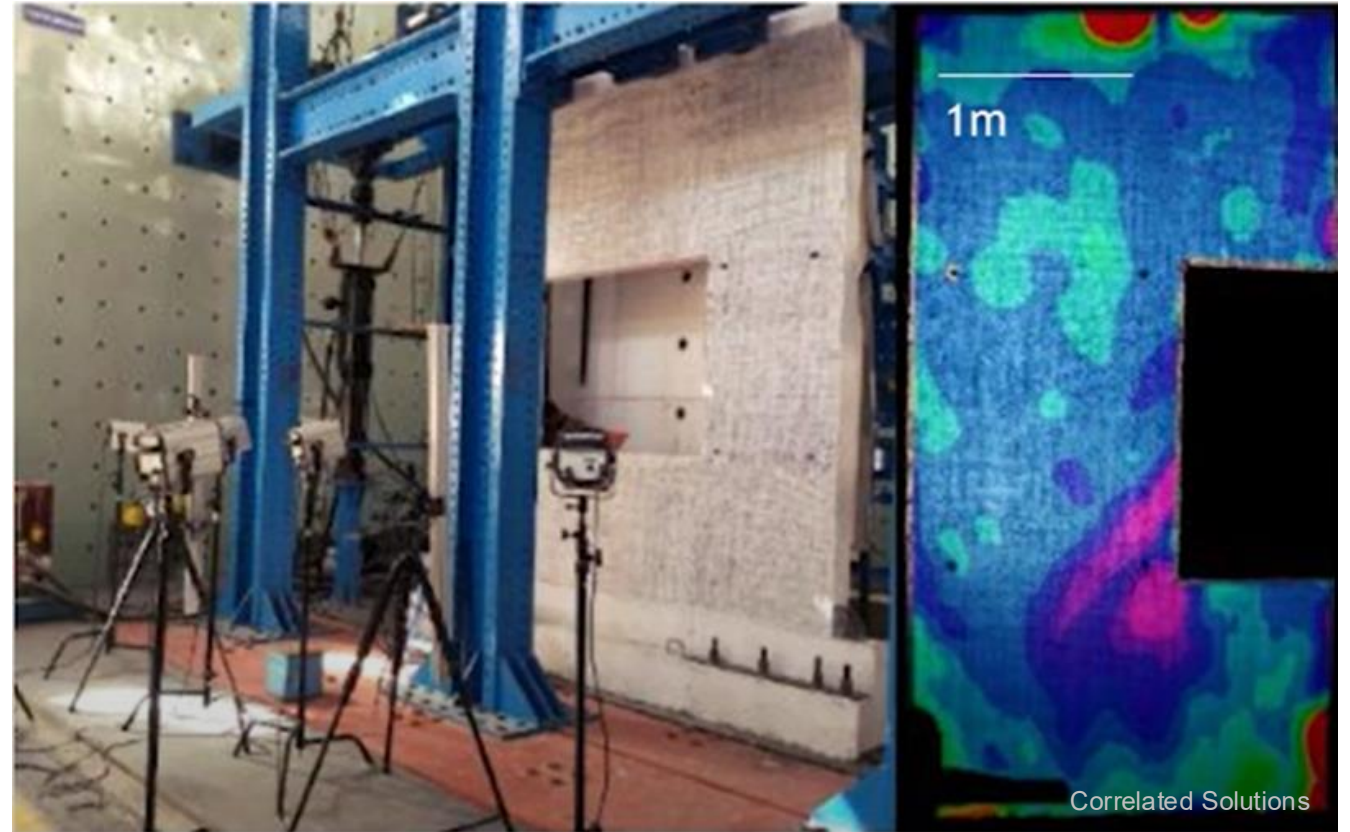


Introdução

Grande variedade de escalas de tamanho (10^{-6} a 10^2 m)



Traverse strain of ceramic capacitor chip under bending load



Large-scale Pseudo-Dynamic/Cyclic Earthquake Test Facility at IIT-Roorkee

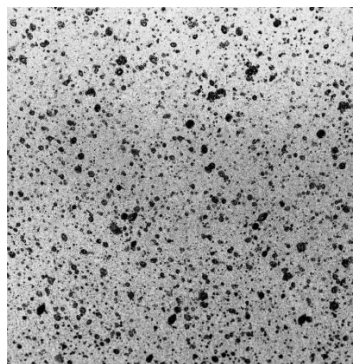
Introdução

Grande variedade de escalas de tempo (stático a 5^6 fps)

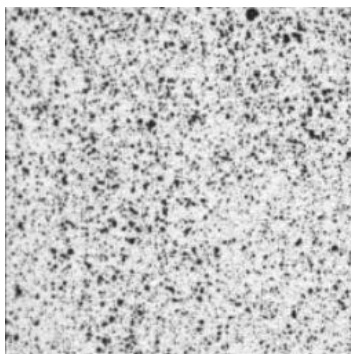


Princípio de funcionamento

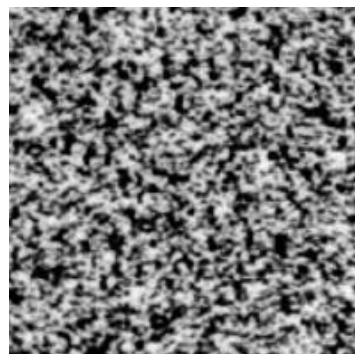
- As medições são baseadas na imagem de texturas (padrões) na superfície dos objetos analisados que acompanham o movimento e deformação destes
- As texturas podem estar naturalmente presentes (concreto, pedra, madeira, etc.) ou serem aplicadas sobre a superfície (spray preto/branco, impressão, acabamento superficial, etc.)
- Textura ideal: não-repetitiva (aleatória), isotrópica, com alto contraste (ex. *speckel pattern*)



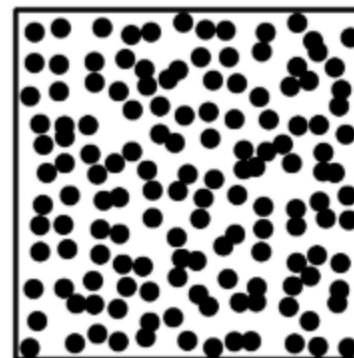
granite



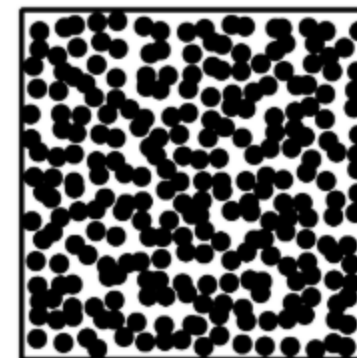
spray painted



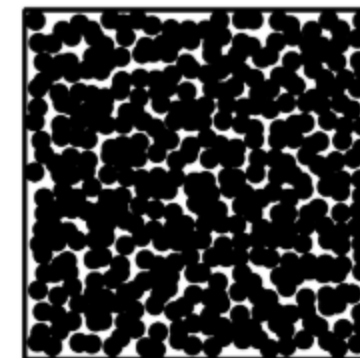
printed



too sparse



just right

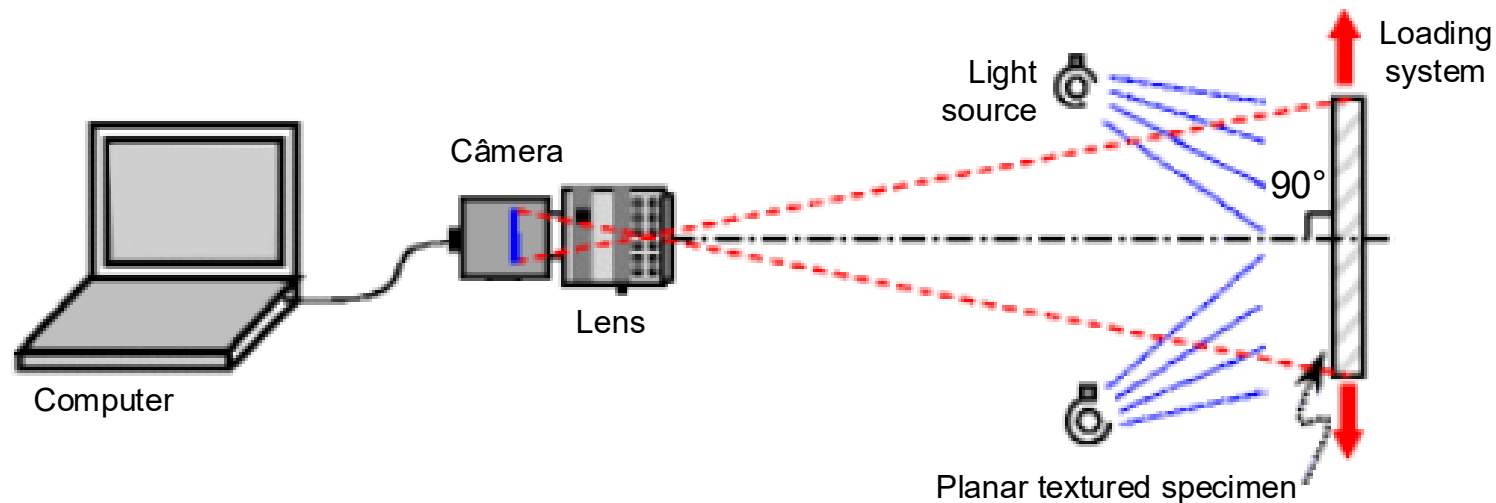


too dense

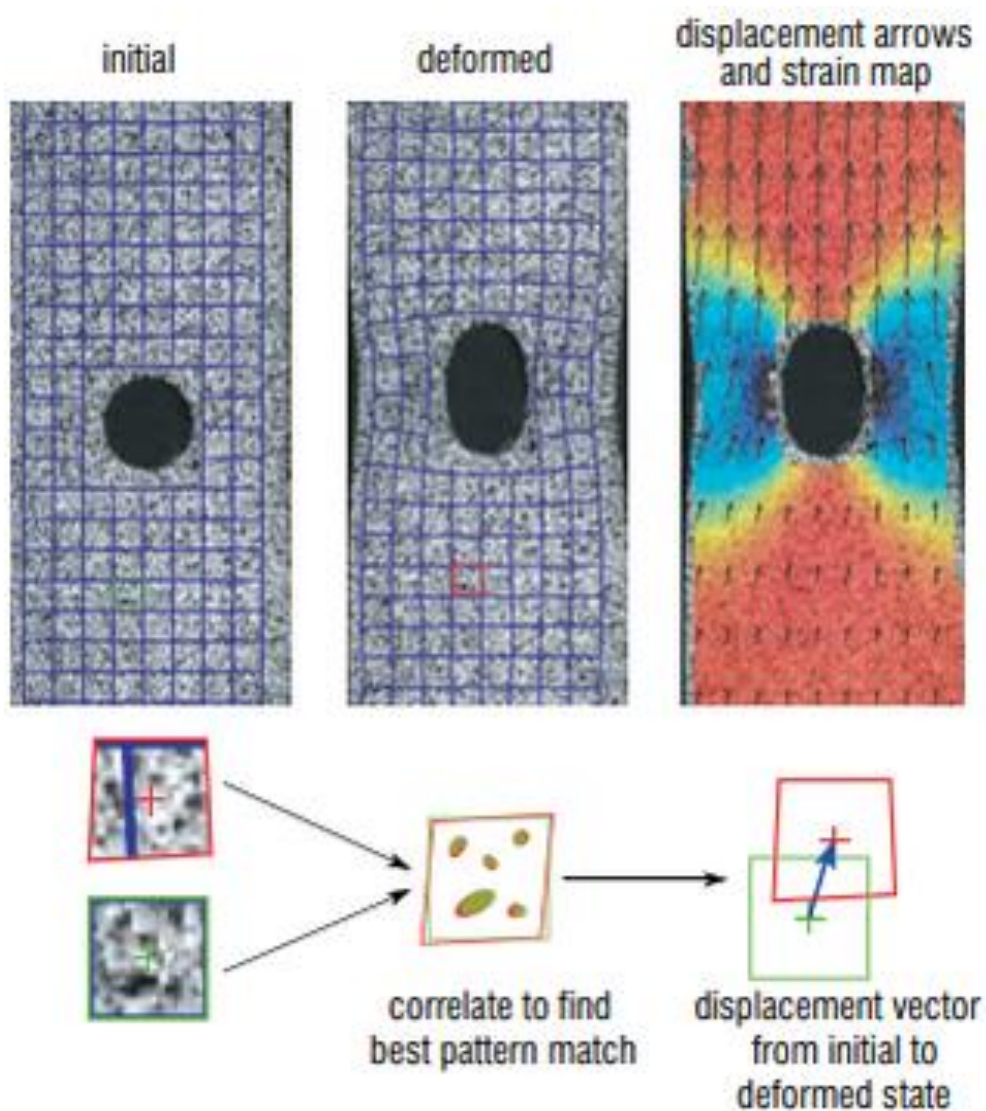
uniform dot size
50% black & 50% white

Princípio de funcionamento

- Antes das medições, o sistema DIC é configurado para o campo de visão desejado e calibrado
- A calibração para um sistema com uma única câmera pode ser simplesmente um fator de escala (conversão de pixels para mm), assumindo objeto planar, paralelo e a uma distância constante
- A calibração pode ser mais elaborada para sistemas com duas (estéreo) ou mais câmeras, consistindo na extração dos parâmetros intrínsecos (distância focal, ponto principal, coeficiente de inclinação), extrínsecos (posição e orientação) e de distorção das lentes de cada câmera
- Informações de campos 3D são possíveis em sistemas estéreo através da análise dos campos relativos a cada câmera seguida de triangulação por meio dos dados de calibração



Princípio de funcionamento



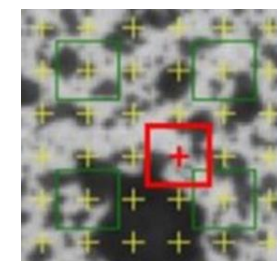
- Uma imagem de referência (sem deformações) é capturada inicialmente para avaliações posteriores de deslocamento e deformação
- A imagem de referência é subdividida em regiões (janelas ou *subset*) nas quais o deslocamento e deformação do padrão é analisado através da comparação com regiões correspondentes de imagens com deformação
- O pico de correlação (máximo grau de similaridade) em cada região corresponde ao deslocamento (vetor com comprimento e direção)
- Campos de deformação superficial nas direções X e Y (ou alternativamente deformações principais) são obtidos através dos deslocamentos relativos entre as coordenadas, enquanto campos de velocidade, aceleração e taxas de deformação são calculados através de derivadas temporais

<https://analytical-online.com/digital-image-correlation-dic.html>

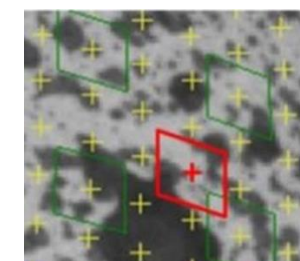
Princípio de funcionamento

- Correlação cruzada bidimensional

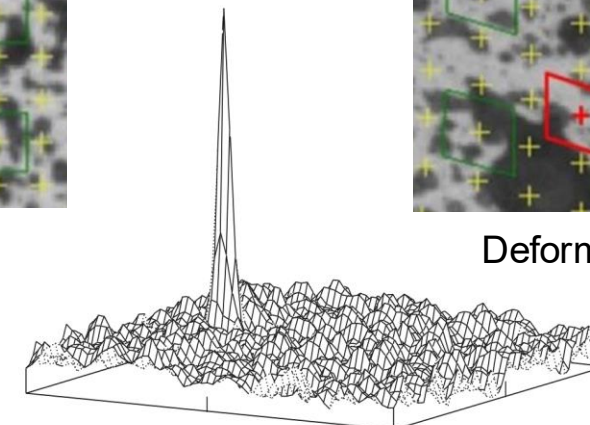
$$r(x, y) = I(x, y) \star I'(x, y) = \sum_{i=-n}^n \sum_{j=-n}^n I(i, j) I'(i + x, j + y)$$



Inicial



Deformed



Cross-correlation map

- Função de mapeamento de deformação no plano (transformação afim)

$$x^* = x + u + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y$$

$$y^* = y + v + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y$$

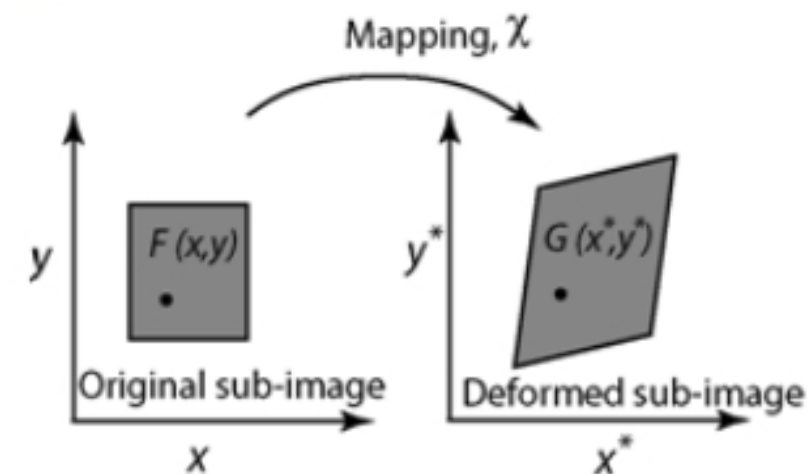
(x, y) – coordenada da janela na imagem de referência

(x^*, y^*) – coordenada da janela na imagem de medição

(u, v) – translação entre janelas ao longo de X e Y

$(\Delta x, \Delta y)$ – distância entre (x, y) e o centro da janela

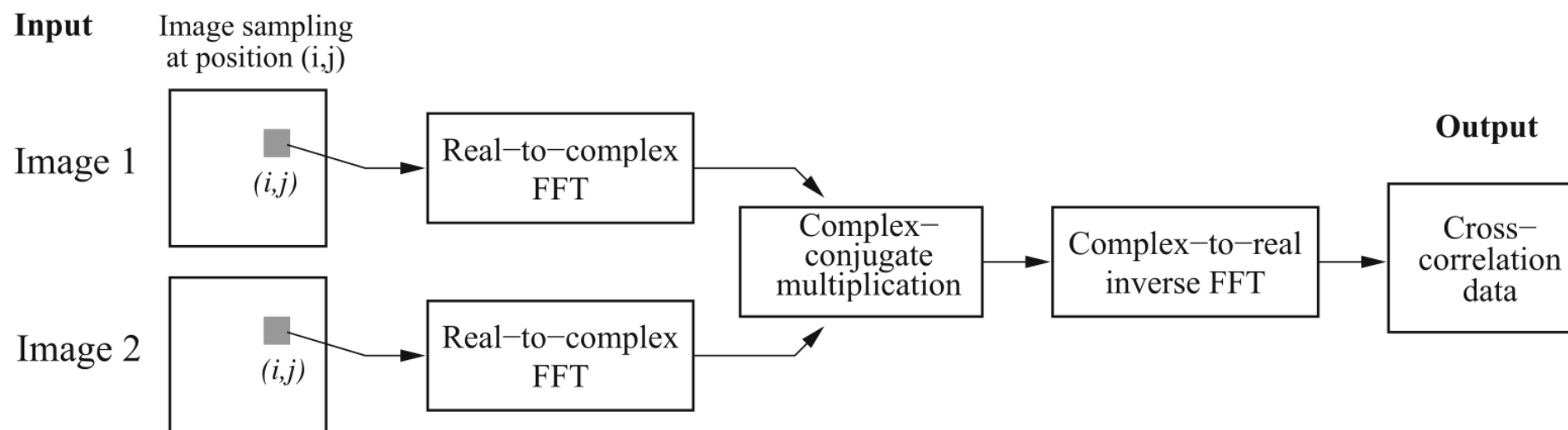
$(\partial/\partial x, \partial/\partial y)$ – gradientes de deslocamento ao longo de X e Y



Princípio de funcionamento

- Correlação cruzada através da transformada de Fourier rápida

$$r(x, y) \Leftrightarrow \hat{I} \cdot \hat{I}'^*$$



- Algoritmos avançados de múltiplos passes permitem precisão subpixel (mínima incerteza de medição ~0.1 pixel)

Aplicações práticas

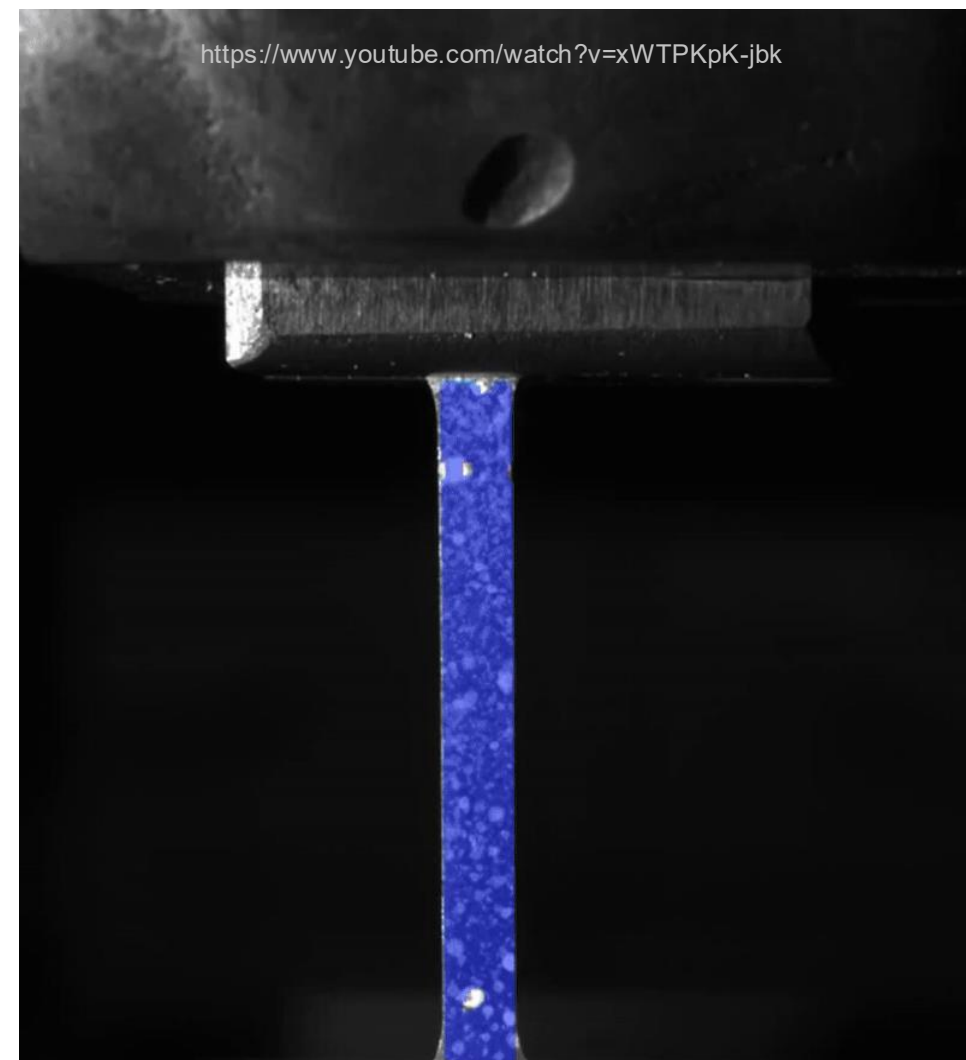
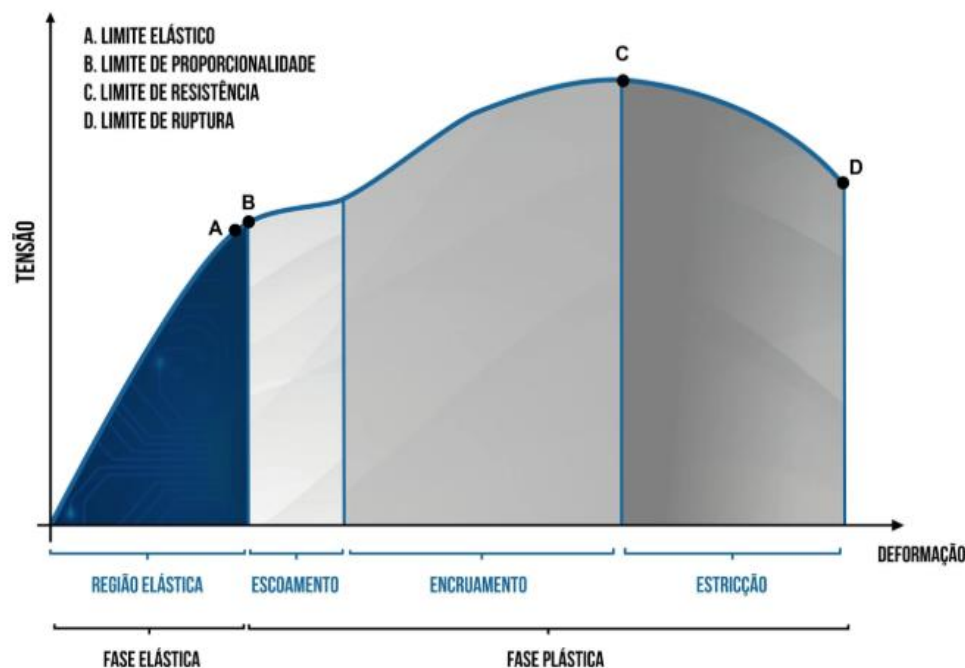
- Engenharia de materiais e mecânica:
 - Caracterização de propriedades mecânicas, especialmente para materiais complexos
 - Análise de deformação vs tensão sob tração, compressão, flexão, torção e cisalhamento
 - Estudo de fadiga, propagação de trincas e fratura, identificando áreas de alta tensão e a vida útil de componentes
 - Comportamento de materiais sob condições extremas
- Engenharia civil e estrutural:
 - Monitoramento de estruturas para a avaliação da deformação e integridade
 - Estudo de comportamento sísmico (otimização de estruturas para resistir a terremotos)

Aplicações práticas

- Indústria automotiva e aeroespacial:
 - Avaliação do desempenho e durabilidade de componentes críticos
 - Otimização de design de peças e redução de peso
 - Teste de colisão/impacto
- Engenharia biomédica:
 - Estudo de deformação de tecidos biológicos e análise de movimento
 - Teste de implantes e próteses

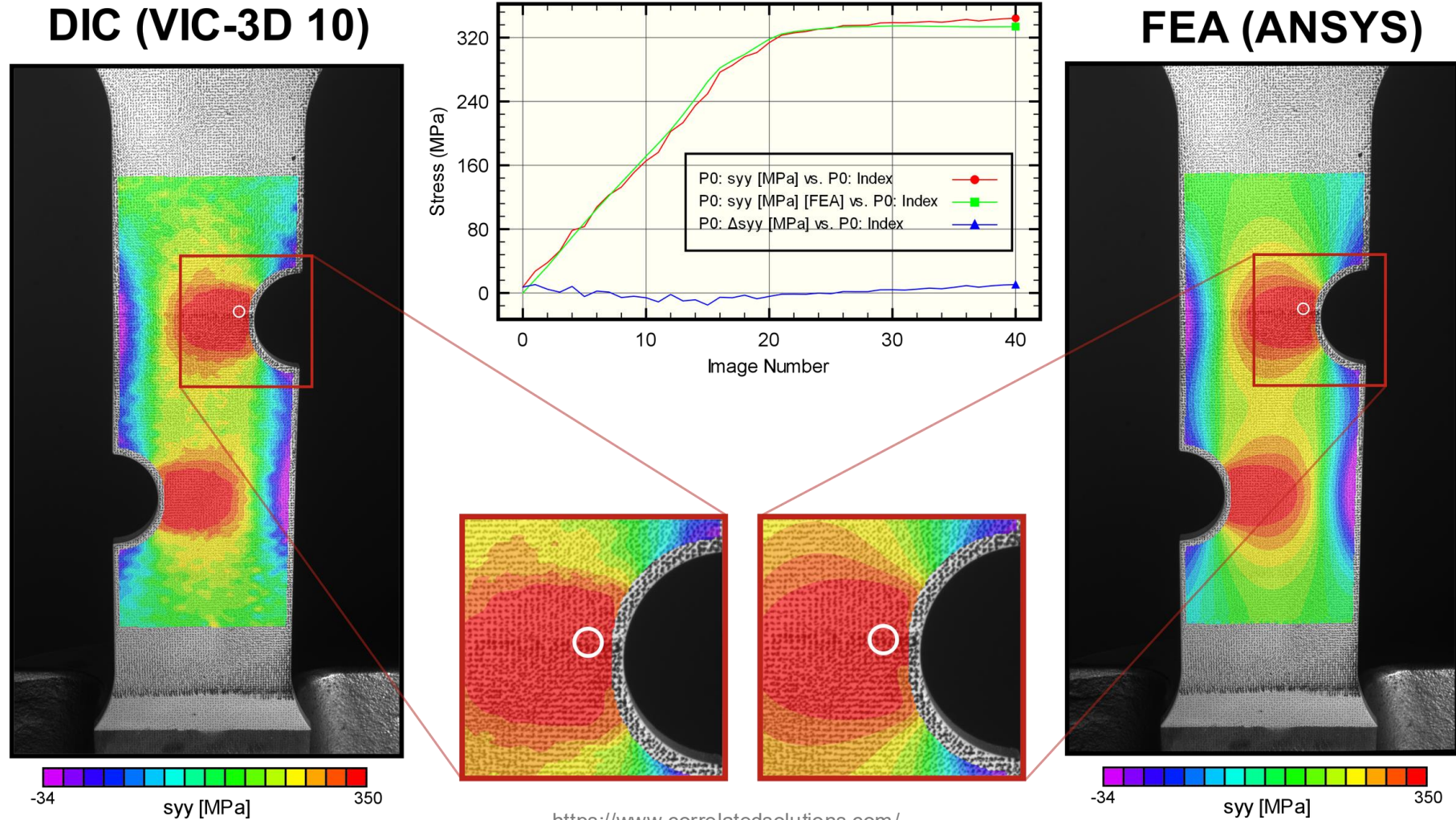
Aplicações práticas

- Ensaio de tração: aplicação de uma força de tração axial num corpo de prova padronizado deformando-o até fratura-lo (alta reprodutibilidade)
- Determinação do gráfico de tensão vs deformação, medição de propriedades como módulo de Young, coeficiente de Poisson, limite de escoamento e resistência à tração, etc.



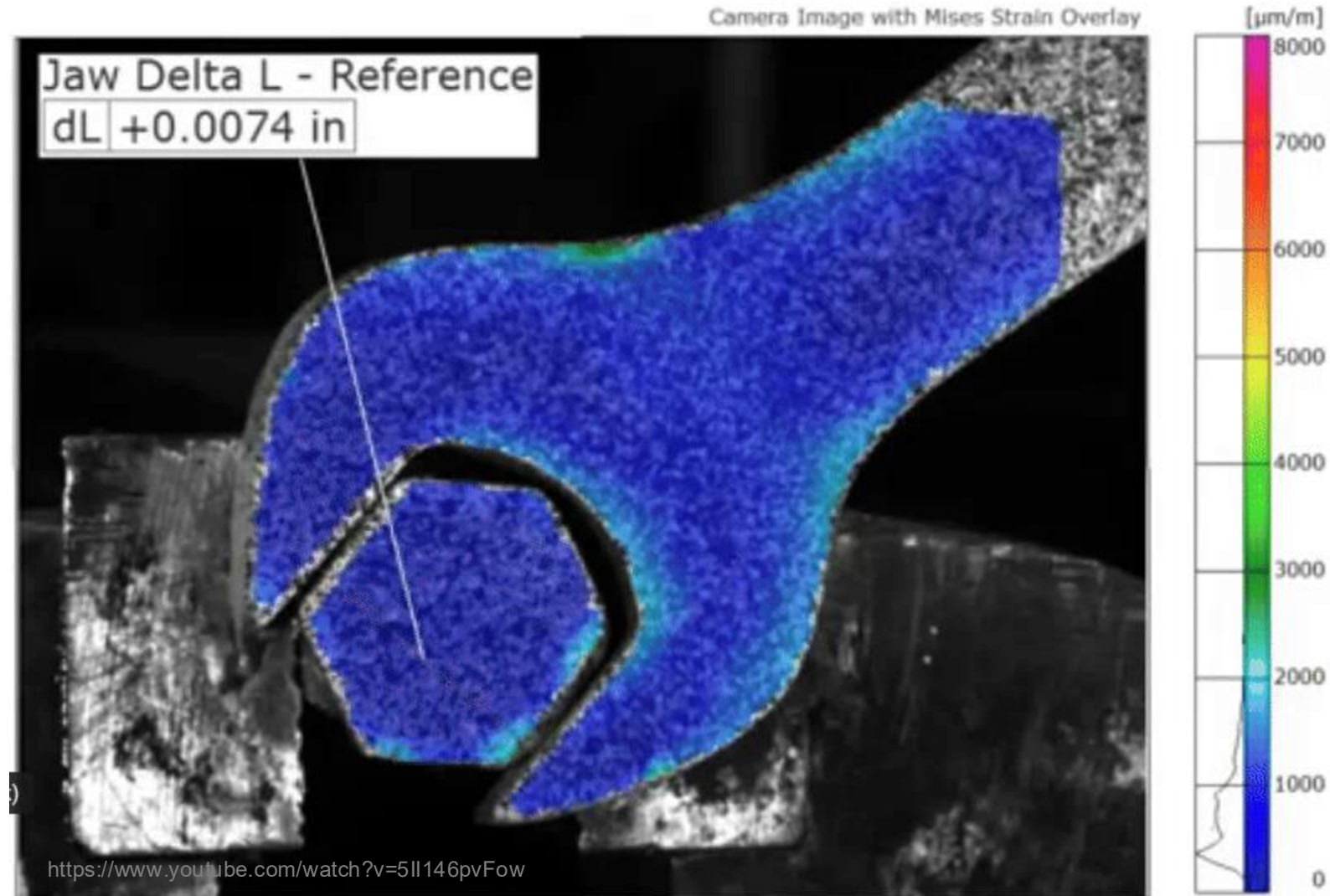
Aplicações práticas

Ensaio de tração para análise de variações locais de tensão devido à forma do objeto



Aplicações práticas

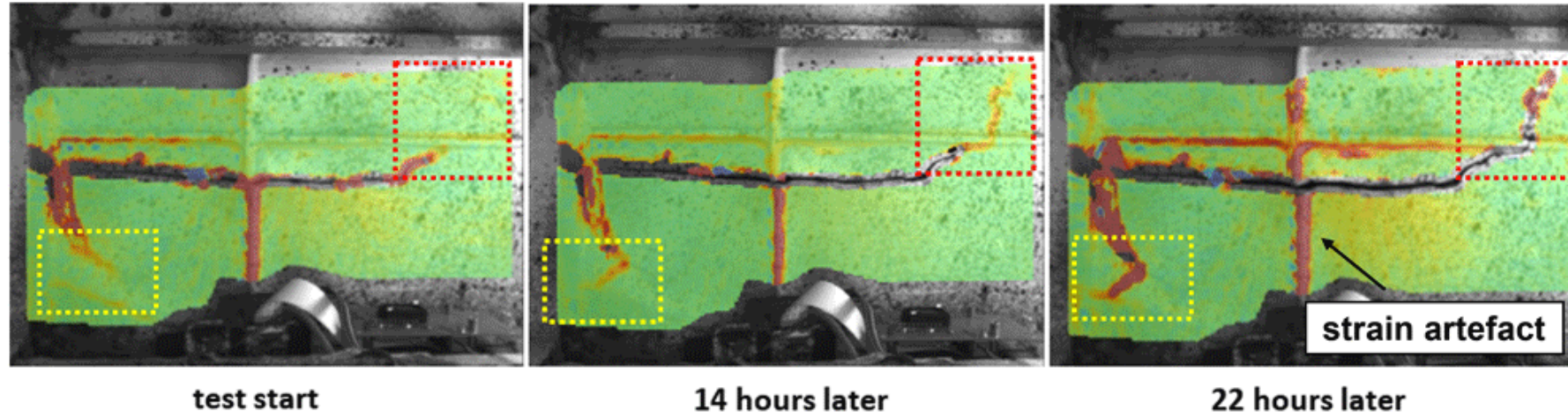
Demonstração de deformações numa chave de boca



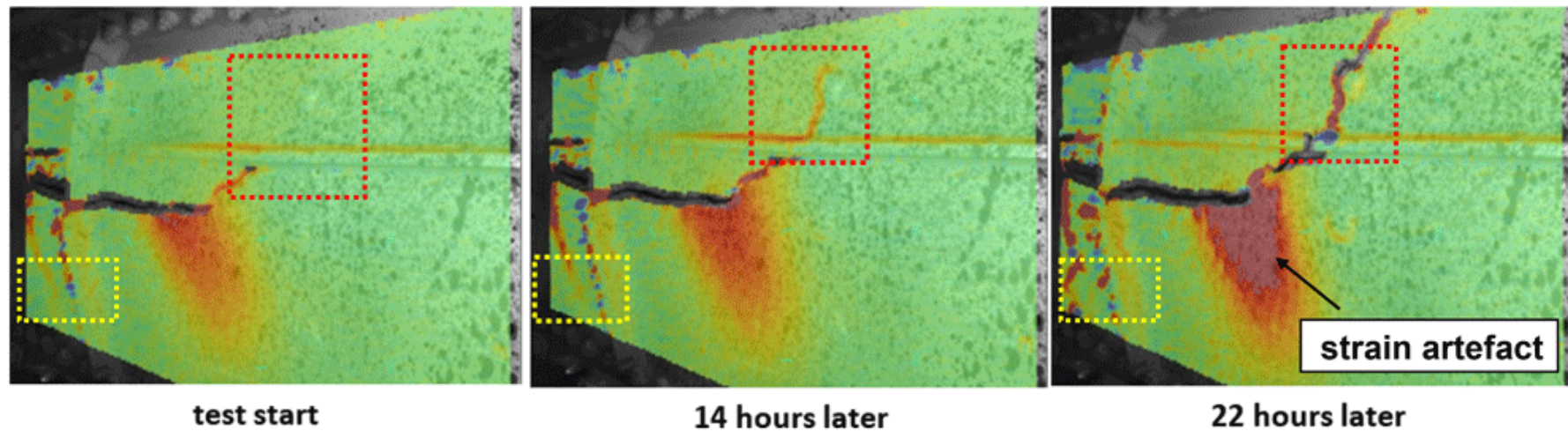
Aplicações práticas

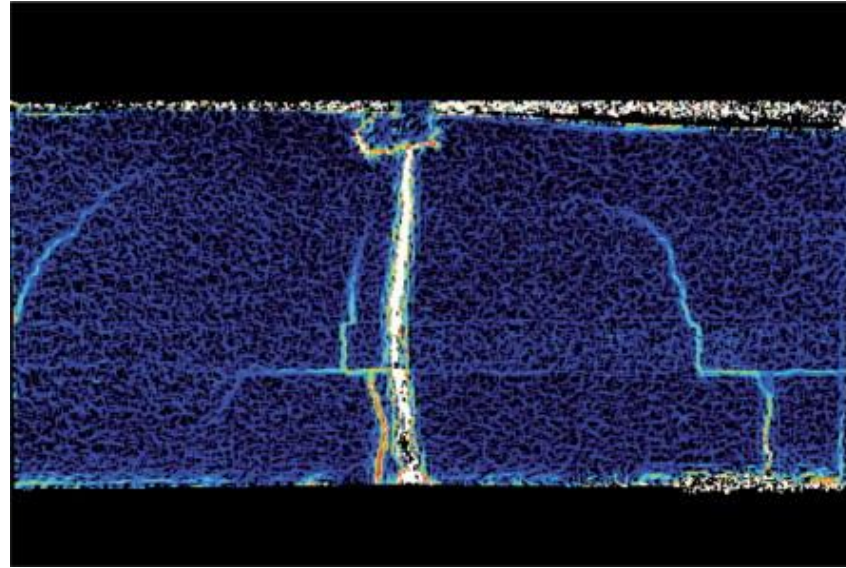
Análise de propagação de trincas

DIC system 1



DIC system 2

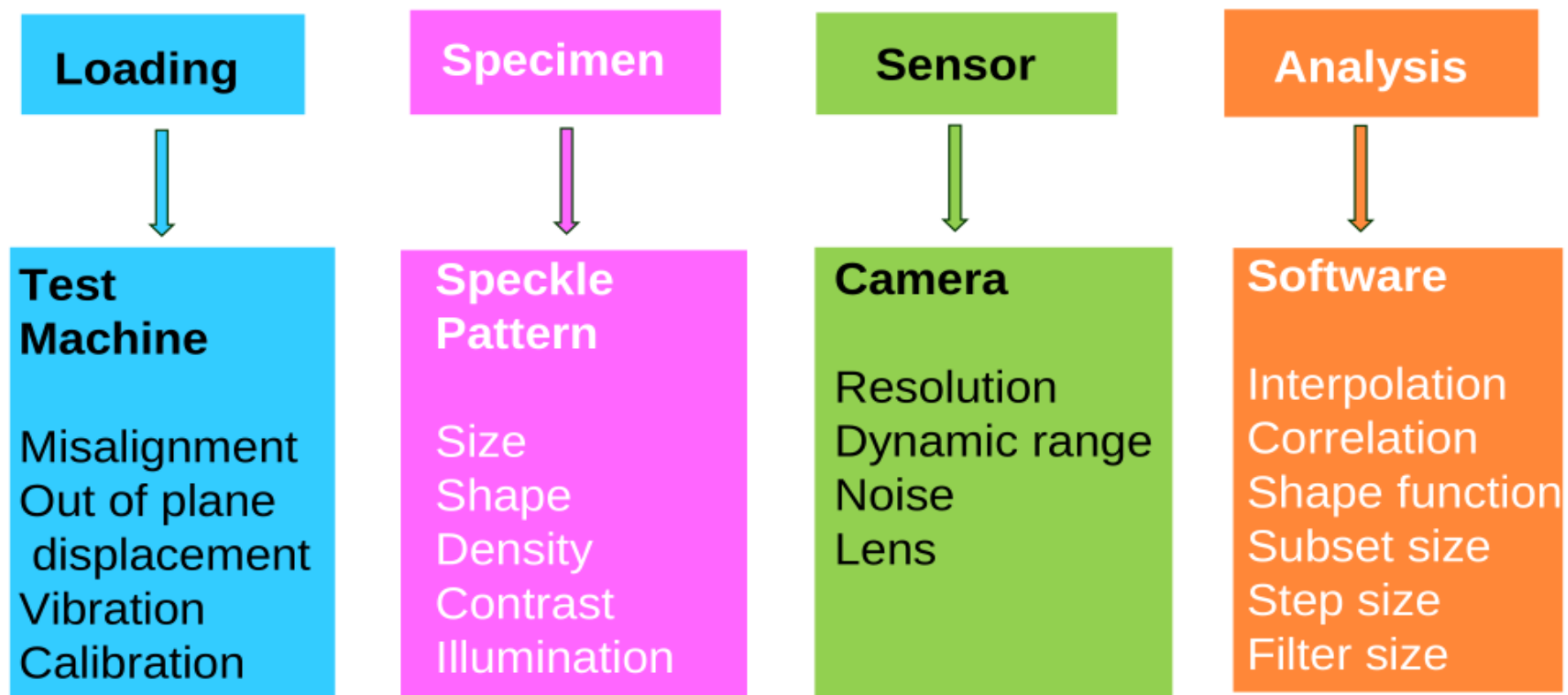




- Degrau de concreto após teste de carga: apenas uma grande rachadura visível
- Deformações locais medidas com DIC revelam diversas rachaduras não visíveis a olho nu
- Corante penetrante valida as medições de rachaduras através de DIC

N McCormick and J Lord, Materials Today (2010)

Parâmetros que afetam as medições



Pascal Lava, Practical considerations in DIC measurements, 15th ICEM Conference, 2014

Recomendações para medições DIC acuradas

- Preferir câmeras monocromáticas com sensor de baixo ruído, alta eficiência quântica e alta faixa dinâmica
- Usar lentes de baixa distorção óptica e com abertura intermediária ($f/5.6$, $f/8$, or $f/11$)
- Considerar o uso de lentes telecêntricas no caso de variação da superfície do objeto ao longo do eixo óptico para manter a magnificação constante na imagem
- Certifique-se de que a área de interesse está em foco e as lentes limpas
- As câmeras, lentes e iluminação devem ser montados em suportes rígidos
- A iluminação deve ser homogênea ao longo da área de interesse, possuir intensidade suficiente e variar minimamente ao longo do tempo para um tempo de exposição adequado e bom contraste na imagem, sem saturação
- A iluminação não deve gerar muito calor (caso contrário, considere o uso de um ventilador para soprar ar suavemente evitando distorção das imagens devido a ondas de calor)

Validação e estimativa de incertezas

- Os resultados obtidos através da técnica DIC podem variar amplamente entre diferentes sistemas de medição, padrão de textura, parâmetros de correlação, algoritmos de processamento, etc.
- O ruído de medição relacionado a imagem da textura e algoritmo de processamento (incerteza tipo A) pode ser estimado através de várias imagens estáticas (sem movimento ou deformação)
- Comparação das medições com resultados de outras técnicas
 - Deslocamentos: micrômetro Vernier, estágio linear de precisão ou transformadores diferenciais variáveis lineares (*linear variable differential transformer, LVDT*)
 - Deformações e distorções: extensômetros mecânicos, extensômetros a laser ou *strain gauges*

Algumas implementações DIC de código aberto

- DICe (<https://github.com/dicengine/dice>)
- μ DIC (<https://doi.org/10.1016/j.softx.2019.100391>)
- NCorr (<https://www.ncorr.com>)
- RealPi2dDIC (<https://doi.org/10.1016/j.softx.2020.100645>)
- SUN-DIC (<https://github.com/gventer/SUN-DIC>)

Referências bibliográficas

- Sutton, M.A., Orteu, J.J. and Schreier, H., 2009. Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications. Springer Science & Business Media.
- Jones, E.M. and Iadicola, M.A., 2018. A good practices guide for digital image correlation. International Digital Image Correlation Society, 10, pp.1-110.
- LePage, W., 2025. A practical guide to DIC. Available at: <https://digitalimagecorrelation.org/> (Accessed on 22 July 2025).