

# 1 INTRODUÇÃO

Fadiga é um tipo de falha mecânica que pode ocorrer após um período ao qual o material é submetido a tensões e deformações cíclicas. Durante este processo, os materiais sofrem danos progressivos e paulatinos, mesmo sob tensões inferiores à resistência ao escoamento. Os efeitos podem variar desde a iniciação de uma trinca até a sua propagação e eventual fratura da peça (Dowling, 1999).

Fadiga é um importante mecanismo de falha para a grande maioria das falhas estruturais que ocorrem na prática. O seu dimensionamento requer técnicas de análise do campo de tensões e deformações, de avaliações de resistências, e de acúmulo de dano. Neste sentido, a modelagem das falhas por fadiga requer precisão e confiabilidade, já que a sua ocorrência é geralmente catastrófica e irreversível, e não tende a gerar avisos prévios de falha iminente, pois esta pode ocorrer até mesmo de modo frágil, ou seja, sem deformação plástica aparente (Castro & Meggiolaro, 2009).

O projeto à fadiga é muito usado em análise estrutural. Através de análises, determinam-se as propriedades do material necessárias para satisfazer determinados critérios de projeto, com o objetivo de aumentar sua vida útil.

Um tópico importante na avaliação das propriedades mecânicas em ensaios de tração, de fadiga ou de fratura, está na medição de deformações dos materiais ensaiados. A utilização de extensômetros convencionais (*strain gages*) é apropriada para a medição de deformações uniformes ou com baixos gradientes espaciais, no entanto apresenta dificuldades na medição de altos gradientes de deformações, que exigiriam extensômetros de dimensões muito reduzidas.

Medições de campos de deslocamento e deformações tanto locais quanto globais são desejáveis em diferentes aplicações. Diversas técnicas podem ser usadas, dentre as quais se destacam os métodos ópticos, que adquirem cada vez mais importância pela sua flexibilidade e adaptabilidade às mais diversas

situações de medição. As técnicas interferométricas, comumente empregadas em mecânica experimental, têm como principais virtudes o fato de serem não destrutivas e remotas (não envolvendo contato entre o componente e o sistema de medição), permitindo a visualização de campos completos de deslocamentos e de deformações em superfícies, independentes do material, e com uma medição de precisão apenas limitada pela resolução da câmera e da qualidade dos componentes ópticos.

Em particular, as técnicas de Interferometria por Correlação de *Speckle* (ESPI - *Electronic Speckle Pattern Interferometry* ou DSPI - *Digital Speckle Pattern Interferometry*), Correlação Digital de *Speckle* (DSCM *Digital Speckle Correlation Method*) e Correlação Digital de Imagens merecem destaque pela aplicabilidade em diversos campos da mecânica experimental (Chu et al., 1985; Berfield et al., 2007; Guo et al., 2008).

A interferometria baseada no efeito *speckle* (ES, ou efeito granulado) é uma técnica de longa existência (Jones and Wykes, 1983). Estudos pioneiros na área datam do século XIX. No entanto, foi a construção do primeiro laser nos anos 1960 que deu novo impulso às pesquisas, pois a alta coerência luminosa provocava o surgimento do fenômeno do ES (Jones and Wykes, 1983). A possibilidade de utilizar o ES para inferir a integridade da estrutura em estudo reside no fato de que o padrão de granulado resultante (existente no campo de luz espalhada ou observada em algum plano-imagem de um sistema de gravação) é capaz de ser uma soma de dois ou mais campos de granulado, gravados em momentos diferentes. Neste caso, o procedimento de gravação representa uma técnica fotográfica convencional de registro de uma superfície opticamente rugosa iluminada com luz laser, por isto, a técnica recebe o nome de Fotografia *Speckle*.

Algumas técnicas relacionadas ao ES são aplicadas nos mais diversos ramos da atividade humana tais como a biologia, astronomia, indústria e medicina (Jones and Wykes, 1983). Dentre as diversas aplicações destaca-se a aplicação na Engenharia Mecânica e de Materiais com respeito a ensaios não destrutivos para medição de pequenos campos de deslocamentos e deformações (Vannoni and Molesini, 2004; Moore, 2004).

A Correlação Digital de Imagens é, de certo modo, o equivalente digital da fotografia *speckle*. Os primeiros experimentos com a utilização de técnicas de correlação na fotogrametria têm suas raízes por volta dos anos 1950, mas foi somente na década de 1980, devido aos avanços eletrônicos e computacionais, que os processos fotogramétricos iniciaram sua evolução para os meios digitais, permitindo a automação de algumas tarefas como, por exemplo, a busca de pontos homólogos entre imagens (Schenk, 1999).

A Correlação Digital de Imagens foi concebida no início dos anos 1980. Na literatura, Peters e Ranson (1982) foram os primeiros a empregá-la para medição de pequenos deslocamentos em superfícies de materiais e cálculo de tensões, e tem sido bem desenvolvida e aperfeiçoada nas duas últimas décadas (Sutton et al., 1988; Lu et al., 2000). Esta técnica baseada em áreas da imagem utiliza uma superfície granulada, i.e. a utilização de algum padrão tipo *speckle*, como portadora de informação, e a aplicação de um *software* de correlação sobre duas imagens durante a transformação mecânica de um material, obtidas com ajuda de câmeras CCD de alta resolução. O princípio de funcionamento consiste em comparar uma imagem digital da superfície deslocada ou deformada com a imagem original usando uma função matematicamente bem definida de correlação com base em um subconjunto de *pixels*, o que permite determinar o deslocamento ocorrido entre os dois estados, antes e após a deformação (Sánchez-Arévalo and G. Pulos, 2008; Po-Chih Hung et al., 2003). Também é possível encontrar na literatura diversos trabalhos que abordam o estudo na mecânica estrutural com resultados satisfatórios (Vanlanduit et al., 2009; Ozelo et al., 2009, Kirugulige et al., 2007) .

Recentemente, um novo tipo de técnica para ensaios não-destrutivos foi proposta, a Correlação de *Speckle* Digital (DSCM) por Yamaguchi, Peters.e Ranson, aperfeiçoado em laboratório (Gao and Zhou, 1995). Esta é uma técnica de desenvolvimento rápido da Fotomecânica, com base na correlação de imagem digital e as propriedades do laser *speckle*. Tem a vantagem de não envolver contato, fazendo uso de uma simples configuração óptica, não mostrando sensibilidade à iluminação nem vibração, e sua natural ligação com o processamento de imagens permite processar uma maior quantidade de dados com rapidez e precisão (Synnergren e Sjudahl, 1999). A DSCM tem sido amplamente

utilizada para medição de deslocamentos e tensões em ensaios não destrutivos, sendo uma ferramenta de grande aplicação na Mecânica Experimental (Lu, 1998; Guo et al., 2008; Dai et al., 2005; Zhang et al., 1999).

Um dos pressupostos importantes destas técnicas de Correlação Digital baseada em áreas é o deslocamento uniforme ou pequeno deslocamento de um conjunto de *pixels* selecionado durante o processo de correlação de duas imagens. Neste pressuposto, um subconjunto do padrão de granulado (*speckle*) na superfície do material, cuja imagem será relacionada a um conjunto de *pixels*, não poderá variar demais a sua forma, ou seja, durante a deformação, a distribuição dos níveis de cinza precisa ser similar antes e após o carregamento. Mas, no caso de medições de campos de deformações muito grandes, este pressuposto não pode ser obedecido, e a forma do subconjunto é alterada. Em aplicações práticas, isto incrementa o erro nas medições e, em consequência, reduz a precisão nos dados de deslocamentos obtidos. Recentemente, muitos trabalhos de pesquisa foram concentrados em melhorar a precisão nas medições ou na identificação, compensação ou remoção de dados ruidosos presentes (Meng et al., 2007, Jin et al., 2003).

### 1.1. Motivação

O uso das técnicas ópticas na área de mecânica experimental não é novidade. Elas vêm sendo aplicadas há várias décadas no estudo de propriedades de materiais e na análise de tensões. O atual desenvolvimento das câmeras digitais com o consequente aumento da resolução CCD (*Charge-Coupled Device*) permitiu que as técnicas de Correlação Digital se tornassem mais efetivas e versáteis em suas aplicações.

Alguns *softwares* comerciais estão disponíveis (e.g. VIC2D e ARAMIS) para este propósito. Contudo, tais *softwares* possuem alto custo, e requerem um *hardware* específico para um determinado tipo de experimento, tornando mais complexo o processo experimental.

Por este motivo, seguindo a tendência moderna da mecânica experimental no desenvolvimento de novas técnicas e no melhoramento das técnicas experimentais existentes, sugere-se a integração de técnicas modernas de

processamento de imagens como ferramentas de coleta e manipulação de dados. A partir destes dados, podem-se determinar diferentes parâmetros, caracterizando a deformação de um objeto. Além disso, é importante desenvolver modelos e algoritmos computacionais necessários para tal tarefa, de maneira que após a sua validação estes possam ficar mais acessíveis ao uso comum e serem utilizados pelos próprios alunos visando novas investigações úteis tanto ao meio acadêmico quanto à indústria.

## 1.2. Metodologia

Na presente dissertação, propõe-se uma nova abordagem para determinar campos de deformações (2D) baseada na correspondência de pontos homólogos entre imagens, utilizando as imperfeições próprias da superfície ou algum tipo de caracterização prévia. Uma forma para se trabalhar com correspondência de imagens é utilizar descritores locais para representar diferentes regiões de uma imagem. Utiliza-se a transformada SIFT (*Scale Invariant Feature Transform*), que é uma técnica moderna da visão computacional desenvolvida por David Lowe (Lowe, 1999), professor do Departamento de Ciência da Computação da *University of British Columbia* do Canadá.

A técnica SIFT é capaz de detectar pontos característicos em uma imagem formando descritores com propriedades robustas a variações como rotação, mudança de escala, iluminação e ponto de vista da câmera, sendo altamente distintivos e podendo ser utilizados para fazer correspondência de diferentes visões de um objeto ou cena, com alta probabilidade de acerto (Lowe, 2004). Tem sido utilizada com sucesso em aplicações tais como: reconhecimento específico de objetos em imagens 2D, modelagem 3D, rastreamento de movimento, reconhecimento de gestos, mapeamento em robótica para navegação, reconstrução panorâmica de imagens, monitoramento de vídeos, e jogos envolvendo movimentos filmados. (Fernandes, 2008; Suján et al., 2008; Tamimi et al., 2005). Quando SIFT é utilizado em Robótica, normalmente não há pré-processamento devido à sua robustez frente aos ruídos que poderiam afetar as imagens. Por exemplo, se a iluminação da cena não é ótima, o SIFT conseguirá detectar poucos pontos nas zonas escuras da imagem, mas com a vantagem de estarem bem localizados.

A técnica SIFT pode ser aplicada a qualquer tarefa que exija identificação de pontos correspondentes entre duas ou mais imagens. Muitos trabalhos têm sido desenvolvidos em diversas aplicações, principalmente na área da Robótica. No entanto, a utilização da técnica SIFT em problemas da mecânica estrutural não foi encontrada na literatura.

A metodologia aqui proposta para atender o objetivo deste trabalho consiste, primeiramente, da utilização dos descritores SIFT para localizar pontos característicos correspondentes entre duas imagens do material obtidas em estados diferentes de deformação durante um ensaio mecânico. Um dos aspectos importantes da técnica SIFT é a geração de um número grande de descritores que conseguem cobrir densamente uma imagem. A quantidade de descritores é particularmente importante para ter uma solução estável na determinação de deslocamentos e deformações. Para isto, é fundamental a caracterização prévia da superfície do corpo de prova, utilizando uma técnica de aplicação capaz de gerar características (“granulações” ou *speckles*) suficientes em toda a área analisada para realizar a correspondência entre imagens diretamente com luz natural, sem a necessidade de se basear em variações de brilho, sem precisar utilizar laser para a obtenção do efeito granulado, e sem qualquer tipo de iluminação estruturada.

Neste trabalho, foram testados dois procedimentos para a caracterização da superfície do corpo de prova. Primeiramente, através do lixamento aleatório da superfície metálica do material. A idéia é utilizar as imperfeições e riscos como possíveis pontos-chaves na correspondência de imagens. Em seguida, uma técnica para criação de padrões aleatórios artificiais é também testada. A técnica se baseia na aplicação de tinta acrílica pulverizada sobre a superfície do material a medir. O objetivo é gerar padrões similares aos padrões granulados com uma estrutura reconhecível e em uma escala adequada para uma solução eficaz do problema. Em Chousal et al. (2004) e Yamaguchi et al. (2007) foi testada a Correlação Digital de Imagens (sem o uso da técnica SIFT) com a utilização de tinta branca de fundo e salpicos de tinta preta sobre a superfície do corpo de prova, com resultados satisfatórios.

A eficiência dos padrões granulados e a sua influência nas medições de deslocamentos com respeito ao tamanho dos granulados formados têm sido

mostradas em diversos estudos (Lecompte et al., 2005). Diversas técnicas de criação artificial de padrões aleatórios em escala reduzida para aplicação da Correlação Digital são reportadas na literatura (Scrivens et al., 2007). No desenvolvimento desta técnica, faz-se necessário um sistema óptico de boa resolução para capturar imagens da superfície do espécime antes e depois de sofrer os esforços. As imagens são então processadas e, através das informações extraídas, é possível obter os campos de deformação e deslocamento.

Nos ensaios mecânicos e análise de tensões estruturais, a distribuição do campo completo de deformações é usualmente calculada por diferenciação do campo de deslocamentos, e esta operação pode conter dados ruidosos, produto de uma ineficiente estimação dos deslocamentos. O uso de problemas inversos para obtenção dos campos é preferível nestes casos. Problemas inversos na mecânica experimental tiveram um expressivo aumento nas últimas décadas com aplicações em diferentes áreas tais como transferência de calor, análise modal, integridade e monitoramento estrutural, entre outras (Nunes et al., 2009). Entende-se por solução do problema inverso encontrar parâmetros da entrada de um modelo a partir de dados experimentais de medições das saídas geradas, e desta maneira poder reproduzir o fenômeno observado através de um modelo matemático. Com o desenvolvimento de técnicas experimentais capazes de medir campos completos, o processo de ajustar os dados experimentais com modelos analíticos e numéricos se tornou mais atraente, ao invés de utilizar medidas pontuais.

Na metodologia aqui proposta, o problema inverso é formulado para a obtenção de parâmetros de deformação através da utilização do método linear de mínimos quadrados. Este método ajusta uma função proposta ao conjunto de pontos discretos obtidos experimentalmente e processados automaticamente pela técnica SIFT. A estimação dos parâmetros é realizada de acordo com o critério de mínimo erro quadrático, que associa a solução analítica ao deslocamento dos pontos homólogos extraídos de duas imagens em estágios diferentes durante o processo de deformação do material, quando este é submetido a tensões diversas (e.g. tração, compressão, flexão, dependendo do ensaio mecânico a ser realizado). Finalmente, através do cálculo das derivadas parciais da função solução aproximada, produto do ajuste por mínimos quadrados, é possível representar as deformações que ocorrem no plano da superfície do material. Os resultados serão

mostrados em uma implementação feita em Matlab®, por ser uma linguagem que possui ferramentas (*toolboxes*) com maior facilidade para manipulação de matrizes, muito usadas para tratamento de imagens.

Foram desenvolvidos os experimentos necessários que permitissem, então, validar e verificar a capacidade de medição da metodologia apresentada. Os resultados são comparados com os valores teóricos, valores obtidos pela extensometria e propriedades mecânicas do material.

Com a proposição desta metodologia, pretende-se obter como resultado uma técnica que realize um processamento “rápido” e eficiente na correspondência de pontos característicos homólogos contidos nas imagens, uma vez que isso facilitará o cálculo de campos de deformações apresentando uma solução confiável, visando novas investigações na área da mecânica estrutural.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo Geral**

- a) Desenvolver e implementar computacionalmente uma metodologia para determinação de campos de deformações em materiais, utilizando principalmente a técnica SIFT para o pós-processamento das imagens.

#### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- a) Obter um sistema com uma resolução espacial suficiente para medições locais na região de interesse e a capacidade de captação campos não-uniformes de deformações (2D), sem contato com o corpo de prova, e sem uma custosa preparação experimental;
- b) Não necessitar de correlação de padrões obtidos com algum tipo de luz polarizada, luz coerente, ou alguma iluminação estruturada;
- c) Obter um método para a correlação das imagens que seja robusto a pequenas translações, que ocorrem devido ao deslocamento do corpo de prova causado pela própria deformação, mudanças de iluminação, e eventuais rotações;

- d) Integrar toda a metodologia implementada num programa final desenvolvido em ambiente Matlab®, que servirá como um programa interativo para o ensino do método, de modo a facilitar a sua utilização e a automatizar o cálculo da solução no plano bidimensional; e
- e) Avaliar experimentalmente o potencial da metodologia desenvolvida.

#### **1.4. Organização da Dissertação**

A presente dissertação está dividida em sete capítulos, conforme descrito a seguir.

O primeiro capítulo trata de uma breve introdução dos principais tópicos a serem tratados, bem como a apresentação dos objetivos.

O segundo capítulo é uma revisão da literatura envolvendo os conceitos teóricos mais importantes contidos no desenvolvimento do projeto.

No terceiro capítulo é feita uma revisão das principais técnicas ópticas utilizadas na mecânica experimental.

O quarto capítulo relata o funcionamento da técnica SIFT (*Scale Invariant Feature Transform*), ferramenta principal da metodologia apresentada neste trabalho.

O quinto capítulo descreve a extração e correlação automática de pontos-chave pelo SIFT e, os detalhes da dedução da metodologia proposta para determinação do campo de deformações do material testado.

No sexto capítulo são mostrados os resultados da aplicação da metodologia desenvolvida em simulações baseadas em imagens modificadas artificialmente.

No sétimo capítulo é feita a avaliação efetiva da proposta através de ensaios mecânicos realizados em laboratório sob ambiente controlado.

Finalmente, no oitavo capítulo são apresentadas as conclusões e recomendações abstraídas durante o desenvolvimento desta dissertação.