



**Giancarlo Luis Gómez Gonzáles**

**Aplicação da Técnica SIFT para Determinação  
de Campos de Deformações de Materiais  
usando Visão Computacional**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para  
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Marco Antonio Meggiolaro

Rio de Janeiro  
setembro de 2010



**Giancarlo Luis Gómez Gonzáles**

**Aplicação da Técnica SIFT para Determinação  
de Campos de Deformações de Materiais  
usando Visão Computacional**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Marco Antonio Meggiolaro**

Orientador

Departamento Engenharia Mecânica PUC-Rio

**Prof. Jaime Tupiassú Pinho de Castro**

Departamento Engenharia Mecânica PUC-Rio

**Prof. Raul Queiroz Feitosa**

Departamento de Engenharia Elétrica PUC-Rio

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 1 de setembro de 2010

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

## **Giancarlo Luis Gómez Gonzáles**

Graduado em Engenharia Eletrônica pela Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa – Perú, em 2006.

### Ficha Catalográfica

Gómez Gonzáles, Giancarlo Luis

Aplicação da técnica SIFT para determinação de campos de deformações de materiais usando visão computacional / Giancarlo Luis Gómez Gonzáles ; orientador: Marco Antonio Meggiolaro. -2010.

109 f. : il. (color.); 30 cm

Dissertação (Mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2010.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. SIFT. 3. Campos de deformações. 4. Visão computacional. 5. Problemas inversos. I. Meggiolaro, Marco Antonio. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

Com muito carinho e afeto dedico este meu trabalho à minha família,  
meu irmão Jonathan, minha irmã Yelka e a aos meus pais,  
Luis e Mariela, pela fé, confiança e amor.

## Agradecimentos

Muitos me ajudaram na realização deste trabalho, direta ou indiretamente, estando de alguma forma presente nestes dois anos que se passaram. Aos que se fizeram notáveis, seguem meus agradecimentos.

A Deus, que nunca abandona.

Ao meu orientador Professor Marco Antonio Meggiolaro, pelos diversos ensinamentos e ajuda no processo de elaboração do presente trabalho, sem o que não teria sido possível concluir esta dissertação.

Aos professores do curso, em especial aos Professores Jaime Tupiassú, Raúl Feitosa, Marley Velasco pelos ensinamentos e ajuda quando deles precisei.

À Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro e ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, pelo ambiente acadêmico-científico favorável ao desempenho deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pelo fomento financeiro no Brasil.

Aos amigos e colegas do curso pelo conhecimento dividido, companheirismo, momentos de stress e diversão.

Aos amigos de sempre Alessandro e Gustavo, obrigado pela incondicional amizade.

À minha amiga Paula pelas acertadas aulas de português e pelo desprendido suporte e amizade.

E finalmente, á pessoa mais especial, aquela que é a direção e principal motor da minha vida, Luciana.

## Resumo

Gómez Gonzáles, Giancarlo Luis; Meggiolaro, Marco Antonio. **Aplicação da Técnica SIFT para Determinação de Campos de Deformações de Materiais usando Visão Computacional.** PUC-Rio, 2010. 109p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Esta dissertação apresenta uma metodologia para medição visual de campos de deformações (2D) em materiais, por meio da aplicação da técnica SIFT (*Scale Invariant Feature Transform*). As imagens analisadas são capturadas por uma câmera digital em estágios diferentes durante o processo de deformação de um material quando este é submetido a esforços mecânicos. SIFT é uma das técnicas modernas de visão computacional e um eficiente filtro para extração e descrição de pontos de características relevantes em imagens. Estes pontos de interesse são largamente invariantes a transformações em escala, iluminação e rotação. A metodologia é baseada no cálculo do gradiente de funções que representam o correspondente campo de deformações em um material durante um ensaio mecânico sob diferentes condições de contorno. As funções são calibradas com a aplicação da análise inversa sobre o conjunto de pontos homólogos de duas imagens extraídos pelo algoritmo SIFT. A formulação da solução ao problema inverso combina os dados experimentais fornecidos pelo SIFT e o método linear de mínimos quadrados para estimação dos parâmetros de deformação. Os modelos propostos para diferentes corpos de prova são avaliados experimentalmente com a ajuda de extensômetros para medição direta das deformações. O campo de deformações identificado pelo sistema de visão computacional é comparado com os valores obtidos pelos extensômetros e por simulações feitas no programa de Elementos Finitos ANSYS. Os resultados obtidos mostram que o campo de deformações pode ser medido utilizando a técnica SIFT, gerando uma nova ferramenta visual de medição para ensaios mecânicos que não se baseia nas técnicas tradicionais de correlação de imagens.

## Palavras-chave

SIFT; campos de deformações; visão computacional; processamento de imagens; problemas inversos.

## Abstract

Gómez Gonzáles, Giancarlo Luis; Meggiolaro, Marco Antonio. **Application of the SIFT Technique to Determinate Strain Fields of Materials using Computer Vision.** PUC-Rio, 2010. 109p. M.Sc. Dissertation - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This thesis presents a methodology for measurement of strain fields in materials by applying the SIFT technique (Scale Invariant Feature Transform). The images analyzed are captured by a digital camera at different stages during the deformation process of a material when it is subjected to mechanical stress. SIFT is one of the modern computer vision techniques and an efficient filter for extraction and description of relevant feature points in images. These interest points are largely invariant to changes in scale, illumination and rotation. The methodology is based on the calculation of the gradient of the functions that represents the corresponding strain field in the material during a mechanical test under different boundary conditions. The functions are calibrated with the application of inverse analysis on the set of homologous points of two images extracted by the SIFT algorithm. The formulation of the solution to the inverse problem combines the experimental data processed by the SIFT and linear least squares method for the estimation of strain parameters. The proposed models for different specimens are evaluated experimentally with strain gauges for direct measurement of the deformations. The strain field identified by the computer vision system is compared with values obtained by strain gauges and simulations with the ANSYS finite element program. The proposed models for different types of measurements are experimentally evaluated with strain gages, including the estimation of mechanical properties. The results show that the strain field can be measured using the SIFT technique, developing a new visual tool for measurement of mechanical tests that are not based on traditional techniques of image correlation.

## Keywords

SIFT; strain field; computer vision; image processing; inverse problems.

## Sumário

1 INTRODUÇÃO	16
1.1. Motivação	19
1.2. Metodologia	20
1.3. Objetivos	23
1.3.1. Objetivo Geral	23
1.3.2. Objetivos Específicos	23
1.4. Organização da Dissertação	24
2 CONCEITOS TEÓRICOS FUNDAMENTAIS	25
2.1. Princípios da Teoria da Elasticidade	25
2.1.1. Estado de Tensão	25
2.1.2. Estado de Deslocamento e Deformação	27
2.1.3. Componentes de Deformação em Coordenadas Cartesianas	28
2.1.4. Componentes de Deformação em Coordenadas Polares	31
2.2. Concentração de Tensões	32
2.2.1. Distribuição de Tensões da Placa infinita com Furo Circular	33
2.3. Solução de Mínimos Quadrados de Sistemas Lineares	35
2.3.1. Interpretação Geométrica	36
2.3.2. Cálculo da Solução por Mínimos Quadrados	36



3 TÉCNICAS ÓPTICAS NA MECÂNICA EXPERIMENTAL	38
3.1. Técnicas Interferométricas	38
3.1.1. Interferometria Digital de <i>Speckle</i> (ESPI)	38
3.1.2. Fontes de Erro na Medição com Interferometria	40
3.2. Técnicas de Correlação Digital	40
3.2.1. Correlação Digital de Imagens	40
3.2.2. Correlação Digital de <i>Speckles</i> Interferométricos	43
3.2.3. Problemas na Correlação Digital	44
3.3. Visão Computacional para Análise de Deformações	45
4 SIFT (Scale Invariant Feature Transform)	48
4.1. Etapas do Algoritmo SIFT	48
4.1.1. Detecção de Extremos	48
4.1.2. Localização Precisa de Pontos Chaves	51
4.1.3. Atribuição da Orientação dos Descritores	54
4.1.4. Construção do Descritor Local	56
4.2. <i>Matching</i> : Encontrando os Pontos em Comum	59
5 METODOLOGIA	61
5.1. Preparação do Corpo de Prova	62
5.2. Aquisição das Imagens	65
5.3. Pós-Processamento das Imagens	66
5.4. Determinação do Campo de Deformações	68
5.4.1. Estimativa da Função Deslocamento	68

5.4.2. Determinação dos Parâmetros de Deformação	70
5.4.3. Solução Aproximada por Mínimos Quadrados	71
5.4.4. Cálculo da Solução de Mínimos Quadrados	73
5.5. Campo de Deformações em uma Placa com Furo Circular	73
5.5.1. Identificação dos Parâmetros de Deformação	73
5.5.2. Deslocamentos na Placa com Furo	75
5.5.3. Solução Aproximada por Mínimos Quadrados	77
6 SIMULAÇÕES	80
6.1. Campo de Deformações Uniforme	81
6.2. Campo de Deformações Variável	82
6.3. Campo de Deformações de uma Placa com Furo Central	84
7 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	90
7.1. Determinação do Módulo de Elasticidade	90
7.1.1. Resultados	91
7.2. Determinação do Coeficiente de Poisson	95
7.2.1. Resultados	97
7.3. Considerações Gerais	100
8 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	102
9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104

## Lista de figuras

Figura 2.1 Elemento cúbico sujeito a tensões nas faces (Timoshenko & Goodier, 1970).	26
Figura 2.2 Estrutura original e deformada (Fonte: Laier e Barreiro, 1983).	27
Figura 2.3 Elemento infinitesimal de um corpo elástico (Timoshenko & Goodier, 1970).	28
Figura 2.4 Deformações no plano $xy$ (Timoshenko & Goodier, 1970).	29
Figura 2.5 Deslocamentos em coordenadas polares $xy$ (Timoshenko & Goodier, 1970).	31
Figura 2.6 Geometria de uma placa infinita com um furo circular cilíndrico submetido a uma tensão remotamente uniforme.	33
Figura 2.7 Distribuição de $\sigma_r(r, \pi/2)$ e de $\sigma_\theta(r, \pi/2)$ (Castro & Meggiolaro, 2009).	34
Figura 2.8 Interpretação geométrica da solução por mínimos quadrados (Anton & Rorres, 2001).	36
Figura 3.1 Padrão de granulado característico (esquerda), deformado (centro) e franjas de correlações resultantes da superposição dos granulados característicos e deformado (Pires et al., 2006).	38
Figura 3.2 Típica montagem de um sistema de interferometria.	39
Figura 3.3 Montagem experimental para DIC (Lecompte, 2006).	41
Figura 3.4 Diagrama esquemático do funcionamento do algoritmo de Correlação Digital de Imagens.	42
Figura 3.5 Montagem experimental para DSCM (Guo et al., 2008).	44

Figura 4.1 Exemplos de aplicação dos filtros. Imagem de padrão de granulados (esquerda), filtro Gaussiano (centro), e resultado da Diferença de Gaussianas (direita).	49
Figura 4.2 Representação do procedimento de obtenção das Diferenças de Gaussianas DoG para diversas oitavas de uma imagem. (Lowe 2004).	50
Figura 4.3 Detecção de extremos no espaço-escala (Lowe, 2004).	51
Figura 4.4 Pontos-chaves localizados em duas imagens, antes e após uma deformação trativa na direção vertical	54
Figura 4.5 Histograma de orientações de um ponto-chave.	55
Figura 4.6 Atribuição de orientação e magnitude a cada ponto-chave.	56
Figura 4.7 Mapa de gradientes para $n = 2$ regiões e $k = 4$ pixels. (Lowe, 2004).	57
Figura 4.8 Construção do descritor para um ponto-chave de $2 \times 2$ com 48 elementos (Lowe, 2004).	58
Figura 4.9 Processo de correspondência entre duas imagens através da técnica SIFT.	59
Figura 5.1 Programa desenvolvido na plataforma Matlab®.	62
Figura 5.2 Superfície arranhada (esquerda) e pontos-chave / gradientes localizados pelo SIFT (direita).	63
Figura 5.3 Superfície preta pulverizada com tinta branca (esquerda) e pontos-chaves / gradientes localizados pelo SIFT (direita).	64
Figura 5.4 Montagem do sistema.	65
Figura 5.5 Correspondência ou <i>matching</i> . Exibem-se as linhas que ligam os pontos-chave correspondentes entre duas imagens.	67
Figura 5.6 Corpo sujeito a uma deformação em $x$ : estado inicial e estado final.	68

Figura 5.7 Imagem inicial (original, antes da deformação) e imagem final (após a deformação).	69
Figura 5.8 Deslocamento radial [ <i>mm</i> ] e deslocamento tangencial [ <i>rad</i> ].	75
Figura 5.9 Imagem inicial (antes da deformação) e imagem final (após deformação) em coordenadas polares.	75
Figura 6.1 Imagens de uma peça metálica com furo.	80
Figura 6.2 Localização de pontos-chave pelo SIFT.	81
Figura 6.3 Imagem original e final, depois da aplicação de deslocamentos bidirecionais.	82
Figura 6.4 Imagem original e final, depois da aplicação de deslocamentos bidirecionais.	83
Figura 6.5 Imagem criada artificialmente de uma placa com furo	84
Figura 6.6 Imagem final deformada após a aplicação de deslocamentos bidirecionais associados a uma tensão nominal $\sigma_n$ na direção horizontal.	86
Figura 6.7 Simulação da distribuição do campo de deformações de uma placa com furo central, para uma tensão nominal $\sigma = 9KN$ .	87
Figura 6.8 Gráfico dos erros na medição visual da deformação associados à resolução.	89
Figura 7.1 Extensômetro Instron montado no corpo de prova.	91
Figura 7.2 Montagem experimental do corpo de prova cilíndrico de alumínio.	92
Figura 7.3 Montagem experimental do corpo de prova cilíndrico de aço, lixado para gerar texturização.	93
Figura 7.4 Curva tensão–deformação para o corpo de prova de alumínio, com deformações medidas pelo <i>strain gage</i> e pelo sistema visual.	94

Figura 7.5 Curva tensão–deformação para o corpo de prova de aço, com deformações medidas pelo <i>strain gage</i> e pelo sistema visual.	94
Figura 7.6 Extensômetro colável da Excel Sensores Ltda de resistência elétrica, modelo roseta dupla a 90°.	96
Figura 7.7 Montagem experimental do corpo de prova.	97
Figura 7.8 Montagem experimental do corpo de prova.	98
Figura 7.9 Valores do coeficiente de Poisson, com deformações medidas pela roseta extensométrica ( <i>strain gage</i> ) e pelo sistema visual.	99
Figura 7.10 Valores do coeficiente de Poisson, com deformações medidas pela roseta extensométrica ( <i>strain gage</i> ) e pelo sistema visual.	100

## Lista de tabelas

Tabela 6.1 Resultados dos parâmetros de deformação para o caso de uma deformação uniforme.	82
Tabela 6.2 Resultados dos parâmetros de deformação para o caso de uma deformação variável.	84
Tabela 6.3 Geometria da placa simulada	85
Tabela 6.4 Propriedades mecânicas adotadas.	85
Tabela 6.5 Resultados da estimação dos parâmetros de deformação para diferentes resoluções virtuais.	88
Tabela 7.1 Geometria do corpo de prova circular	91
Tabela 7.2 Módulo de Elasticidade em diferentes níveis de deformação.	92
Tabela 7.3 Módulo de Elasticidade em diferentes níveis de deformação.	93
Tabela 7.4 Resultados experimentais do Modulo de Elasticidade para o aço e alumínio.	95
Tabela 7.5 Geometria do corpo de prova plano.	96
Tabela 7.6 Dimensões do extensômetro elétrico utilizado.	97
Tabela 7.7 Coeficiente de Poisson para diferentes níveis de deformação	98
Tabela 7.8 Relação de Poisson para diferentes níveis de deformação.	99
Tabela 7.9 Tempos de execução do programa desenvolvido.	101