

6 SIMULAÇÕES

Neste capítulo, o desempenho dos métodos propostos será avaliado através de imagens artificialmente modificadas com ajuda das ferramentas para processamento de imagens disponibilizadas pelo programa Matlab®.

A simulação de uma deformação é feita a partir de uma função de deslocamento definida pelo usuário, contendo parâmetros de deformação a serem arbitrados. A imagem de referência é capturada de um corpo de prova real, com a máxima resolução da câmera digital Nikon D50. A Figura 6.1 mostra que a superfície metálica foi previamente lixada, da forma mais aleatória possível.

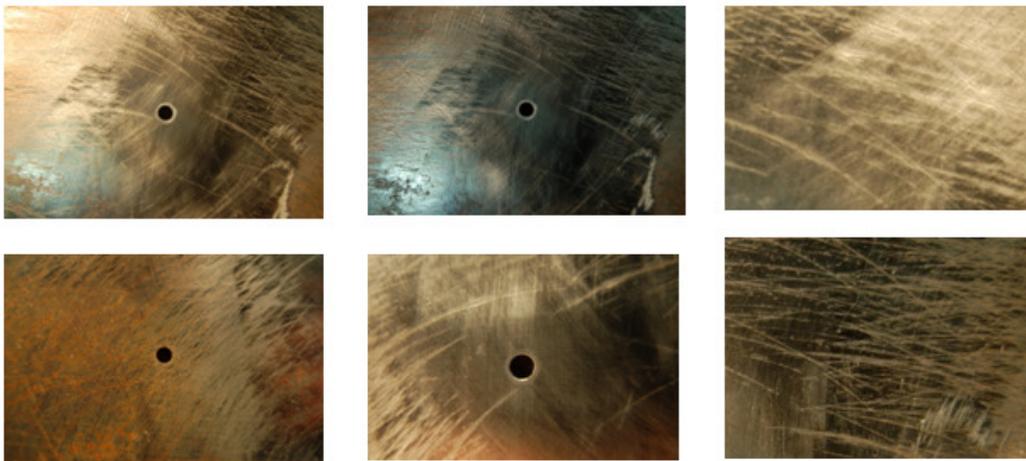


Figura 6.1 Imagens de uma peça metálica com furo.

A técnica SIFT consegue então extrair e descrever pontos-chaves da imagem de referência (Figura 6.2), os quais serão procurados nas imagens subsequentes deformadas artificialmente pelas ferramentas computacionais do Matlab®. Através da metodologia desenvolvida, tenta-se estimar os valores dos parâmetros de deformação que foram previamente definidos pelo usuário.

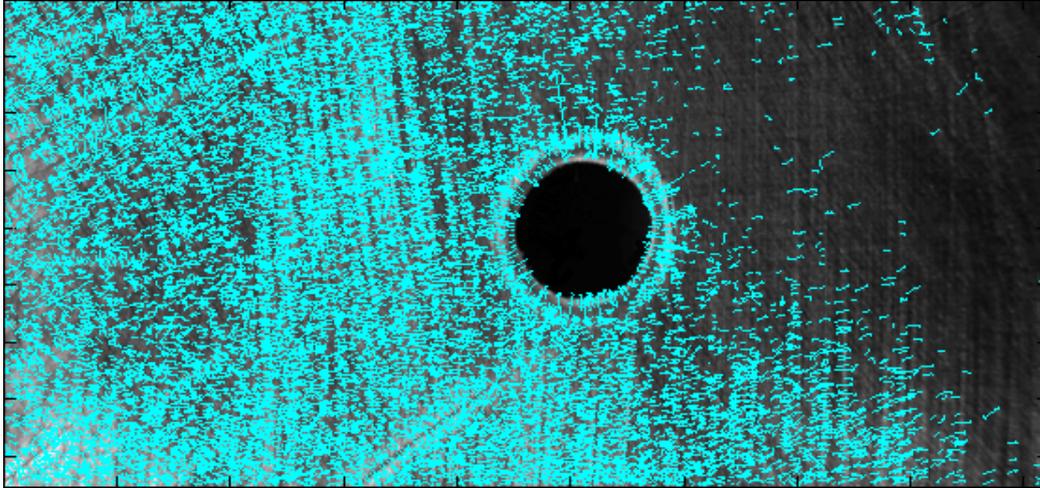


Figura 6.2 Localização de pontos-chave pelo SIFT.

6.1. Campo de Deformações Uniforme

Considere-se, para a primeira simulação, uma tração biaxial uniforme relativa aos eixos x e y . Para simular a deformação uniforme envolvida nesta análise, definem-se as seguintes funções lineares de deslocamento:

$$\begin{cases} f_x = a_0 + a_1x \\ f_y = b_0 + b_1y \end{cases} \quad (6.1)$$

As deformações uniformes são determinadas por:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial f_x}{\partial x} = a_1 \quad (6.2)$$

e

$$\varepsilon_y = \frac{\partial f_y}{\partial y} = b_1 \quad (6.3)$$

Definem-se arbitrariamente os valores para os parâmetros de deformação $a_1 = 0.01$ e $b_1 = 0.02$ nas direções x e y , respectivamente. A imagem original será numericamente deformada pela aplicação do deslocamento bidirecional definido pelas Equações (6.4) e (6.5), como mostrado na Figura 6.3.

$$\begin{cases} u = a_1x \\ v = b_1y \end{cases} \quad (6.4)$$

$$\begin{cases} x_f = x_o + 0,01x_o \\ y_f = y_o + 0,02y_o \end{cases} \quad (6.5)$$

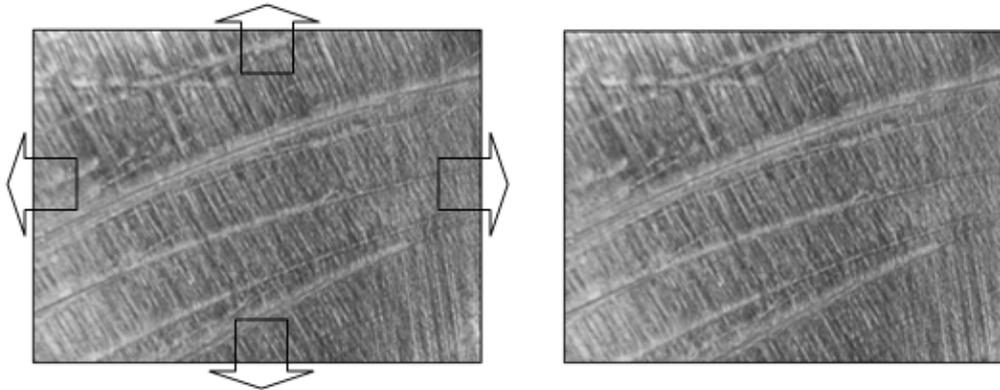


Figura 6.3 Imagem original e final, depois da aplicação de deslocamentos bidirecionais.

Os resultados obtidos das simulações são mostrados na Tabela 6.1. A técnica SIFT aplicada à correlação entre as 2 imagens da Figura 6.3, juntamente com o método dos mínimos quadrados aplicados a funções lineares de deslocamento, é capaz de identificar as deformações teóricas impostas com erros menores que 1%.

Tabela 6.1 Resultados dos parâmetros de deformação para o caso de uma deformação uniforme.

| Parâmetros Deformação | Valores Teóricos | Valores Estimados |
|-----------------------|------------------|-------------------|
| a_1 | 0,01 | 0,0101 |
| b_1 | 0,02 | 0,0200 |

6.2. Campo de Deformações Variável

Nesta segunda simulação, define-se uma deformação variável de um corpo representada pelas equações de deslocamento

$$\begin{cases} f_x = a_0 + a_1x + a_2xy \\ f_y = b_0 + b_1y + b_2xy \end{cases} \quad (6.6)$$

Utilizando a metodologia descrita, os campos de deformações em cada eixo x e y , respectivamente, são determinados pelas expressões

$$\varepsilon_x = \frac{\partial f_x}{\partial x} = a_1 + a_2 y \quad (6.7)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial f_y}{\partial y} = b_1 + b_2 x \quad (6.8)$$

Nesta simulação, as deformações em y serão arbitradas como nulas, portanto definem-se $b_1 = b_2 = 0$ para as deformações artificiais da imagem, e com deslocamento nulo em y , i.e., $b_0 = 0$. Só haverá deslocamento na direção x , definido pelos termos arbitrados $a_1 = 0,03$ e $a_2 = 0,002$, resultando em um campo não-uniforme na direção x , pois $\varepsilon_x = 0,03 + 0,002 \cdot y$ varia na direção y . Este campo variável seria obtível na prática por uma combinação de tração e flexão na direção x . Estes deslocamentos serão então artificialmente impostos à imagem, através das transformações

$$\begin{cases} u = a_1 x + a_2 xy \\ v = 0 \end{cases} \quad (6.9)$$

$$\begin{cases} x_f = x_o + 0,03x_o + 0,002y_o \\ y_f = y_o \end{cases} \quad (6.10)$$

A Figura 6.4 mostra a imagem final artificialmente deformada, resultado da execução dos deslocamentos descritos na Equação 6.6 na imagem original.

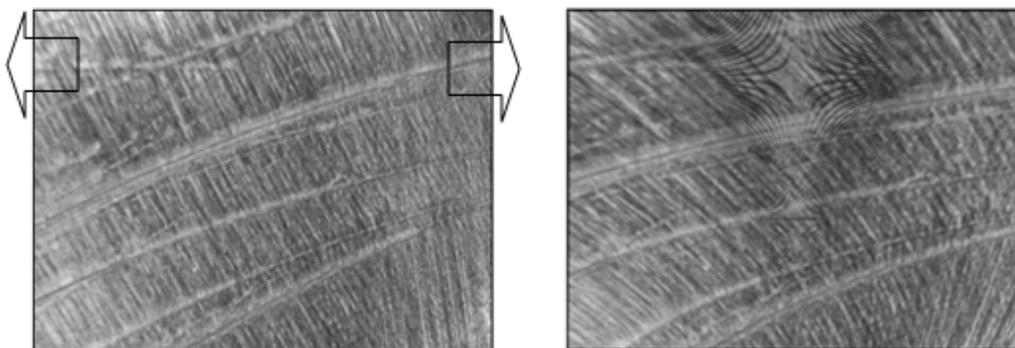


Figura 6.4 Imagem original e final, depois da aplicação de deslocamentos bidirecionais.

As equações (6.9-6.10) resumem os campos de deformações arbitrados para ambos os eixos x e y , respectivamente:

$$\varepsilon_x = 0,03 + 0,002y$$

$$\varepsilon_y = 0$$

Os resultados obtidos da simulação para cada parâmetro de deformação são mostrados na Tabela 6.2. Nota-se um erro de 7% no termo constante a_1 de ε_x (associado e.g. à contribuição da tração) e um erro desprezível no coeficiente a_2 (associado e.g. à contribuição da flexão).

Tabela 6.2 Resultados dos parâmetros de deformação para o caso de uma deformação variável.

| Parâmetros Deformação | Valores Teóricos | Valores Estimados |
|-----------------------|------------------|-------------------|
| a_1 | 0,03 | 0,0278 |
| a_2 | 0,002 | 0,0020 |
| b_1 | 0,0 | 0,0 |
| b_2 | 0,0 | 0,0 |

6.3. Campo de Deformações de uma Placa com Furo Central

O estado de deformações normais de uma placa com furo circular pode ser caracterizado pelas suas componentes do vetor deformação associadas às duas direções no espaço bi-dimensional.

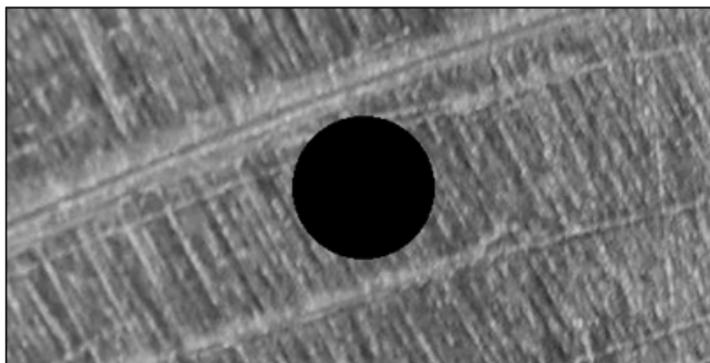


Figura 6.5 Imagem criada artificialmente de uma placa com furo

Para o caso em estudo, cria-se a imagem de uma placa com a geometria apresentada na Figura 6.5 e Tabela 6.3, e com as propriedades mecânicas de um material virtual adotado, definido na Tabela 6.4.

Tabela 6.3 Geometria da placa simulada

| Geometria | |
|------------------|-------------|
| Comprimento | L = 20 [mm] |
| Largura | D = 10 [mm] |
| Espessura | t = 4 [mm] |
| Diâmetro do furo | d = 4 [mm] |

Tabela 6.4 Propriedades mecânicas adotadas.

| Propriedades do material simulado | |
|-----------------------------------|--------------|
| Módulo de elasticidade | E = 70 GPa |
| Coefficiente de Poisson | $\nu = 0,33$ |

As seguintes expressões definem o comportamento dos deslocamentos (equações 5.33 e 5.34) radial e tangencial respectivamente

$$u_r = \frac{\sigma_n}{2E} \left(\begin{array}{l} a_1 r - a_2 \frac{R^2}{r} + a_3 r \cos 2\theta - a_4 \frac{R^2}{r} \cos 2\theta - a_5 \frac{R^4}{3r^3} \cos 2\theta \\ -a_6 \nu r + a_7 \nu \frac{R^2}{r} - a_8 \nu r \cos 2\theta + a_9 \nu \frac{R^2}{r} \cos 2\theta + a_{10} \nu \frac{R^4}{3r^3} \cos 2\theta \end{array} \right)$$

$$u_\theta = \frac{\sigma_n}{2E} \left(\begin{array}{l} -a_1 (\nu + 1)\theta - a_2 (\nu - 1)\theta \frac{R^2}{r^2} - a_3 \frac{(\nu + 1)}{2} \text{sen} 2\theta - a_4 (\nu - 1) \frac{R^2}{2r^2} \text{sen} 2\theta \\ -a_5 \left(\nu - \frac{1}{3} \right) \frac{R^4}{2r^4} \text{sen} 2\theta + a_6 (\nu + 1)\theta + a_7 (1 - \nu)\theta \frac{R^2}{r^2} + a_8 \frac{(\nu + 1)}{2} \text{sen} 2\theta \\ + a_9 (1 - \nu) \frac{R^2}{2r^2} \text{sen} 2\theta + a_{10} \left(1 - \frac{\nu}{3} \right) \frac{R^4}{2r^4} \text{sen} 2\theta \end{array} \right)$$

como foi deduzido anteriormente no Capítulo 5.

Uma determinada tensão de tração σ_n (definida na direção x) aplicada à placa está associada aos parâmetros obtidos analiticamente (equação 5.24), mostrados a continuação:

$$\begin{aligned}
 a_1 = 1 \quad a_2 = -1 \quad a_3 = 1 \quad a_4 = 4 \quad a_5 = 3 \\
 a_6 = 1 \quad a_7 = 1 \quad a_8 = -1 \quad a_9 = 0 \quad a_{10} = -3
 \end{aligned}$$

A Figura 6.6 mostra a imagem final modificada numericamente, assumindo os valores de a_i definidos acima para simular o efeito de uma tensão nominal σ_n associada a uma deformação máxima no furo no valor próximo a 1%.

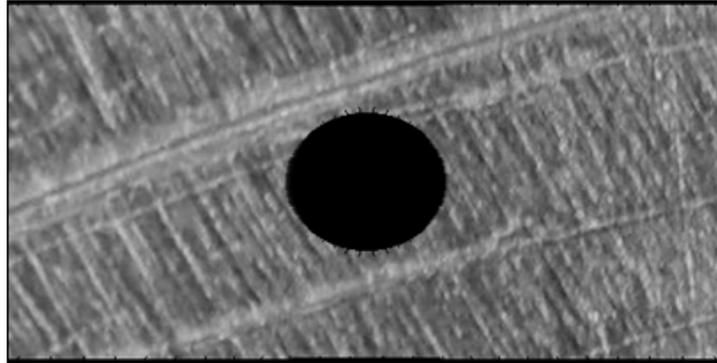


Figura 6.6 Imagem final deformada após a aplicação de deslocamentos bidirecionais associados a uma tensão nominal σ_n na direção horizontal.

Nesta simulação, os parâmetros a serem identificados serão os coeficientes a_1 até a_{10} envolvidos nas equações da placa com furo. Como estes parâmetros são conhecidos a partir da solução analítica para esta placa, a metodologia proposta poderá ser quantitativamente avaliada.

Aplicando-se a metodologia às imagens original e modificada, obtêm-se os coeficientes a_i desejados.

Como o campo de deformações da placa com furo, no sistema de coordenadas polares, é definido por

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_r &= \frac{\sigma_n}{2} \left(\begin{array}{l} a_1 + a_2 \frac{R^2}{r^2} + a_3 \cos 2\theta + a_4 \frac{R^2}{r^2} \cos 2\theta + a_5 \frac{R^4}{r^4} \cos 2\theta - a_6 \nu \\ -a_7 \nu \frac{R^2}{r^2} - a_8 \nu \cos 2\theta - a_9 \nu \frac{R^2}{r^2} \cos 2\theta - a_{10} \nu \frac{R^4}{r^4} \cos 2\theta \end{array} \right) \\
 \varepsilon_\theta &= \frac{\sigma_n}{2} \left(\begin{array}{l} -a_1 \nu - a_2 \nu \frac{R^2}{r^2} - a_3 \nu \cos 2\theta - a_4 \nu \frac{R^2}{r^2} \cos 2\theta - a_5 \nu \frac{R^4}{r^4} \cos 2\theta \\ +a_6 + a_7 \frac{R^2}{r^2} + a_8 \cos 2\theta + a_9 \frac{R^2}{r^2} \cos 2\theta + a_{10} \frac{R^4}{r^4} \cos 2\theta \end{array} \right)
 \end{aligned}$$

(equações 5.27 e 5.28) radial e tangencial respectivamente, sendo os coeficientes a_i identificados, é possível desenhar a distribuição das deformações da placa simulando uma força de tração aplicada no eixo horizontal, vide Figura 6.7.

Como esperado, as deformações máximas alcançadas estão em torno de 1% (deformações ε_x acima e abaixo do furo, nas interseções entre a borda do furo e uma linha vertical passando por seu centro).

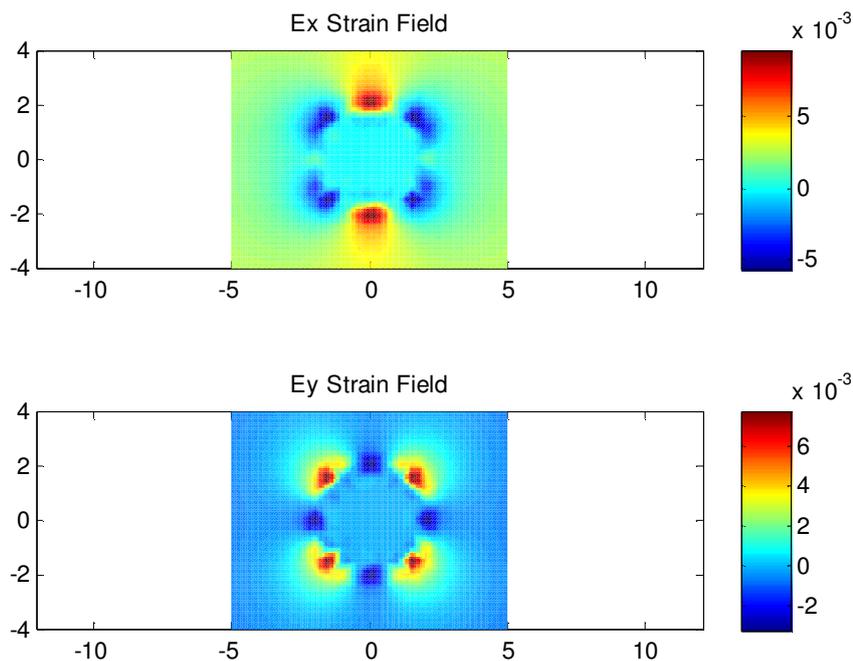


Figura 6.7 Simulação da distribuição do campo de deformações de uma placa com furo central, para uma tensão nominal $\sigma = 9KN$.

Os resultados estimados para cada parâmetro de deformação, para diversas simulações com diferentes resoluções de câmera em *pixels*, são mostrados na Tabela 6.5.

Concluimos que, com altas resoluções, consegue-se obter com boa precisão o gradiente de tensões e deformações ao redor de um furo no caso elástico (obtendo os coeficientes a_1 até a_{10}). Note que os coeficientes a_9 e a_{10} possuem os maiores erros, porém eles estão associados a termos de 4ª ordem em relação a R/r , possuindo pouca influência no resultado final, pois $(R/r)^4 \ll (R/r)$ para a maioria dos pontos da placa.

Tabela 6.5 Resultados da estimação dos parâmetros de deformação para diferentes resoluções virtuais.

| Valores analíticos | Resolução virtual | | | | |
|----------------------|-------------------|----------|----------|-----------|-----------|
| | 800x400 | 1600x800 | 1800x900 | 2000x1000 | 3200x1600 |
| $a_1 = 1$ | 0.7335 | 1.0363 | 1.0508 | 1.0305 | 1.0072 |
| $a_2 = -1$ | -0.4470 | -0.9663 | -1.3536 | -1.2485 | -0.9676 |
| $a_3 = 1$ | 0.8439 | 1.1821 | 0.8875 | 0.9988 | 0.9017 |
| $a_4 = -4$ | -5.9385 | -3.1249 | -4.7546 | -4.0124 | -3.8729 |
| $a_5 = 3$ | 5.2375 | -3.1150 | 0.9165 | 2.3216 | 1.7986 |
| $a_6 = 1$ | 0.7642 | 1.0510 | 1.0784 | 1.0606 | 1.0186 |
| $a_7 = 1$ | 0.4134 | 1.0048 | 0.9688 | 0.8203 | 0.7213 |
| $a_8 = -1$ | -1.5940 | -0.7584 | -0.9201 | -0.9472 | -1.1508 |
| $a_9 = 0$ | -3.5396 | -4.7378 | -4.5878 | -1.3595 | 0.6517 |
| $a_{10} = -3$ | -0.6273 | 1.5537 | 0.9984 | -5.2514 | -3.9777 |
| Desvio Padrão | 2.0789 | 1.9746 | 1.8493 | 0.6988 | 0.4728 |

A Figura 6.8 ilustra os erros em porcentagem de deformação devido à resolução limitada do sistema de aquisição das imagens, para o caso da placa sem furo e para a câmera utilizada (em sua maior resolução).

Nóta-se que para pequenas deformações, desvios significativos na localização dos pontos correspondentes na imagem deformada (da ordem de 1 *pixel*) ocasionam erros na medição visual de deformação da ordem 0,033%. À medida que a deformação a ser medida aumenta, este valor do erro diminui, porque maiores deformações são mais fáceis de serem detectadas. O erro médio na deformação medida na faixa de deformações entre 0 e 10000 μe é de 0,028%. Por outro lado, para pequenos desvios de localização da ordem de 0,1 *pixels*, o erro na deformação medida visualmente é de 0,003% para toda a faixa de deformação.

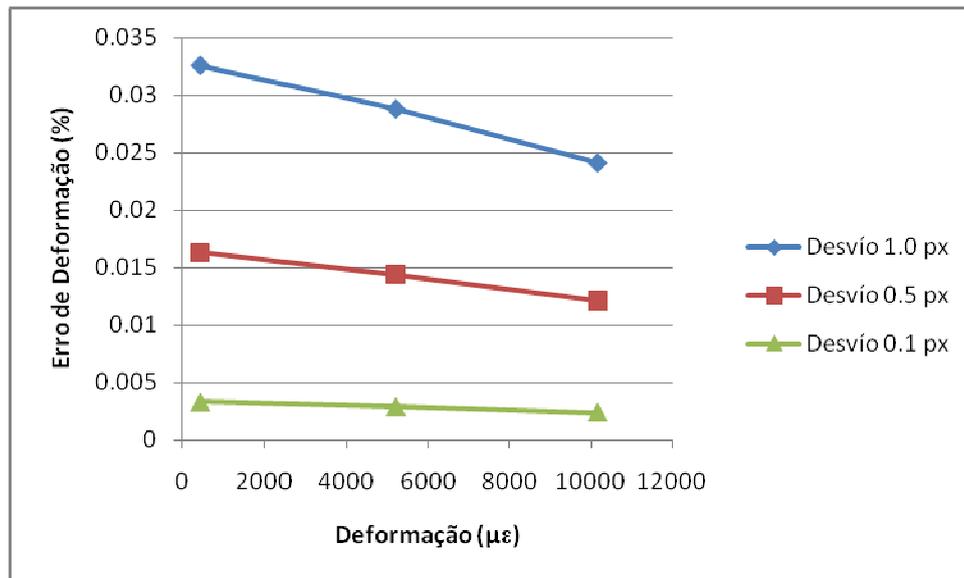


Figura 6.8 Gráfico dos erros na medição visual da deformação associados à resolução.

As simulações demonstraram que a técnica SIFT é capaz de identificar campos não-uniformes de deformação, desde que as funções de deslocamentos sejam apropriadamente escolhidas, e a resolução das imagens seja suficientemente alta.

No capítulo seguinte, experimentos são conduzidos para validar a metodologia.