

## DETERMINAÇÃO DE DEFORMAÇÕES, A PARTIR DE FRANJAS DE MOIRÉ, UTILIZANDO PROCESSAMENTO DE IMAGENS DIGITAIS

Denis Henrique Bianchi Scaldaferrri  
Marco Antônio Dutra Quinan  
Tanius Rodrigues Mansur  
Wellington Antonio Soares  
Comissão Nacional de Energia Nuclear/CNEN

### RESUMO

Na técnica de moiré, produz-se um padrão visual à partir da superposição de duas grades, constituídas de linhas muito finas, com pequeno espaçamento entre si. Esta técnica pode ser utilizada para a determinação de deslocamentos e deformações de um objeto (corpo-de-prova, estrutura) submetido à esforços. Neste caso, uma das grades é colocada no objeto, enquanto a outra, chamada grade padrão, fica próxima à primeira grade. Quando o objeto é tensionado ou deslocado, são formados os padrões geométricos denominado de franjas.

Nesta técnica, para cada ponto do objeto, é demandado um grande volume de cálculos, o que torna a técnica de moiré pouco prática, em alguns casos. Para agilizar estes cálculos, foi feita uma montagem para aquisição de imagens com a utilização de uma câmara CCD e desenvolvido um sistema de processamento, de imagens de moiré, automatizando a realização dos cálculos. Neste trabalho, reporta-se o desenvolvimento deste sistema e a aplicação do mesmo na determinação de deslocamentos e deformações em componentes mecânicos.

Apresenta-se, também, uma breve fundamentação teórica do princípio de moiré e os conceitos que serviram de base para o desenvolvimento do trabalho, uma descrição do sistema desenvolvido, incluindo o hardware e os softwares utilizados na aquisição e tratamento das imagens. São mostrados, ainda, alguns resultados de processamentos de imagens de moiré, utilizando o sistema desenvolvido e compara-se estes resultados com cálculos convencionais.

### 1. INTRODUÇÃO

*Moiré* é uma palavra francesa que dá nome a um tipo de tecido, uma seda fina, que exibe bandas claras e escuras. Hoje, é uma palavra usada, também, para denominar franjas de interferência criadas pela superposição de dois ou mais padrões geométricos.

A técnica de moiré é usada para medir deslocamentos ou deformações, indiferentemente do tamanho do corpo-de-prova, temperatura, tempo, frequência ou velocidade. É considerada uma técnica de campo global.

Uma grade, neste contexto, é entendida como uma seqüência de linhas escuras de mesma espessura tendo, entre elas, faixas transparentes de mesma espessura, como mostrado na Figura 1.

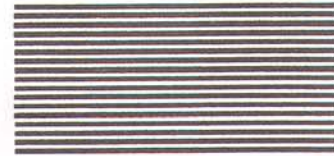


Figura 1. Grade típica de linhas retas paralelas.

Quando duas grades são superpostas, as franjas de interferência de moiré são o resultado ou da diferença entre o centro de duas linhas vizinhas (pitch) ou da diferença de orientação. Na Figura 2 são ilustrados os dois casos e mostradas as franjas claras e escuras, chamadas de franjas de moiré.

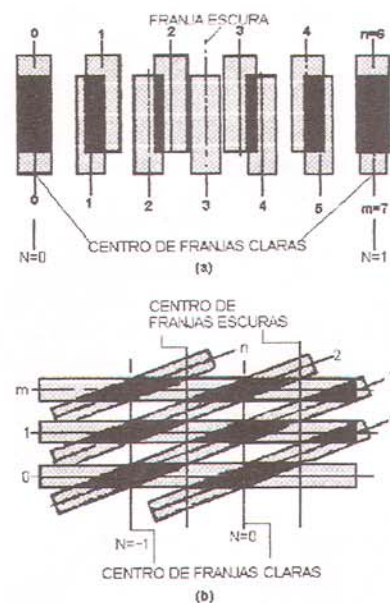


Figura 2. Franjas de interferência de moiré resultante da superposição de duas grades tendo (a) diferença no "pitch" e (b) diferença na orientação, "Chiang" (1979).



As franjas escuras aparecem quando as linhas escuras de uma grade caem no espaço transparente da outra grade. Já as franjas claras são resultado das linhas escuras coincidindo entre si. Para propósito de identificação, designa-se o centro das linhas escuras de uma grade com números de 0 a m e o centro das linhas escuras da outra grade, de 0 a n. O centro das franjas claras é identificado pelos números de 0 a N, chamado de número de ordem de franja, como ilustrado na Figura 2.

A grade utilizada na técnica de moiré é formada por linhas retas muito finas com pequeno espaçamento entre si, podendo-se ter da ordem de até milhares de linhas por polegadas de comprimento da grade. Num experimento de moiré, uma das grades é colada ou impressa no corpo-de-prova a ser estudado (grade modelo ou amostra) e a outra, chamada de referência ou *master*, fica fora do mesmo, o mais perto possível. Quando o corpo-de-prova se deforma, observa-se a formação de franjas que são resultantes dos deslocamentos relativos das duas grades. Estas franjas podem ser fotografadas ou filmadas para análise posterior. Na Figura 3 são mostradas as franjas que ocorrem em uma chapa perfurada, submetida à tração.

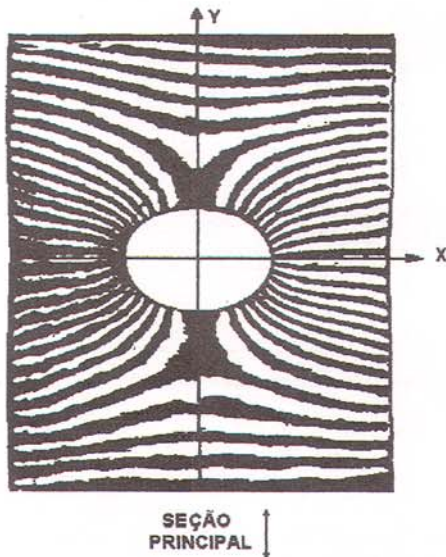


Figura 3. Franjas de moiré formadas em uma chapa com furo elíptico, submetida à tração, "Dove & Adams" (1965).

A técnica de moiré, em superfícies planas, é definida como uma técnica de determinação de campo de deslocamento num plano. Ela pode ser aplicada a problemas de pequenas ou grandes deformações, tanto estáticas quanto dinâmicas e para a maioria dos materiais utilizados na engenharia. O fenômeno de moiré está relacionado ao campo de deslocamentos de um ponto. Portanto, existe a necessidade de se estudar o campo de deslocamento nos sentidos horizontal e vertical ( $x$  e  $y$ ). Para isto, uma grade de linhas cruzadas a  $90^\circ$  deve ser colada ou impressa no componente a ser estudado. As linhas desta grade orientadas na direção vertical (eixo  $y$ ) permitem estudar o campo de deslocamentos no sentido do eixo horizontal (eixo  $x$ ). São, assim, obtidos os números de ordem de franja para os deslocamentos horizontais ( $N_u$ ). De maneira semelhante, são obtidos os números de ordem de franja para os deslocamentos verticais ( $N_v$ ).

## 2. MEDIÇÕES DE DESLOCAMENTO

O deslocamento é obtido, como citado por "Chiang" (1979) multiplicando-se o número da ordem de franja ( $N_u$  ou  $N_v$ ) pela distância entre duas linhas vizinhas ( $p$ ) medida na grade de referência.

Para o campo de deslocamento de um ponto qualquer, no sentido do eixo coordenado  $x$ , tem-se, de acordo com "Chiang" (1979):

$$u = N_u p$$

Para o eixo  $y$ , analogamente, tem-se:

$$v = N_v p$$

onde  $N_u$  e  $N_v$  são os números de ordem de franja horizontal e vertical, respectivamente, e  $p$  é a distância entre as linhas da grade (*pitch*).

Em um ponto, o deslocamento total é dado por:

$$D_t = \sqrt{u^2 + v^2}$$

## 3. MEDIÇÕES DE DEFORMAÇÃO

Quando se emprega a técnica de moiré, é necessário ter-se em mente duas conceituações diferentes de deformação:

- Conceituação de Lagrange para a deformação normal

$$\varepsilon^L = \frac{\Delta L}{l_i}$$

- Conceituação de Euler para a deformação normal

$$\varepsilon^E = \frac{\Delta L}{l_f}$$

onde  $\Delta L$  é a diferença entre o comprimento final e o inicial,  $l_i$  é o comprimento inicial e  $l_f$  é o comprimento final.

A diferença conceitual entre elas é que na descrição de Lagrange, o sistema de coordenadas é baseado no corpo não deformado, enquanto que na descrição de Euler, é baseado no corpo deformado.

Nas aplicações da técnica de moiré, as coordenadas são, usualmente, baseadas no corpo-de-prova deformado, sendo natural o uso da formulação Euleriana. "Durelli & Parks" (1970) relacionam as duas formulações acima descritas por:

$$\varepsilon^L = \frac{\varepsilon^E}{1 - \varepsilon^E}$$

e partir das franjas de moiré, calculam a deformação por:

$$|\varepsilon^E| = \frac{p}{s}$$

onde  $s$  é a distância entre duas franjas consecutivas.

## 4. SISTEMA DE AQUISIÇÃO E PROCESAMENTO DE IMAGEM

Para a aquisição de imagens, foi montado um sistema constituído de uma câmara CCD e um conjunto ótico. As imagens armazenadas em um microcomputador foram processadas por um conjunto de softwares. Um diagrama de blocos deste equipamento é mostrado na Figura 4, sendo constituído pelos seguintes componentes: sistema de posicionamento, sistema ótico, câmara de vídeo, placa digitalizadora, microcomputador.



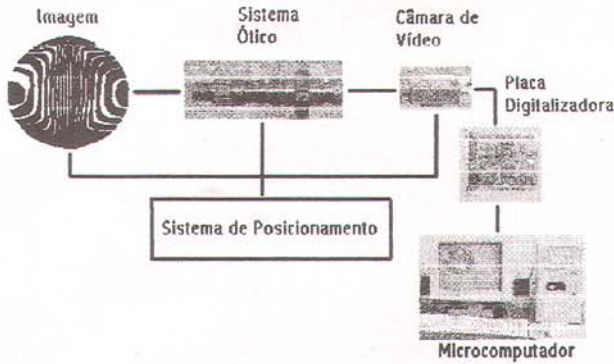


Figura 4. Sistema de aquisição de imagens.

Cada um dos blocos constituintes do equipamento tem a seguintes funções:

- **sistema de posicionamento** - é responsável pelo perfeito posicionamento da câmara de vídeo e do sistema ótico;
- **sistema ótico** - amplia e focaliza a imagem a ser capturada e processada, sendo constituído por uma lente zoom de 12 mm e lentes acessórias;
- **câmara de vídeo CCD** - converte a imagem num sinal elétrico de vídeo padronizado;
- **placa digitalizadora** - converte o sinal de vídeo analógico em sinal digital e faz a interface de comunicação com o microcomputador. Foi utilizada uma placa monocromática;
- **microcomputador** - processa a imagem capturada e calcula as deformações, apresentando os resultados em forma gráfica e em tabelas. As imagens e os resultados do processamento são armazenados em disco.

## 5. SOFTWARES UTILIZADOS

No processamento das imagens de franjas de moiré, foram utilizados vários programas. A seguir é descrita cada fase e o programa utilizado.

**Aquisição de Imagens.** Na aquisição das imagens foi utilizado o programa comercial Global Lab da empresa Data Translation. Este programa permite a visualização em tempo real da imagem capturada pela câmara de vídeo e digitalizada pela placa digitalizadora. Desta forma, pode-se fazer a focalização e ampliação adequada das imagens. Pode-se, ainda, atuar no controle de brilho e contraste, de forma a obter-se uma imagem a mais nítida possível. Este programa permite, ainda, melhorar a qualidade da imagem com a utilização de filtros e efeitos especiais.

A fase de aquisição de imagens é fundamental para a qualidade dos resultados dos cálculos. É importante lembrar que são efetuadas duas aquisições de imagens, sendo uma com o padrão U e outra com o padrão V. Estas imagens devem estar na mesma posição para que o ponto de referência seja o mesmo no processamento.

**Processamento de Imagens.** Na fase de processamento de imagens, é utilizado o programa Fotofran, desenvolvido por "Soares" (1997) em linguagem C, para fotoelasticidade, e perfeitamente utilizável para franjas de moiré. Este programa é responsável por executar a esqueletonização, afinamento e rotulação das franjas, determinando as coordenadas dos pontos centrais das franjas que são os dados de entrada para o cálculo das deformações.

**Cálculo de Deformações.** Nesta fase, é utilizada uma planilha eletrônica, que executa uma série de rotinas baseadas na teoria

citada anteriormente neste trabalho e apresentado, na forma gráfica, os valores de deformações nas direções  $x$  e  $y$ .

## 6. EXEMPLOS

Nas Figuras 5 e 6 são apresentados os padrões de moiré, campos  $u$  e  $v$  respectivamente, para um anel circular de epóxi submetido à compressão diametral.

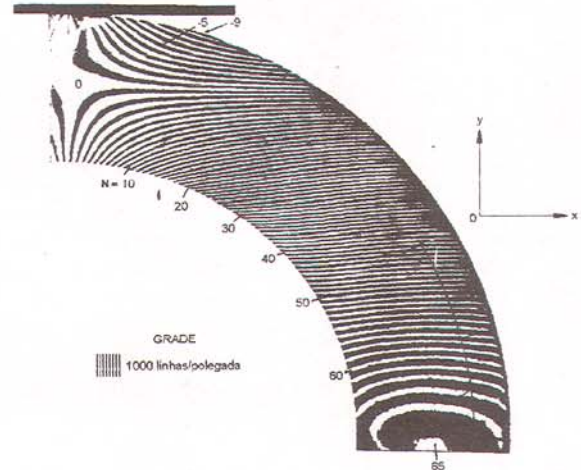


Figura 5. Padrão de moiré (campo  $u$ ) de um anel circular submetido à compressão diametral, "Durelli & Parks" (1970).

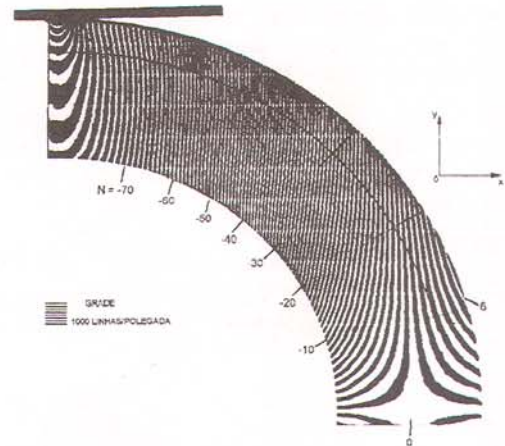


Figura 6. Padrão de moiré (campo  $v$ ) de um anel circular submetido à compressão diametral, "Durelli & Parks" (1970).

A partir destes padrões, foi realizada a aquisição destas imagens através do equipamento desenvolvido. Estas imagens foram tratadas, como anteriormente descrito, e foram determinados os campos de deformação na direção dos eixos  $x$  e  $y$ . Estes campos são mostrados nas Figuras 7 e 8.

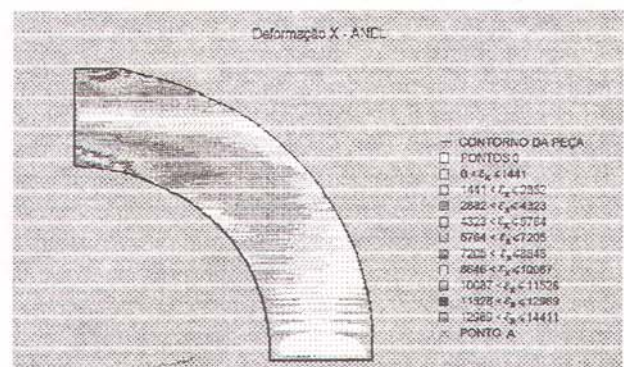


Figura 7. Deformação na direção  $x$  de um anel sob compressão.



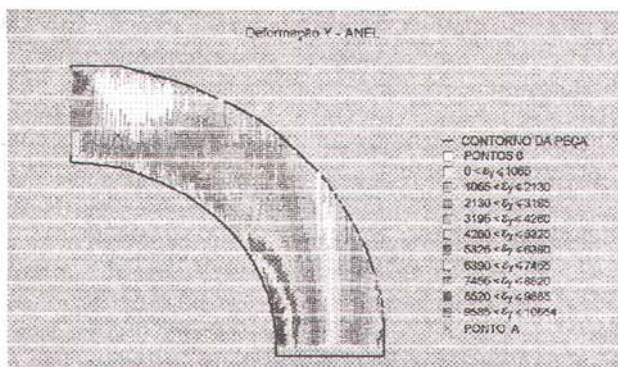


Figura 8. Deformação na direção  $y$  de um anel sob compressão.

A título de comparação, foi calculado, pelo método convencional, as deformações em um determinado ponto (ponto A das Figuras 7 e 8), encontrando-se os seguintes valores:

$$\epsilon_x = 3.520 \mu\text{d e } \epsilon_y = 0 \mu\text{d}$$

Para o mesmo ponto, os valores processados pelo computador foram os seguintes:

$$\epsilon_x = 3.560 \mu\text{d e } \epsilon_y = 0 \mu\text{d}$$

## 7. CONCLUSÕES

O sistema desenvolvido para realizar a aquisição e o processamento das imagens de moiré permite efetuar, de forma rápida e segura, cálculos dos deslocamentos e deformações, nos regimes elástico e plástico.

Permite, também, apresentar os resultados advindos destes cálculos de uma forma gráfica, que por sua vez, possibilita visualizar, de uma maneira global, os campos de deslocamentos e deformações.

## 8. REFERÊNCIAS

- Durelli, A. J.; Parks, V. J. "Moiré analysis of strain". Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1970. 399p.
- Theocaris, P. S. "Moiré fringes in strain analysis". London. Pergamon Press Ltd., 1969. 426p.
- Dally, J. W.; Riley, W. F. "Experimental stress analysis". 2 ed. United States of America. McGraw-Hill, Inc., 1978. 571p.
- Dove, R. C.; Adams, P. H. "Experimental stress analysis and motion measurement". New Delhi. Prentice-Hall of India (Private) Ltd., 1965. 515p.
- Chiang, F. P. "Moiré methods of strain analysis". *Experimental mechanics*, 6, pp. 290-308, 1979.
- Chiang, F. P. "Determination of signs in moiré method". *Journal of the engineering mechanics division*, EM 6, pp.1379-1391, 1969.
- Soares, W. A. "Determinação de parâmetros da mecânica de fratura a partir de imagens fotoelásticas, usando processamento digital". São Paulo: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN/CNEN, 1997. 166p. Dissertação (Doutorado em Ciências na área de Reatores Nucleares de Potência e Tecnologia do Combustível Nuclear) IPEN. Autarquia associada à Universidade de São Paulo. 1997.

- Phillips, D. "Image processing in C". Lawrence, Kansas. R&D Publications, Inc., 1994. 724p.

## 9. AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento do equipamento descrito neste trabalho foi realizado com recursos da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais - FAPEMIG.

## SUMMARY

In the moiré technique, a characteristic visual pattern is produced from the superposition of two grids constituted of thin lines with a small space between them. This technique can be utilized for determining displacements and deformations of a solid body (specimens, structure) under loads. In one of variations of this technique, one of the grids is fixed on the surface of the body while the other, call standard grid, stay near the first grid. Geometrical patterns, named fringes, are formed when the body is stressed or displaced from its original position.

For each point on the surface of the object under test, a great computational task is demanded causing the moiré technique to be not practical for some cases. In order to make this technique more practical, an arrangement for image acquisition using a CCD camera was mounted and developed a system for image processing of moiré fringes with the purpose of automating the computations involved in the technique. In this article, the development of this system and the application of it to the determination of displacements and deformations in mechanical components are reported.

The following topics are presented in this paper: a short theoretical fundamentals on moiré technique; concepts used in the development of the automated system; description of the developed system, including utilized hardware and software for image acquisition and image processing. Some results from processing moiré fringes with the developed system are presented and they are compared with results from conventional computations.