

# CALIBRAÇÃO DA TÉCNICA DE *MOIRÉ* APLICADA A PERFILOMETRIA DE PROTÓTIPOS MECÂNICOS

## Calibration method applied to a moiré technique in experiments of mechanical archetypes

Túlio Seabra Gomes<sup>1</sup>, Roberto Alves Braga Júnior<sup>2</sup>, Antônio Carlos Loureiro Lino<sup>3</sup>,  
Giovanni Francisco Rabelo<sup>2</sup>, Ricardo Marques Costa<sup>4</sup>

### RESUMO

A perfilometria é uma técnica amplamente utilizada na construção de mapas e gráficos de relevos aplicados a uma vasta área do conhecimento. Frente às necessidades de suprir a demanda da indústria e da área de desenvolvimento de protótipos quanto a técnicas não invasivas na investigação da superfície de materiais em geral, o presente trabalho buscou propor uma metodologia de calibração aplicada à técnica de *moiré* para investigações perfilométricas em protótipos mecânicos buscando baixos custos e flexibilidade. A técnica de *moiré* consiste na comparação de dois retículos periódicos, onde um segue o comportamento da superfície do objeto (retículo modelo - Rm) e outro não está deformado, seguindo o comportamento de um plano de referência, (retículo de referência - Rr). A luz que passa entre os retículos se sobrepõe formando padrões de *moiré* ou franjas de *moiré* que se comportam como ondas senoidais. Nos ensaios de calibração, usou-se um cone de relevo conhecido para a determinação de uma constante de correção de mapas gerados digitalmente. Os ensaios realizados aplicaram a metodologia para a determinação do perfil de um mouse de computador e para a determinação da deformação de uma chapa metálica. A metodologia proposta para a calibração da técnica de *moiré* mostrou-se capaz de realizar os mapeamentos, com resolução máxima na ordem de centésimos de milímetros, podendo então ser usada em aplicações com níveis de precisão inferiores a essa ordem.

**Termos para indexação:** Deformações, perfilometria, retículos.

### ABSTRACT

Profilometry is a measurement technique widely used in map and relief graphic construction, being applied to vast areas of knowledge. The aim of the present investigation was to introduce a calibration method applied to a *moiré* technique in experiments of mechanical archetypes, with low cost and flexibility, due to the need for supplying demands from both industry and mechanical archetype development for non-invasive techniques. The *moiré* technique basically consists of the comparison of two periodic structures. One of them follows the behavior of the object surface (reticulum model - Rm) and the other one is kept constant without deformation, working as a reference plane (reference reticulum - Rr). The light that passes between the reticulum overlaps and forms a *moiré* standard, also called *moiré* fringe which behaves as sinusoidal waves. In the present calibration tests, a relief cone was used to determine a correction constant in the generated maps. The technique was applied to draw the profile of a computer mouse, and to determine deformation on a metallic blade, mounted over a deformation test table. The proposed methodology for the calibration applied to the *moiré* technique showed to allow the construction of maps with maximum resolution of hundredths of millimeters. Results also showed that the technique might be used in applications with lower levels of precision as well.

**Index terms:** Deformation, profilometry, reticulum.

(Recebido em 5 de junho de 2006 e aprovado em 17 de abril de 2007)

### INTRODUÇÃO

Visando suprir as deficiências apresentadas por alguns métodos e instrumentos de avaliação da topografia de componentes mecânicos, várias pesquisas têm sido realizadas a fim de buscar alternativas que colem dados sem que haja contato do elemento medidor com o objeto estudado, de maneira rápida e eficiente.

Entre várias alternativas, as técnicas ópticas de medição perfilométricas têm se mostrado eficientes e eficazes para trabalhos com materiais sensíveis, como os biológicos. Essas técnicas são aplicadas para estudos com materiais estáticos e mais recentemente impostos à situação dinâmica, sendo as mais utilizadas a holografia, a fotoelasticidade clássica, interferometria *Speckle* e as técnicas de *moiré*.

<sup>1</sup>Engenheiro Agrícola, Mestre – Plantar Empreendimentos e Produtos Florestais – Rodovia BR 135, km 637 – Zona rural – 35790-000 – Curvelo, MG – tulio.gomes@plantar.com.br

<sup>2</sup>Engenheiros Elétricos, Doutores, Professores – Departamento de Engenharia/DEG – Universidade Federal de Lavras/UFLA – Cx. P. 3037 – 37200-000 – Lavras, MG – robbraga@ufla.br; rabelo@ufla.br

<sup>3</sup>Engenheiro Agrícola, Mestre, Pesquisador – Instituto Agrônomo de Campinas/IAC – Avenida Barão de Itapura, 1481 – Cx. P. 28 – 13012-970 – Campinas, SP – lino@iac.sp.gov.br

<sup>4</sup>Graduado – Departamento de Ciência da Computação – Universidade Federal de Lavras/UFLA – Cx. P. 3037 – 37200-000 – Lavras, MG – ricardobcc@gmail.com

As técnicas de *moiré* mostram-se favoráveis no que diz respeito à versatilidade, agilidade e facilidade de coleta e manipulação dos dados. Além disso, oferecem relativa confiabilidade e, principalmente, por não exigirem estar em contato com o material avaliado.

Assundi & Yung (1991) definem a técnica de *moiré* como um conjunto de métodos usados para medição de deformações no plano e fora do plano, contornos topográficos, inclinações, curvaturas e formas em geral de objetos.

O fenômeno de *moiré* é notado quando a luz que passa por dois retículos ou grades sofre interferência, resultando na formação de padrões chamados de “franjas de *moiré*”. Segundo Cloud (1998), a intensidade da luz observada é uma média da luz transmitida através dos retículos 1 e 2, com irradiância máxima no centro das franjas claras e mínima no centro das franjas escuras, apresentando comportamento senoidal.

Lino (2002) mostra que as franjas são obtidas de duas maneiras distintas: por *moiré* de sombra ou *moiré* de projeção. Na técnica de *moiré* de sombra, o retículo cujas faixas claras são transparentes é colocado à frente do objeto. Quando o retículo é iluminado por uma fonte, a sombra dele é projetada sobre a superfície do objeto, gerando o Retículo modelo (Rm). As franjas de *moiré* são formadas pela interferência dos dois retículos, quando o observador olha através do retículo de referência (Rr).

Quanto à técnica de projeção, Cloud (1998) afirma que o retículo é projetado sobre a superfície do objeto, modulando ou acompanhando a superfície, gerando o Rm. O retículo projetado sobre o plano de referência dá origem ao Rr e as franjas são observadas sobrepondo as duas imagens.

Visando aumentar a sensibilidade da técnica de *moiré*, Gasvik (1983) afirma que várias são as metodologias que podem ser aplicadas ao processo, como por exemplo, os métodos de multiplicação e interpolação de franjas, técnicas de grades desencontradas e mudança de fase (*Phase Shift*). Dircks et al. (1988), dizem que o método de *Phase Shift* consiste na utilização de quatro imagens das franjas deslocadas de frações de seu período ou passo em relação à primeira imagem, onde o período ou passo se refere à distância entre linhas escuras. O mais comum é a utilização de 4 deslocamentos, ou seja, imagens com passos deslocados de  $p/4$ ,  $p/2$  e  $3p/4$  em relação à grade original, que juntas totalizam quatro imagens. A Figura 1 mostra um exemplo de franjas produzidas por grades que estão deslocadas de  $1/4$  de fase.

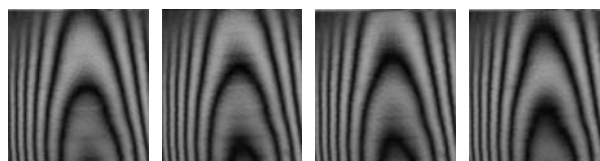


Figura 1 – Imagens com as franjas de *moiré* deslocadas de  $1/4$  entre imagens consecutivas.

Mazzeti Filho (2004) afirma que os deslocamentos de *Phase Shift* podem ser realizados aproximando o objeto do conjunto óptico em frações de franja, em se tratando de *moiré* de sombra, ou projetando-se sobre o plano retículos defasados de frações de seu passo quando se utilizar *moiré* de projeção. Assundi (1994) afirma que as franjas de *moiré* podem ser adquiridas utilizando-se grades geradas digitalmente.

Para os cálculos de determinação das cotas das curvas de nível, ou seja, da distância fora do plano entre as franjas, estudos foram realizados chegando-se a diversas equações, tendo como base iluminações com luz coerente e luz não coerente. Em se tratando de luz não coerente, Meadows et al. (1970) mostram que a “cotagem” das franjas pode ser obtida com a Equação 1.

$$Z = \frac{Nph}{d} \quad (1)$$

Em que:

Z – distância vertical da superfície do objeto ao retículo de referência, mm;

N – número de ordem da franja de *moiré*;

h – distância do observador ao objeto, mm;

d – distância do observador à fonte de luz, mm;

p – período ou passo da grade.

Objetivou-se neste trabalho propor uma metodologia de calibração para a técnica de *moiré*, por meio da determinação de uma constante de correção para melhor correção do perfil feitos com a técnica de *moiré*.

## METODOLOGIA

Para a realização do presente trabalho, foram realizados três categorias de ensaios. O primeiro ensaio, chamado de referência, utilizou um cone com dimensões conhecidas e determinou-se um fator de correção para ser aplicado em mapas gerados pelo aplicativo *Idea* (OPTICS, 2005). O segundo ensaio buscou obter a superfície de um objeto conhecido, um mouse de computador, e aplicar o fator de correção. O terceiro ensaio constituiu-se de

iluminações de uma lâmina elástica que foi montada em uma mesa de ensaios de flambagem, e deformada controladamente por pesos conhecidos. As Figuras 2, 3 e 4 apresentam os 3 objetos iluminados, respectivamente.

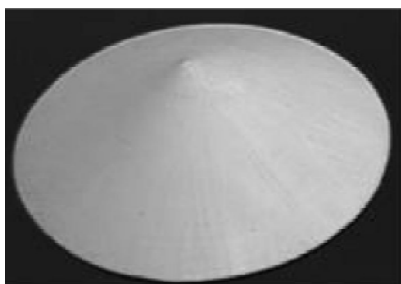


Figura 2 – Cone utilizado no processo de calibração.

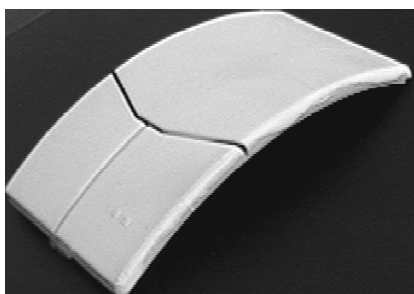


Figura 3 – Mouse usado na conferência do fator de correção.



Figura 4 – Mesa de ensaio e lâmina elástica dos ensaios aplicados.

Os retículos foram montados em um editor de fotos e projetados por um multimídia com fonte de 500 W. As imagens foram capturadas por uma câmera CCD, equipada com uma lente de 1/3' com zoom de 5-100 mm. As linhas pretas e brancas possuíam 8 pixels cada e passo 8 pixels quando projetadas. Foram produzidas 4 grades digitais defasadas entre si de  $\frac{1}{4}$  do passo uma da outra para a realização de *Phase Shift*, onde a grade "2" possuía uma defasagem de dois pixels; a "3" de quatro pixels, e a "4" de seis pixels, sempre em relação à grade "1".

Nos ensaios com o mouse e o cone, usou-se um anteparo pintado de branco fosco que servia também como plano de referência. A posição do plano foi locada na mesa de ensaio para que a lâmina pudesse ser colocada na mesma posição, mantendo a mesma configuração experimental. A Figura 5 mostra um esquema da configuração experimental.

Com essa configuração, uma imagem foi feita da grade "1", projetada sobre o corpo estudado (tanto para o cone ou mouse) para a obtenção do  $R_m$ . Logo depois, o cone ou mouse, foi retirado para a obtenção das 4 imagens do plano de referência, por meio da projeção das grades 1, 2, 3 e 4.

Para realizar-se a fase de calibração, inicialmente foi produzido o gráfico do cone para se realizar os cálculos de determinação da constante de correção. Esse fator foi determinado fazendo-se uma correlação entre o valor da altura retirada do gráfico produzido no *Idea* (OPTICS, 2005), com a altura real do objeto.

Após a determinação da constante de correção para a configuração experimental em questão, projetou-se a grade "1" sobre a lâmina que estava imposta a um carregamento inicial de 443 g e, posteriormente 556 g, 639 g, 723 g e 805 g, gerando um retículo modelo para cada solicitação. Logo após, projetaram-se as grades 1, 2, 3 e 4 sobre a lâmina sem carregamento, para que fossem consideradas como referência (Retículo de referência -  $R_r$ ) na realização de *Phase Shift*.

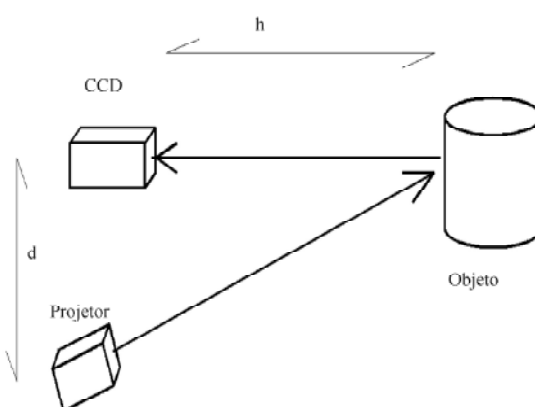


Figura 5 – Arranjo experimental utilizado.

A partir de então, todas as imagens (cone, mouse, lâmina e planos) foram redimensionadas e feita a diferença de cada uma com seus consecutivos planos de referência. Isso ofereceu condições para a obtenção das imagens dos objetos, contendo as franjas de *moiré*.

No *Rising Sun moiré* (ZYWANG, 2001), realizou-se a sobreposição das imagens que continham as franjas para obter imagens do relevo dos objetos. Os gráficos em 3D foram visualizados neste programa para acompanhamento das superfícies, identificando erros nas cotas mais elevadas.

As imagens com as franjas de *moiré* que não continham ruídos foram levadas para o programa *Idea* (OPTICS, 2005), onde se gerou um gráfico 2D do perfil do material estudado, que possuía em sua abscissa escala em pixels e, em sua ordenada, escala em radianos. O valor da diferença de cota foi calculado por meio da Equação 1.

Calculou-se então um fator de correção por meio do cone que possuía uma altura real de 26,35 mm, dividindo-se esse valor pelo valor da altura encontrada no gráfico na escala radianos. Esse fator foi usado para corrigir os gráficos da altura do mouse e da lâmina.

A partir de então realizou-se correção do gráfico do mouse e comparou-se a maior cota obtida com o programa *Idea* (OPTICS, 2005) com sua altura real para verificar a confiabilidade da metodologia. Depois, corrigiu-se a topografia da lâmina frente a diferentes carregamentos e as cotas de maior valor foram utilizadas para a confecção de uma curva de carga *versus* deformação, que devia possuir comportamento elástico.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os gráficos do cone e mouse produzidos no *Rising Sun moiré* (ZYWANG, 2001), mostraram que as imagens não continham ruídos nas cotas superiores. Isso possibilitou que as fases seguintes pudessem ser realizadas com as imagens em questão. Observa-se na Figura 6 o comportamento do mapa em 3D do cone e na Figura 7 o relevo do mouse.

O cone possuía altura real de 26,35 mm e, o gráfico produzido no *Idea* (OPTICS, 2005) mostrou uma altura de 15,06 radianos. Dividindo o valor em mm pelo valor em radianos, obteve-se o fator de correção de 1,749 mm/radianos para essa configuração experimental, gerando uma nova superfície corrigida. Apresenta-se na Figura 8, o perfil do cone depois da correção, o que foi feito por meio do programa *Idea* (OPTICS, 2005).

A metodologia de calibração foi confirmada comparando-se a figura do mouse com sua altura real (20,50 mm). Observa-se, na Figura 9, o perfil do mouse depois da correção, e os pontos medidos manualmente por paquímetro.

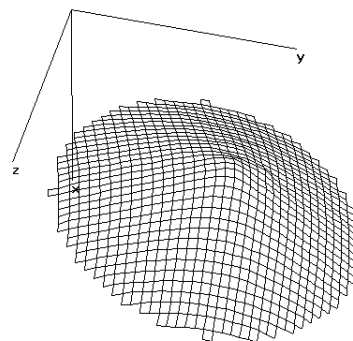


Figura 6 – Relevo do cone produzido no *Rising Sun moiré* (ZYWANG, 2001).

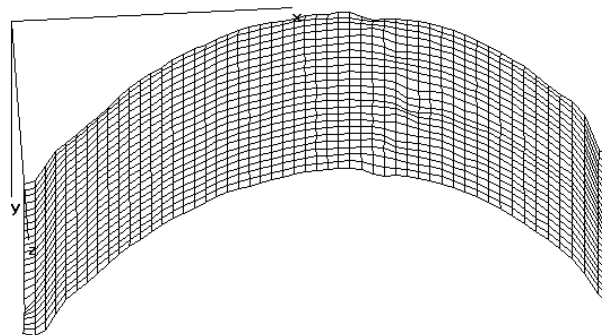


Figura 7 – Relevo do mouse produzido no *Rising Sun Moiré* (ZYWANG, 2001).

A altura mostrada pela figura produzida pelo *Idea* (OPTICS, 2005) foi de 20,30 mm, constatando-se um erro de 20 centésimos de milímetros. A principal contribuição para esse erro foi quanto à escolha das coordenadas de referência para realizar o corte, para a construção do perfil do relevo do mouse. Apresenta-se na Figura 8 também um desvio em parte do perfil do mouse, no lado em que a referência ficou distante daquela apresentada no outro extremo do objeto.

Os ensaios com a lâmina imposta à flambagem, produziram dados que possibilitaram a produção de figuras que mostram o perfil da lâmina imposta a diferentes cargas (433 g, 556 g, 639 g, 723 g e 805 g), que ilustra-se pela Figura 10.

Utilizando-se os valores das maiores cotas da lâmina e de cada carga correspondente, gerou-se uma figura de carga *versus* deformação para se acompanhar o comportamento da peça, nessas condições de ensaio. Ilustra-se pela Figura 11, o comportamento da lâmina.

Por meio dessa figura, pode-se observar o comportamento elástico do aço, comportamento já esperado em se tratando de um aço dúctil.

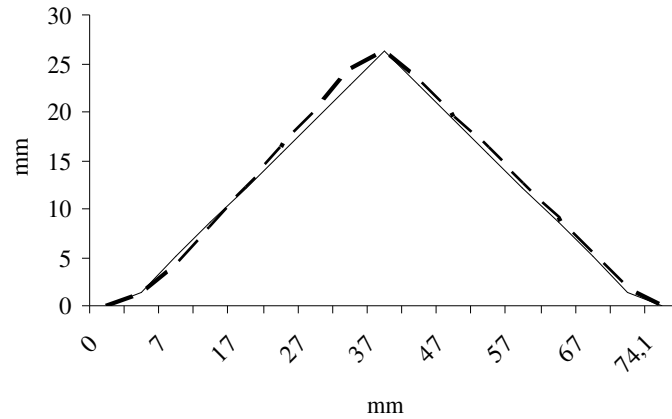


Figura 8 – Perfil do cone depois da correção: (linha contínua) curva medida manualmente por paquímetro, e (linha tracejada) curva produzida pela técnica de *moiré*.

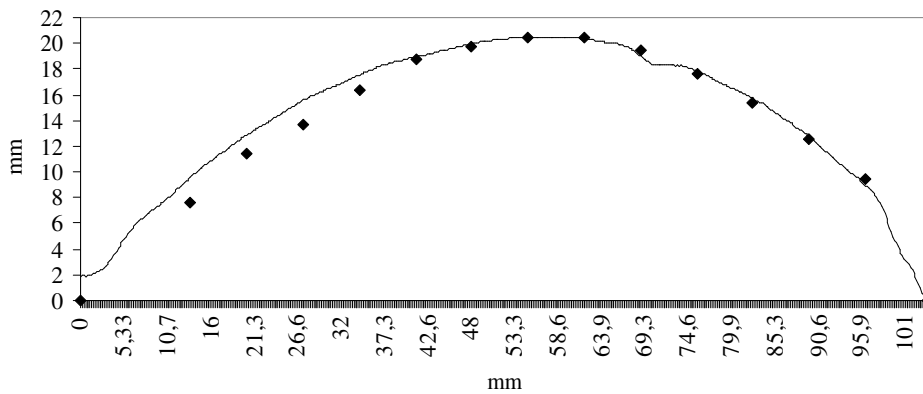


Figura 9 – Perfil do mouse depois da correção: ( f & ) pontos medidos pelo paquímetro, e ( linha contínua ) perfil produzido pela técnica de *moiré*.

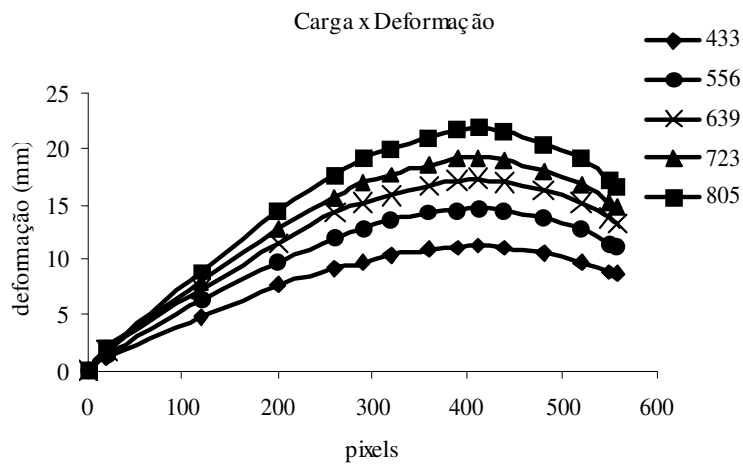


Figura 10 – Perfil da lâmina corrigido frente a diferentes carregamentos em gramas.

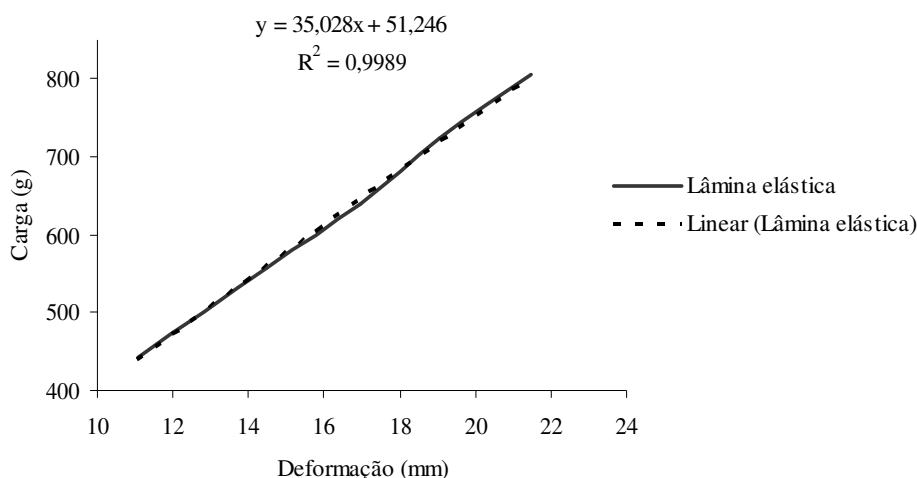


Figura 11 – Curva de carga *versus* deformação da lâmina.

### CONCLUSÕES

Os resultados conseguidos com os experimentos mostraram que a metodologia de determinação do coeficiente de correção para a técnica de *moiré* a ser aplicada nos softwares utilizados, eficiente, sendo capaz de copiar as deformações e superfícies na faixa de centésimos de milímetros;

Quanto ao uso do programa *Idea*, a escolha das coordenadas onde passa a linha de corte para a obtenção do perfil do objeto pode aderir erros ao processo, o que depende da situação da câmera em frente ao objeto.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSUNDI, A. Novel technique in reflecton Moiré. **Experimental Mechanics**, London, v. 34, n. 5, p. 230-242, Sept. 1994.

ASSUNDI, A.; YUNG, K. H. Logical *Moiré* and its application. **Experimental Mechanics**, London, v. 31, n. 3, p. 236-242, Sept. 1991.

CLOUD, G. **Optical methods of engineering analysis**. Cambridge: Cambridge University, 1998. 517 p.

DIRKS, J. J. J.; DECRAEMER, W. F.; DIELIS, G. Phase Shift method based on object translation for full field automatic 3D surface reconstruction from *Moiré* topograms. **Applied Optics**, Washington, v. 27, n. 6, p. 1164-1169, Mar. 1988.

GASVIK, K. J. *Moiré* techniques by means of digital image processing. **Applied Optics**, Washington, v. 22, n. 23, p. 33543-3548, Sept. 1983.

LINO, A. C. L. **Técnica óptica de *Moiré* visando a aplicação no estudo de superfícies irregulares**. 2002. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

MAZZETI FILHO, V. M. **Utilização da intrefrometria de *Moiré* na caracterização de rotores de máquinas agrícolas**. 2004. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

MEADOWS, D. M.; JONHSON, W. O.; ALLEN, J. B. Generation of surface contours by *Moiré* patterns. **Applied Optics**, Washington, v. 9, n. 4, p. 942-947, Mar. 1970.

OPTICS. **Software *Idea***. Disponível em: <<http://www.Optics.tu/graz.ac.at/Idea/download>>. Acesso em: 15 jul. 2005.

ZYWANG. **Rising-Sun *Moiré* Software**. Disponível em: <[http://www.glue.umd.edu/~zywang/download\\_moire.htm](http://www.glue.umd.edu/~zywang/download_moire.htm)>. Acesso em: 6 set. 2001.