Estudo de deformação através de interferometria de *speckle-shering*

E. Rodrigues, M. Muramatsu

Instituto de Física da Universidade de São Paulo

Caixa Postal 66318 - CEP 05389-970 - São Paulo/SP - Brasil

Recebido em 7 de fevereiro, 1996

As técnicas ópticas voltadas para o estudo de microdeslocamentos e deformações constituem-se em ferramentas poderosas sob vários pontos de vista e sobretudo pelo não contato. A interferometria do padrão de *speckle* juntamente com a holografia dividem o cenário das principais técnicas usadas em metrologia óptica. Neste trabalho usamos uma técnica alternativa conhecida como interferometria de *speckle-shearing* ou shearografia. Shearografia é um método óptico à laser originalmente desenvolvido para estudos de deformação. Ao contrário da holografia que mede deslocamentos de objetos, a shearografia obtém o gradiente de deslocamento. Os objetos são iluminados por um laser de Argônio (λ = 5145 Å) e fotografados por dupla exposição. A luz espalhada pelos objetos é captada por uma câmera fotográfica de características particulares. Metade do campo da lente (objetiva) da câmera é coberto por uma cunha cuja função é fazer com que dois pontos vizinhos na superfície do objeto interfiram em um único ponto no plano imagem. Pelo fato da shearografia apresentar franjas de boa qualidade, fazemos uma comparação com a holografia e destacamos algumas vantagens que fazem desta técnica uma alternativa bastante viável nas investigações metrológicas.

Optical techniques used to study microdisplacement and deformation are powerful tools under many points of view, specially because of the non-contacting. Both, speckle pattern interferometry and holography constitute the main techniques used an optical metrology. In this work, we utilized alternative technique known either as speckle-shearing interferometry or shearography. Shearography is a laser based interferometric method, firstly developed for deformation studies. While the holography measures objects' displacements, the shearography measures the displacement gradient. The objects are iluminated by an Argon laser beam and photographed by double exposition. The scattered light is collected by a photographic camera with special characteristics. Half of the lens field (objective) is covered by a wedge in order to provide the interference of two neighbor points into a single one onto the image plane. As shearographic fringes are very well defined they are compared with the holographic technique, where some advantages of the first one, which are very useful for metrologic investigations, are presented.

Quando um objeto difuso é iluminado por luz coerente (laser, por exemplo) aparece um padrão granular característico, que denominamos de *speckle*. Este padrão é o resultado da interferência da luz espalhada da superfície aleatória do objeto. Um determinado ponto será escuro ou claro dependendo se a amplitude da luz espalhada nesse ponto tiver uma soma máxima (interferência construtiva) ou mínima (interferência destrutiva). O fato relevante desse padrão é que por ser estacionário ele é portador de informações do estado da superfície. Comparando-se esses padrões, através de correlações, dupla exposição ou mesmo análise estatística podemos investigar microdeslocamentos ou deformações de superfícies com grande precisão. Neste trabalho iremos discutir um tipo particular de interferometria óptica que possui algumas características básicas semelhantes à holografia, mas que apresenta algumas vantagens práticas adicionais. Técnicas de interferometria óptica de *speckle* aplicadas ao estudo da superfície dos objetos, geralmente produzem franjas de baixa qualidade quando comparadas com holografia, porém possibilitam uma larga faixa de trabalho.

A shearografia é um método óptico à laser que foi originalmente desenvolvido para estudos de deformação. Ao contrário da interferometria de *speckle* e da holografia que medem deslocamento de superfícies, a shearografia é sensível à derivada do deslocamento. Franjas shearográficas podem ser obtidas através de diferentes arranjos interferométricos, como por exemplo, o interferômetro básico de Michelson, usado por alguns autores[1−3], existindo, todavia, outros tipos de arranjos[4−7].

O presente artigo se baseia essencialmente numa montagem proposta por Hung[8], onde utiliza-se como dispositivo *shear* uma pequena cunha de vidro cobrindo metade da abertura de uma lente. A qualidade das franjas obtidas, para uma análise qualitativa, são comparáveis às técnicas holográficas, sem as restrições de estabilidade térmica e mecânica impostas pela holografia.

II. Descrição do Método

Uma fonte pontual de luz coerente ilumina o objeto a ser estudado e sua imagem é formada numa câmera fotográfica, a qual difere de uma câmera comum pelo fato da objetiva ter metade de seu campo coberto por uma cunha de vidro com ângulo muito pequeno . Esta câmera recebe a denominação de câmera shearográfica (fig. 1).

Pelo fato da lente da câmera shearográfica ter metade de seu campo visual coberto pela cunha, os raios que passam por esta metade são desviados, e no plano imagem formarão uma segunda imagem do objeto sobreposta à primeira e deslocada lateralmente de acordo com o posicionamento da cunha. Esta superposição de imagens faz com que a luz espalhada por um ponto da superfície do objeto interfira com aquela espalhada por um ponto vizinho (fig. 1). Quando é feita uma dupla exposição fotográfica com o objeto sendo deformado entre as exposições, ocorrerá um deslocamento relativo entre esses dois pontos. Consequentemente, haverá uma mudança de fase relativa entre os raios de luz espalhados por esses dois pontos.

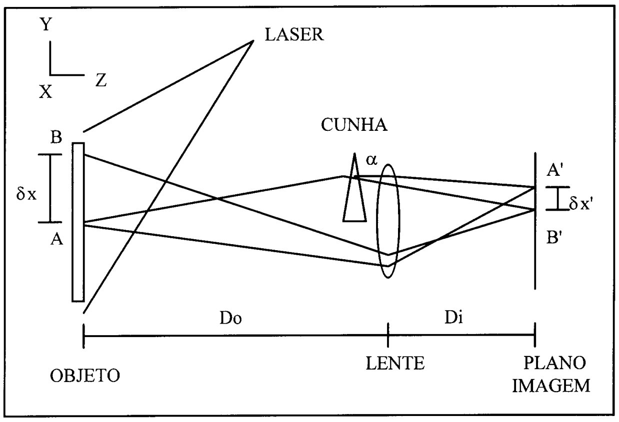


Figura 1: Formação da imagem na câmera de imagem *shearing*.

No filme fotográfico que está posicionado no plano imagem, teremos um padrão de franjas que representa a derivada do deslocamento do objeto, porém, estas só poderão ser vistas depois de um processo de filtragem de Fourier passa-alta que discutiremos no ítem V.

Pela figura 1 podemos observar que os raios de luz vindos de um ponto A da superfície do objeto formam uma imagem A' no plano imagem da lente. Com a cunha cobrindo metade do campo desta lente e estando seu ângulo no plano xz, a imagem A' do ponto A será desviada na direção x e coincidirá com a imagem B' de um ponto B vizinho de A no plano objeto.

Se assumirmos que a cunha é colocada muito próxima da lente, o módulo do deslocamento entre as imagens $\delta x'$ (*shear*) no plano imagem será:

$$\delta x' = D_i \cdot (\mu - 1) \cdot \alpha \tag{1}$$

onde D_i é a distância imagem da lente, μ é o índice de refração da cunha, e α o ângulo da cunha. O deslocamento equivalente δx sobre o objeto é dado por:

$$\delta x = \frac{\delta x'}{M} \tag{2}$$

onde M é o aumento do sistema.

III. Formação e Interpretação das Franjas

A amplitude a da luz de dois pontos vizinhos $P(x,y)$ e $P(x+\delta x, y)$ na superfície do objeto pode ser assumida constante. As frentes de onda das duas imagens sobrepostas e deslocadas lateralmente podem ser representadas por:

$$U(x,y) = a \cdot \exp[i(\theta(x,y))] \tag{3}$$

$$U(x+\delta x,y) = a \cdot \exp[i(\theta(x+\delta x,y))] \tag{4}$$

onde $\theta(x,y)$ e $\theta(x+\delta x,y)$ são os ângulos de fase dos pontos $P(x,y)$ e $P(x+\delta x,y)$ respectivamente.

O filme fotográfico estará submetido a um campo de luz total dado por:

$$\begin{aligned} U_T &= U(x,y) + U(x+\delta x,y) \\ &= a \cdot \{\exp[\theta(x,y)] + \exp[\theta(x+\delta x,y)]\} \end{aligned} \tag{5}$$

e a intensidade detectada será:

$$I = U_T U_T^* = 2 \cdot a^2 \cdot \{1 + \cos\phi\} \tag{6}$$

onde $\phi = [\theta(x+\delta x,y) - \theta(x,y)]$.

Quando o objeto é deformado, ocorre uma mudança relativa no caminho óptico entre os dois pontos provocando, portanto, uma mudança de fase relativa entre as duas frentes de onda. A eq. (6) após a deformação torna-se,

$$I' = 2 \cdot a^2 \cdot [1 + \cos(\phi + \Delta)] \tag{7}$$

onde Δ é a mudança de fase relativa devido ao deslocamento relativo entre os dois pontos.

Quando um filme fotográfico é duplamente exposto, a intensidade total registrada será :

$$I_T = I + I' = 2 \cdot a^2 \cdot [2 + \cos\phi + \cos(\phi + \Delta)] \tag{8}$$

Como a fase ϕ varia aleatoriamente e esta variação é muito rápida, o $\cos\phi$ e $\cos(\phi+\Delta)$ são de alta frequência espacial. Portanto, o padrão de *speckle-shearing*, para o olho humano, apresenta-se com uma intensidade média constante dada por:

$$I_{\text{Médio}} = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} I_T \, d\phi = 4a^2 \tag{9}$$

Logo, nenhuma franja será visível, contudo, podemos escrever a equação (8) da seguinte forma :

$$I_T = 4 \cdot a^2 \cdot \left[1 + \cos\left(\phi + \frac{\Delta}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\Delta}{2}\right)\right] \tag{10}$$

Como antes, temos que $\cos(\phi + \Delta/2)$ é um termo de alta frequência, mas desta vez, está com a amplitude modulada por um termo de baixa frequência dado por $\cos(\Delta/2)$.

O termo de alta frequência é anulado quando $\cos(\Delta/2) = 0$, ou seja:

$$\Delta = (2N+1)\pi \qquad N = 0, 1, 2, 3, ... \tag{11}$$

A equação (10) representa um interferograma shearográfico[9], o qual possui franjas do tipo de variação de frequência. Estas franjas só serão visíveis após sofrerem um processo de filtragem espacial de Fourier, onde são retiradas as componentes de baixa frequência. Assim, o padrão de variação de fase será transformado num padrão de variação de intensidade.

A mudança de fase relativa Δ, entre dois pontos, está relacionada com a deformação da superfície do objeto.

Conforme podemos observar na fig. 2, a mudança de caminho óptico para um raio de luz que viaja da fonte de luz $S(x_s, y_s, z_s)$ até o observador (câmera) $O(x_0, y_0, z_0)$ via ponto $P(x,y,z)$ é dada por:

$$\delta\ell_1(x,y,z) = (SP + PO) \tag{12}$$

Quando o raio de luz vai de $S(x_s, y_s, z_s)$ até $O(x_0, y_0, z_0)$ via ponto $P'(x+u, y+v, z+w)$, $\delta\ell_2$ é dado por:

$$\delta\ell_2(x,y,z) = (SP' + P'O) \tag{13}$$

Portanto, após a dupla exposição teremos $\delta\ell = \delta\ell_2 - \delta\ell_1$ e pode-se demonstrar que $\delta\ell$ é da forma:

$$\delta\ell = \left(\frac{x-x_0}{R_0} + \frac{x-x_s}{R_s}\right) \cdot u + \left(\frac{y-y_0}{R_0} + \frac{y-y_s}{R_s}\right) \cdot \nu + \left(\frac{z-z_0}{R_0} + \frac{z-z_s}{R_s}\right) \cdot \omega \qquad (14)$$

onde,

$$R_0^2 = x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 \ ; \ R_s^2 = x_s^2 + y_s^2 + y_s^2 \ ; \ (u, v, w) = \text{vetor deslocamento} \ .$$

A mesma análise pode ser feita para um ponto $P(x+\delta x, y, z)$ vizinho de $P(x,y,z)$ que é deslocado para $P'(x+\delta x+u+\delta u,\ y+v+\delta v,\ z+w+\delta w)$. A mudança de caminho óptico $\delta\ell'$ devido à deformação é:

$$\delta\ell' = \left(\frac{x-x_0}{R_0} + \frac{x-x_s}{R_s}\right) \cdot (u+\delta u) + \left(\frac{y-y_0}{R_0} + \frac{y-y_s}{R_s}\right) \cdot (\nu+\delta\nu) + \left(\frac{z-z_0}{R_0} + \frac{z-z_s}{R_s}\right) \cdot (\omega+\delta\omega) \qquad (15)$$

Como a câmera de imagem *shearing* faz com que o ponto $P(x,y,z)$ interfira com o ponto vizinho $P(x+\delta x, y, z)$, a mudança de caminho óptico relativa devido à deformação entre os dois pontos é:

$$\delta\ell' - \delta\ell = \left(\frac{x-x_0}{R_0} + \frac{x-x_s}{R_s}\right) \cdot \delta u + \left(\frac{y-y_0}{R_0} + \frac{y-y_s}{R_s}\right) \cdot \delta\nu + \left(\frac{z-z_0}{R_0} + \frac{z-z_s}{R_s}\right) \cdot \delta\omega \qquad (16)$$

Portanto, a mudança de fase relativa Δ é:

$$\Delta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot (\delta\ell' - \delta\ell) = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot (A\delta u + B\delta v + C\delta w) \quad (17)$$

onde λ é o comprimento de onda de luz, $A = \left(\frac{x-x_0}{R_0} + \frac{x-x_s}{R_s}\right)$, B e C analogamente nas coordenadas y e z, respectivamente.

Pela equação (17) vemos que Δ é uma função do deslocamento relativo $(\delta u, \delta v, \delta w)$ entre os pontos $P(x,y,z)$ e $P(x+\delta x, y, z)$.

Podemos reescrever a equação (17) como:

$$\Delta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \left(A\frac{\partial u}{\partial x} + B\frac{\partial v}{\partial x} + C\frac{\partial w}{\partial x} \cdot \delta x\right) \qquad (18)$$

Portanto, vemos que Δ na equação (10) representa as derivadas de deslocamento com relação à direção x do *shearing*. A equação (18) representa o padrão de franjas no caso geral.

Entretanto, se fizermos algumas aproximações práticas na geometria do arranjo, ficaremos com expressões mais simplificadas. A fonte de luz S e a câmera O ficam, geralmente, no plano xz e a direção de observação está ao longo do eixo z e sendo θ o ângulo de iluminação, a expressão final da variação relativa de fase torna-se:

$$\Delta = -\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \left(\text{sen}\theta\frac{\partial u}{\partial x} + (1+\cos\theta)\frac{\partial w}{\partial x}\right) \cdot \delta x \qquad (19)$$

IV. Aplicação da Técnica para Medida de Deformação

A alteração na forma ou dimensões de um corpo resultante de pressões e tensões é chamada deformação (*strain*).

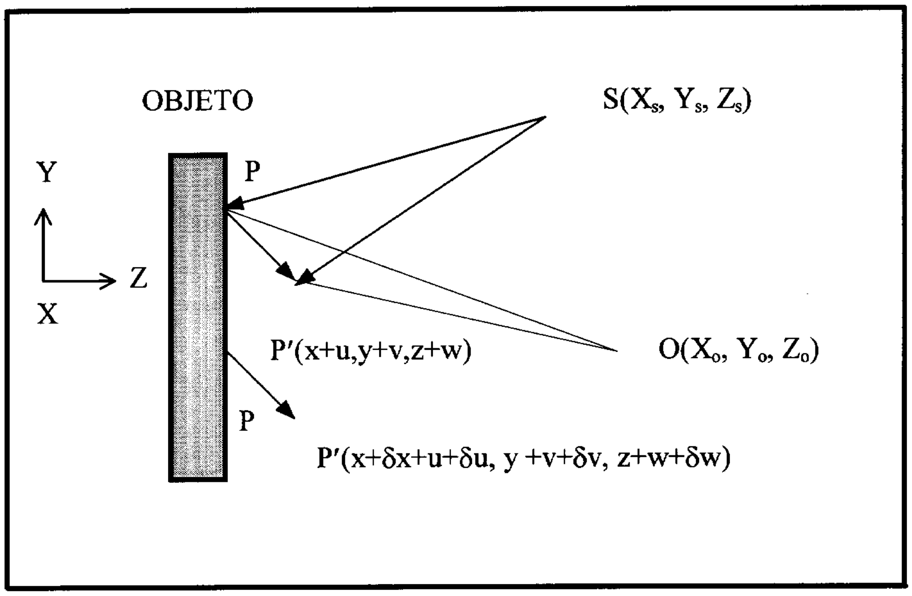


Figura 2: Diagrama esquemático mostrando a trajetória da luz indo da fonte S até o observador O.

No estudo de deflexões em placas[10−14], se usarmos iluminação normal $\theta = 0$, a equação 19 fica reduzida a:

$$\Delta = -\frac{4\pi}{\lambda} \cdot \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right) \cdot \delta x \qquad (20)$$

A fase relativa, portanto, será proporcional à primeira derivada da componente w do deslocamento em relação a x de acordo com a orientação da cunha. Como estamos analisando uma superfície bidimensional, a componente z é função de x e y, portanto, demonstra-se que a deformação fora do plano torna-se:

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial w}{\partial x} \quad , \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial w}{\partial y}$$

em concordância com a equação (20), sendo que, γ_{yz} é obtido quando o *shearing* está na direção y.

Contudo, numa placa flexionada, a deformação está relacionada à segunda derivada da deflexão da placa[15]. Como a qualidade das franjas shearográficas é muito boa, a derivação pode ser feita usando-se o efeito Moiré como na técnica de Ligtemberg[16], onde dois padrões idênticos de franjas $\partial w/\partial x$ ou $\partial w/\partial y$ são sobrepostos e deslocados um com relação ao outro. Isto é possível desde que os padrões possuam uma certa densidade de franjas que possibilite o efeito.

V. Filtragem Espacial

Utilizando a mesma montagem para diferentes objetos, após a tomada de dupla exposição e processado quimicamente o filme fotográfico, as franjas foram obtidas montando-se um sistema de transformada de Fourier indicada esquematicamente na figura 3.

O feixe laser divergente que sai do filtro espacial é colimado pela lente LC e ilumina a transparência fotográfica duplamente exposta que fica bem próxima da lente transformadora LT. A fim de bloquear as baixas frequências um *stop* circular (anteparo opaco) é colocado no plano de Fourier. As frequências que não foram retiradas pelo *stop* passarão, e a lente inversora LI formará a imagem final do objeto no plano PI.

Constatou-se experimentalmente que uma faixa vertical (perpendicular à direção do *shear*) colocada bem próxima à lente LI fez com que o contraste das franjas ficasse bem melhor. Esta faixa tem uma largura menor do que o diâmetro da lente e é posicionada de forma a ficar exposta apenas duas pequenas bordas laterais da

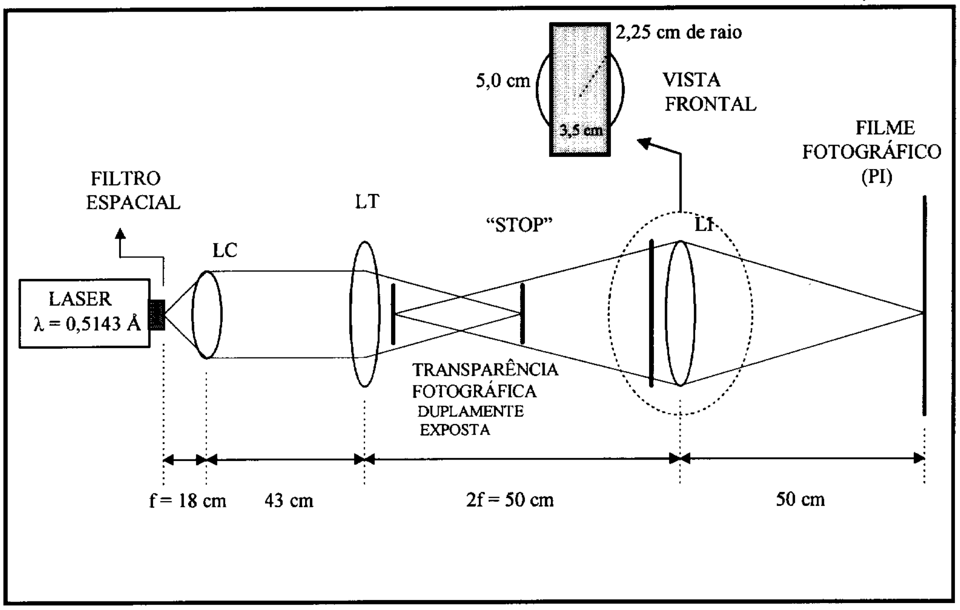


Figura 3: Arranjo esquemático da filtragem de Fourier passa-alta.

lente. As frequências que estão na direção vertical (perpendicular ao shear) não contribuem para a formação das franjas shearográficas.

VI. Experimento e Resultados

Com o objetivo de avaliarmos qualitativamente deformações em placas trabalhamos com a técnica sugerida por Hung[8,18] , a qual tem como atrativo sua simplicidade, praticidade e alta qualidade das franjas.

A fonte de luz coerente utilizada na dupla exposição fotográfica foi um laser de Argônio (λ = 5145 Å) e como meio de registro usamos um filme fotográfico de grão fino, preto e branco, 35 mm, da Fuji (Minicopy), de resolução 200 linhas/mm, e ASA-32.

A revelação do filme fotográfico foi feita com o revelador Microdol-x da Kodak a 25°C durante 5 minutos e logo após fixou-se por mais 10 minutos.

Como dispositivo *shear*, construímos uma cunha d'água justapondo duas lâminas de microscópio e fixando-as com cola de silicone. A abertura angular da cunha d'água é de 5°. Este valor foi apenas estimado, pois na construção da cunha não foi possível controlar precisamente esta abertura. As exposições fotográficas foram feitas usando-se dois tamanhos médios D_s de grãos de *speckle*: 14μm e 26μm.

VIa. Deformações em Placa de Metal

Foi usado como objeto uma placa circular (diâmetro 8cm) com 0,36 mm de espessura da liga metálica flandres (92% Sn e 8% Zn). Para melhorar a difusão da luz laser a placa foi pintada com tinta esmalte branca (figura 4).

A placa foi colocada num suporte de alumínio, e fixada em base apropriada e presa em suas extremidades através de um anel rosqueado num chassi, proporcionando, assim, uma adesão uniforme nas extremidades. Atrás da placa adaptamos um parafuso micrométrico (menor divisão = 10 μm) colocado perpendicularmente em relação à placa a fim de provocar uma deformação fora do plano.

Foram feitos 2 conjuntos de exposições de acordo com a tabela I e os resultados obtidos estão nas figuras 5 e 6.

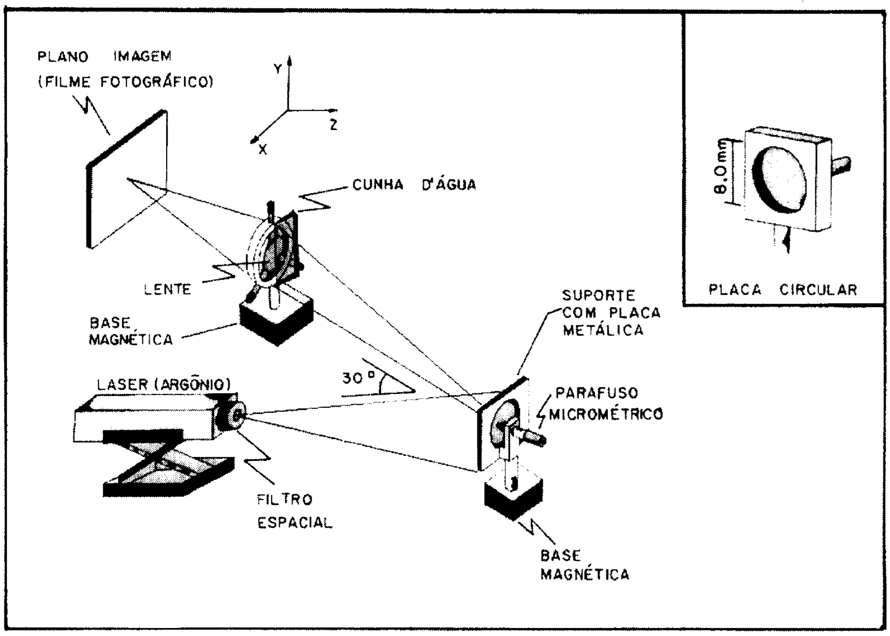


Figura 4: Montagem para o estudo de deflexões em placa de metal.

Ângulo da Cunha	AN (Abertura Numérica)	D_s (Diâmetro do *speckle* em μm)	δx' (cm)	δx (cm)	Referência
5°	12,5	26	0,2	0,3	figura 6
5°	6,7	14	0,8	1,1	figura 5

TABELA I: Dados referentes à exposição da placa metálica.

VIb. Deformação em peça de borracha

No estudo da placa metálica fizemos uma compressão fora do plano obtendo uma deformação também fora do plano. Desta vez, vamos comprimir diametralmente (direção y) duas peças de borracha (disco e anel). A princípio, a compressão diametral causa uma deformação no plano, porém, pelo fato das peças serem de borracha e pelo tipo de montagem usada, uma deformação fora do plano será mais pronunciada. Contudo, como estamos usando apenas um ângulo de iluminação, na filtragem campo todo (filtragem de Fourier passa-alta) será visível apenas as franjas que representam o gradiente de deslocamento fora do plano.

Na figura 7 podemos observar que as peças de borracha foram comprimidas com a ajuda de um macaco hidráulico adaptado numa estrutura de ferro de tal maneira que com a subida do pistão executa-se a compressão. Sobre o pistão, existe um pequeno pino alinhado com outro que se localiza imediatamente acima deste na estrutura de ferro. Foi utilizado um relógio comparador para medir o deslocamento do pistão.

As características de cada peça de borracha e as medidas usadas na exposição estão na tabela II. Nas figuras 8 e 9 podemos ver os respectivos objetos com as franjas sobrepostas.

VIc. Medida de Temperatura Através da variação do Índice de Refração

Utilizando a mesma montagem experimental da figura 4, substituímos a placa metálica por uma chama de vela. Um feixe laser divergente incide sobre a chama da vela e a luz refletida forma a imagem no plano do filme. Numa distância de 7 cm do centro da chama colocou-se um difusor (vidro despolido) para que houvesse a produção de *speckle*.

A dupla exposição shearográfica foi feita primeiro com a chama acesa e depois com ela apagada. Fazendo uma analogia com o estudo de deflexões em placas, podemos dizer que a chama corresponde à deformação e a ausência dela ao estado normal da placa.

Na figura 10, vemos o perfil do gradiente do índice de refração causado pela chama da vela. A partir desse padrão podem ser realizadas medidas quantitativas para avaliar a temperatura analisando a variação do número de franjas com a variação da distância radial (origem no centro da chama). Estamos trabalhando na proposta de um modelo para relacionar a distribuição de franjas com a variação da temperatura.

VII. Discussão e Conclusão

Tanto a holografia como a shearografia são técnicas que possuem a vantagem de serem de campo todo e não haver contato com o objeto em estudo. A shearografia constitui-se, todavia, num método alternativo à holografia com algumas vantagens que podem ser resumidas a seguir:

1. Requer um arranjo óptico simples eliminando, assim, o problema de alinhamento.

2. O comprimento de coerência exigido é baixo, dispensando o uso obrigatório de lasers operando em modo único.

3. Proporciona uma larga e controlável faixa de sensibilidade, fazendo com que grandes deformações sejam medidas.

4. A resolução do meio de registro é baixa, sendo, portanto, de baixo custo e mais rápida.

5. É pouco exigente quanto à isolação de vibração sendo, portanto, apropriada à ambiente de produção.

6. Mede o gradiente de deslocamento ao invés de deslocamento e possibilita a inspeção de grandes objetos.

As séries de fotos da placa circular foram escolhidas entre dezenas de ensaios e quando comparamos a figura 5 com a figura 6 vemos que o desenho das franjas não são os mesmos para a mesma quantia de deslocamento. Isto ocorre pelo fato de que entre uma série e outra a placa mudou sua forma devido às várias deformações sofridas. Ambas as séries foram feitas com a cunha de 5º e tamanho médio de grão de *speckle* de 14 μm e 26 μm respectivamente. Comparando-se as duas séries vemos que o número de franjas para o mesmo deslocamento é aproximadamente igual e para a figura 6 nas regiões onde as franjas são mais finas, o contraste é mais evidente. Estas duas séries apresentam aproximadamente o mesmo limite de deslocamento, ou seja, os padrões mantêm-se ainda correlacionados para um deslocamento menor que 50 μm.

Quando se mantém a mesma cunha e varia-se o tamanho do grão de *speckle* de 14 μm para 26 μm não observamos mudanças significativas no número de franjas e nem na sensibilidade da técnica. Se usarmos como parâmetro de comparação o tamanho do grão de *speckle*, vemos que para 14 μm o deslocamento máximo (50 μm) foi aproximadamente 3,6 vezes, enquanto que para o grão de 26 mm esse deslocamento máximo (50 μm) é de aproximadamente 1,9 vezes. Isso, provavelmente se deve ao fato de que não é suficiente dobrar o tamanho do grão. A variação do grão deve ser maior para que o efeito possa ser mais pronunciado. Portanto a escolha do tamanho do grão é função do meio de registro (filme) e da precisão necessária no experimento. Quanto menor o diâmetro do grão, menor é o intervalo de medição e maior é a sensibilidade do sistema.

Com relação às peças de borracha, a inspeção shearográfica permite saber, por exemplo, se o material usado na fabricação deforma de maneira homogênea.

A respeito do ângulo da cunha, podemos dizer que ele deve ser pequeno, pois quanto maior o ângulo, menos sobrepostas estarão as imagens e consequentemente uma parte menor estará sujeita à interferência. Como vemos, os principais parâmetros que determinam a sensibilidade da técnica são o ângulo da cunha e o tamanho do grão de *speckle*.

A cunha d'água usada como dispositivo *shear* não possui boa qualidade óptica, pois as lâminas de vidro são fixadas com cola de silicone e quando a luz passa através da estrutura da cola produz *speckles* que interferem com aqueles gerados pela superfície do objeto. Isto se reflete na qualidade das franjas obtidas, pois na ausência deste fato, teriam definição e contraste bem melhores. Mesmo assim, podemos observar que as franjas obtidas são comparáveis à franjas holográficas. Franjas shearográficas são linhas que correspondem ao lugar geométrico onde o gradiente de deslocamento é constante, ou seja, na equação (20), $\partial w/\partial x$ = constante. Numa placa flexionada, a curvatura e as componentes de strain estão diretamente relacionadas com a segunda derivada do deslocamente ($\partial^2 w/\partial x^2$). Portanto, a primeira derivada do deslocamento representa a inclinação e a segunda derivada representa a curvatura da placa flexionada.

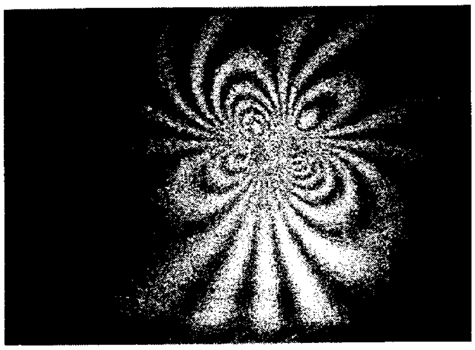
A shearografia é um método óptico a laser que tem como principal vantagem a obtenção direta da derivada do deslocamento. A utilização quantitativa do método exige para cada tipo de investigação leis físicas específicas, o que pode torná-lo complicado e trabalhoso, porém, qualitativamente é uma ferramenta eficiente e de grande utilidade.

Agradecimento

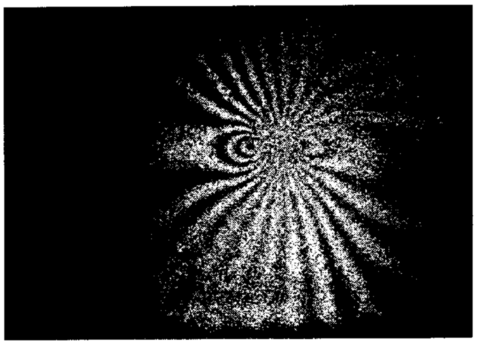
Um dos autores (E.R.) agradece ao CNPq pelo apoio financeiro na realização desse trabalho.

References

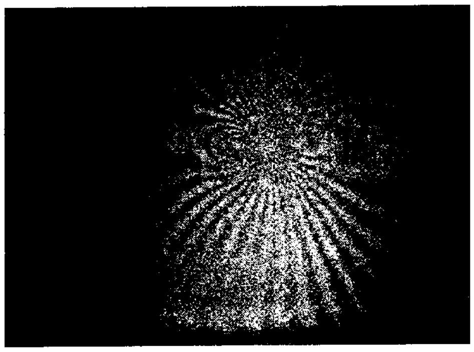
1. F. S. Chau, T. W. Ng Meas. Sci. Technol. *3*, 381 (1992).
2. Y. Y. Hung, Optics Communications, vol. **11**, 132 (1974).
3. J. A. Leendertz, J. N. Butters Journal of Physics E: Scientific Instruments v. **6**, 1107 (1973).
4. Y. Y. Hung, I. M. Daniel, R. E. Rowlands, Experimental Mechanics, vol. **18**(2), 56 (1978).
5. Y. Y. Hung, R. E. Rowlands, and I. M. Daniel, Applied Optics, vol. **14** 618 (1975).
6. R. Krishna Murthy, R. S. Sirohi, M. P. Kothiyal, Applied Optics, vol.**21**, 2865 (1982).
7. A. Rosenberg, J. Politch, Optics Communications; vol. **26**, 301 (1978).
8. Y. Y. Hung, Optical Engineering, vol. **21**, 391 (1982).
9. T. W. NG, F. S. Chau, Journal of Modern Optics , vol. **39**, 2463 (1992).
10. M. Pierre Boone, Experimental Mechanics vol. **15**(8), 295 (1975).
11. Shigeyoshi Hisada; Shinji Ueda, Sumio Nakahara, Takeyoshi Fujita, Kiyoshi Sugihara, Technol. Rep. Kansai Univ. (Japan); n **24**, 27 (1983).
12. K. V. S. GNaneswara Rao, D. V. Krishna Rao, Optica Acta , vol. **28**, 1009 (1981).
13. J. Politch, Optics Lasers in Engineering, vol.**6**, 55 (1985).
14. C. J. Tay, H. M. Shang, A. N. Poo, M. Luo, Optics and Laser Technology, vol. **24**, 209 (1992).
15. Landau and Lifshitz, *Theory of Elasticity; Course of theoretical physics,* vol. 7, Pergamon Press , 1986.
16. F. K. Ligtenberg, The Moiré method; a new experimental method for the determination of moments in small slab models; Society's Proceedings, vol **XII**, 83 (1954).
17. Y. Y. Hung, C. Y. Liang, Applied Optics, vol. **18**, 1046 (1979).



A : Deslocamento 5 μm.



B : Deslocamento 15 μm.

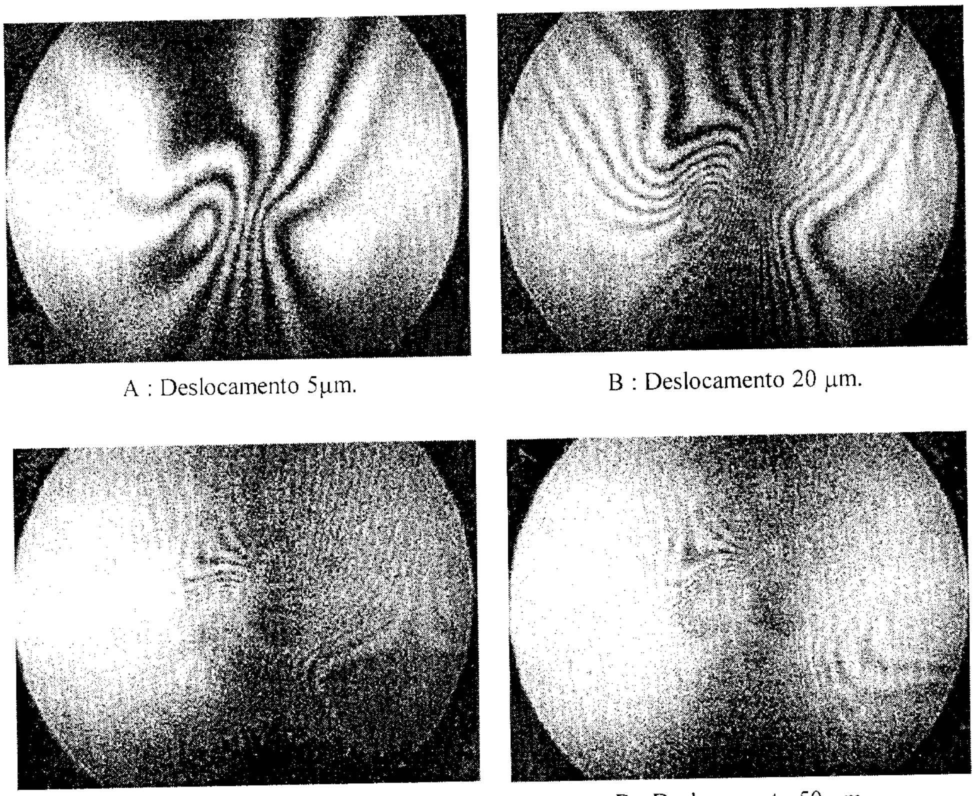


C : Deslocamento 25 μm.

D : Deslocamento 35 μm.

E : Deslocamento 45 μm.

Figura 5: Padrão de franjas de fotografia de *speckle-shearing*, com a cunha de 5°, e tamanho médio do grão de *speckle* $D_s = 14\mu$m para diferentes deslocamentos na direção z do parafuso micrométrico.



A : Deslocamento 5μm. B : Deslocamento 20 μm.

C : Deslocamento 40 μm. D : Deslocamento 50 μm.

Figura 6: Padrão de franjas de fotografia de *speckle-shearing*, com a cunha de 5°, e tamanho médio do grão de *speckle* $D_s = 26\mu$m para diferentes deslocamentos na direção z do parafuso micrométrico.

	Diâmetro Externo: D_e (cm)	**Diâmetro Interno: D_i (cm)**	**Espessura (cm)**	**Material**	**Ângulo da cunha**	**D_s (μm)**	**AN (abertura numérica)**	**$\delta x'$ (cm)**	**δx (cm)**	**Referência**
Anel	2,4	1,0	1,4	SBR-75	5°	14	6,7	0,8	1,1	figura 9
Disco	3,5	-	1,0	SBR-55	5°	14	6,7	0,8	1,1	figura 8

TABELA II : Dados referentes às peças de borracha: anel e disco.

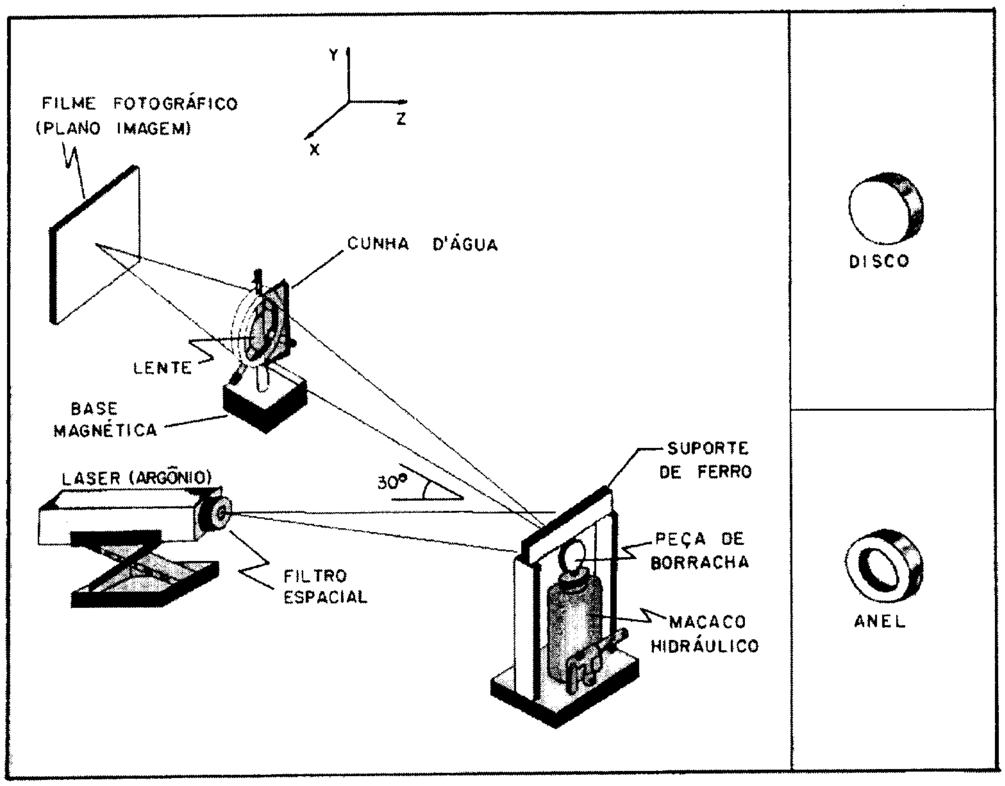
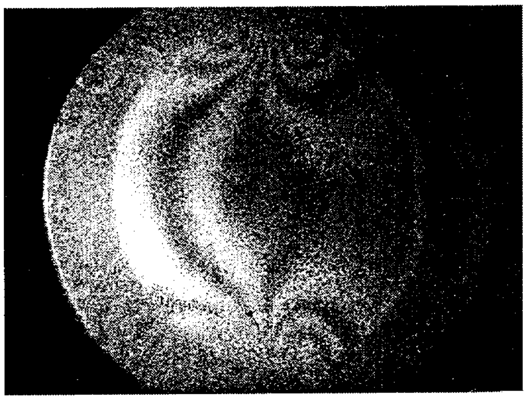
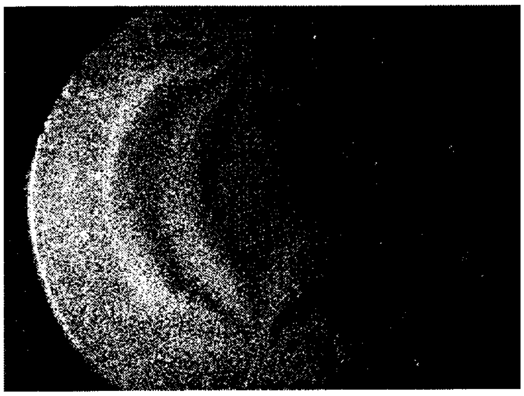


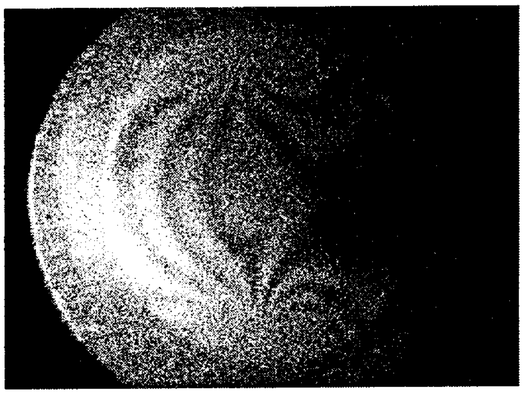
Figura 7: Montagem para estudo de compressão em peças de borracha.



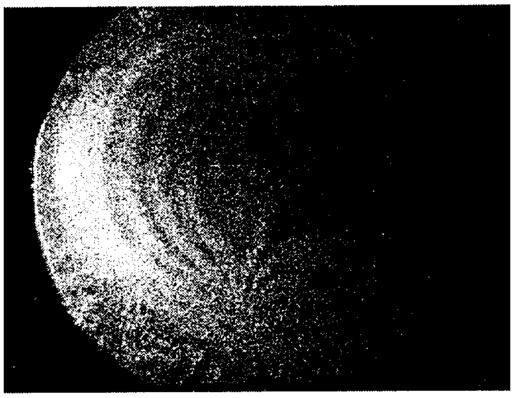
A : Compressão 5 μm.



B : Compressão 10 μm.

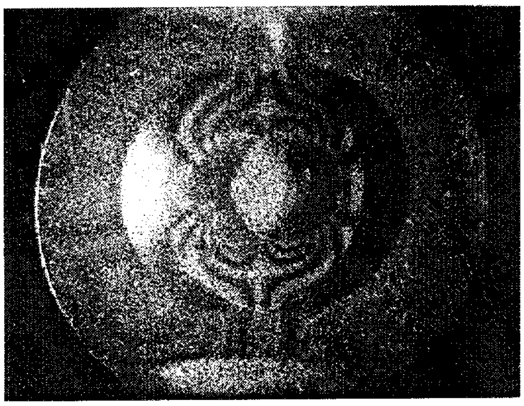


C : Compressão 15 μm.

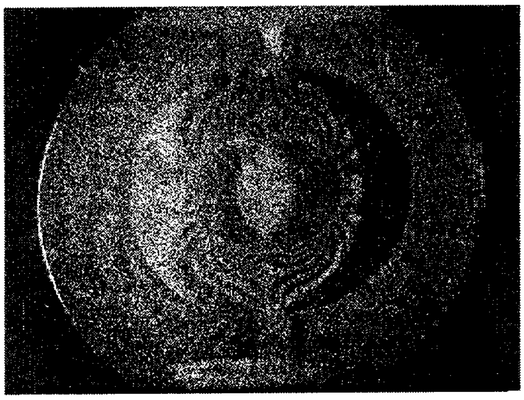


D : Compressão 25 μm.

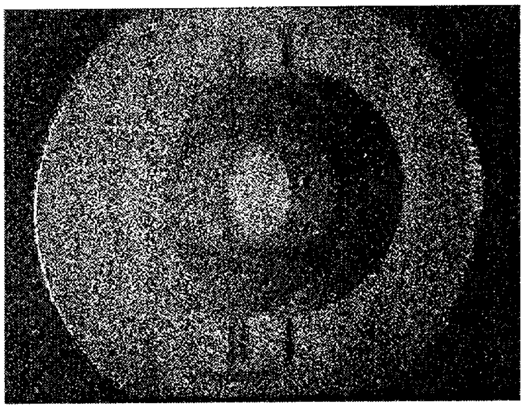
Figura 8 : Padrão de franjas de fotografia de *speckle-shearing* para diferentes compressões do disco de borracha.



A : Compressão 5 μm.

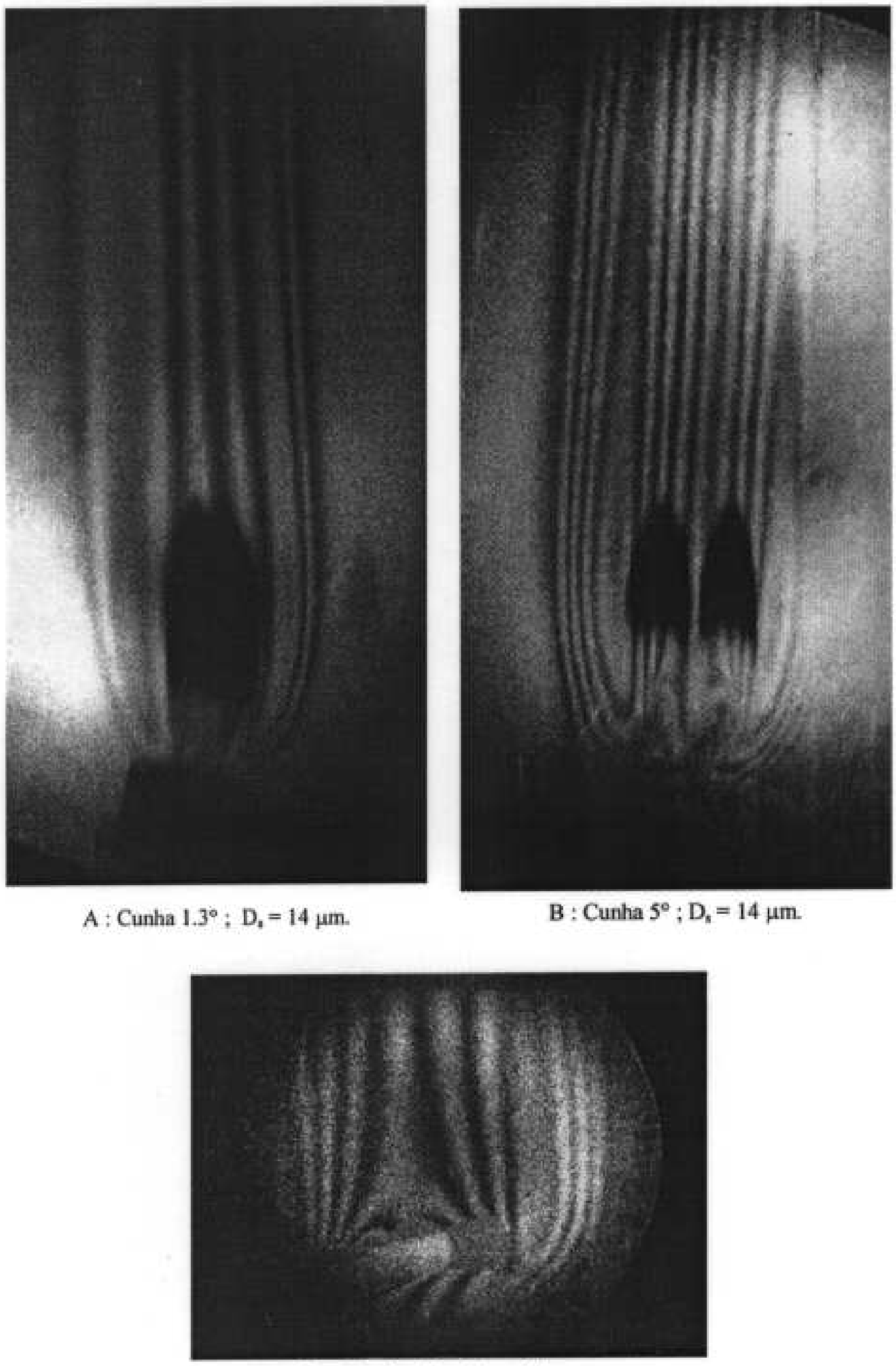


B : Compressão 10 μm.



C : Compressão 20 μm.

Figura 9: Padrão de franjas de *speckle-shearing* para diferentes compressões do anel de borracha.



A : Cunha 1.3° ; D_s = 14 μm.

B : Cunha 5° ; D_s = 14 μm.

C : Cunha 5° ; D_s = 14 μm.

Figura 10: Padrão de franjas de fotografia de *speckle-shearing* mostrando a variação da temperatura na chama de uma vela (A,B) e fósforo (C). A foto (A) foi obtida com uma cunha d'água de ângulo $\simeq 1,3°$.