

# INTERFEROMETRIA *SPECKLE* PARA ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS.

## DESENVOLVIMENTO DE PROGRAMA E ARRANJO ÓTICO

G. P. Pires (a)  
A. A. Tagiaferri (b)  
C. Thaumaturgo (c)

### RESUMO

*A grande versatilidade da técnica de DSPI sugere sua utilização em ensaios não destrutivos como ferramenta de coleta e manipulação de dados, a partir dos quais pode-se inferir a integridade da estrutura em estudo.*

*Com este panorama, o segundo e último trabalho da série se propõe a desenvolver o uso da técnica de DSPI em aplicações de engenharia mecânica e de materiais, principalmente no que diz respeito a ensaios não destrutivos.*

*Para a realização destes objetivos são desenvolvidas duas experiências distintas e uma série de rotinas em ambiente computacional. Estas rotinas, dentre outras características, possuem um tratamento matemático que permitem a extração de informações de um conteúdo inerentemente ruidoso, que são as próprias franjas de speckle.*

*É portanto desenvolvido e analisado o uso de DSPI para medição de deslocamentos no plano e avaliação qualitativa de danos.*

---

a e c – respectivamente, Instituto Militar de Engenharia (IME), Departamento de Engenharia Mecânica e de Materiais – DE/4.

b – Instituto de Física, Universidade Estadual do Rio de Janeiro.

## INTRODUÇÃO

Para a realização do trabalho, a equipe formada pela cooperação do Laboratório de Materiais Conjugados do Departamento de Engenharia Mecânica e de Materiais do Instituto Militar de Engenharia (IME) e do Laboratório de Óptica do Instituto de Física da Universidade Estadual do Rio de Janeiro (UERJ) traçou uma linha de trabalho com objetivo de transferir para a área tecnológica um conhecimento acadêmico. Desta forma, num primeiro estágio a ênfase foi dada na assimilação dos conhecimentos teóricos concernentes ao estudo de interferometria óptica. O segundo e maior estágio foi o de realização de experimentos, o qual transcorreu paralelamente ao primeiro e ao terceiro, que foi a parte computacional, durante a qual houve a elaboração de programas para controle de equipamentos e medição automatizada.

O aparato utilizado para a realização do trabalho compreende um sistema óptico (*laser*, mesa antivibratória, lentes, picomotores etc), dispositivos de aquisição de imagem (câmera CCD e placa de captura), e um computador.

A seguir são abordados os experimentos desenvolvidos no projeto com o uso de DSPI e os resultados obtidos. No final estão expostas as conclusões do trabalho e os desenvolvimentos futuros.

## PARTE EXPERIMENTAL

Foram realizadas várias experiências ao longo do projeto no Laboratório de Óptica do Departamento de Eletrônica Quântica do Instituto de Física da UERJ (Figura 1). Dentre as várias configurações usadas, duas mereceram destaque por serem as que efetivamente conduziam a um estudo conclusivo a respeito de: deslocamentos no plano, no primeiro caso, e determinação qualitativa de danos em vigas engastadas, no segundo.



Figura 1: Vista da Mesa de Trabalho do Laboratório de Óptica

## Arranjo Experimental

### *Sistema ótico*

O sistema é composto dos seguintes elementos (parte da Figura 1):

- 1 Mesa anti-vibratória (NEWPORT);
- 1 *laser* de He-Ne. Potência: 50mW;
- 1 Prisma de 90°;
- 1 Divisor de feixes;
- 1 Expansor (2 para a segunda série de experimentos);
- 1 Espelho (2 para a segunda série de experimentos);
- 1 Mesa micrométrica com dois parafusos micrométricos de 0,01mm (ou 10mm) de precisão.

### *Sistema de Aquisição e Manipulação de Imagens*

O sistema é composto dos seguintes elementos:

- Câmera: CCD monocromático, resolução de 480x512 (COHU);
- Placa de Aquisição de Imagens: 8 bits de largura de palavra (IMAGING)
- Computador: IBM-PC, AT 486;
- Ambiente de Processamento: MATLAB®.

### *Configuração*

A configuração adotada foi a de feixe único divergente (Figura 2). O deslocamento aplicado na superfície foi ao longo de uma direção horizontal perpendicular à direção de observação.

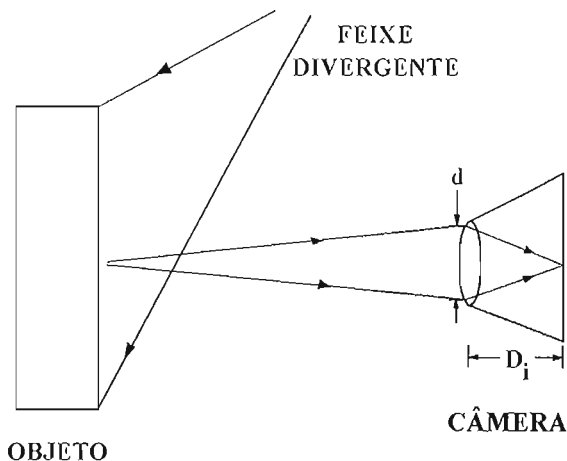


Figura 2: Configuração adotada no experimento de medição de deslocamento no plano

A segunda configuração adotada foi de duplo feixe com ângulos simétricos em relação à direção de observação (Figura 3).

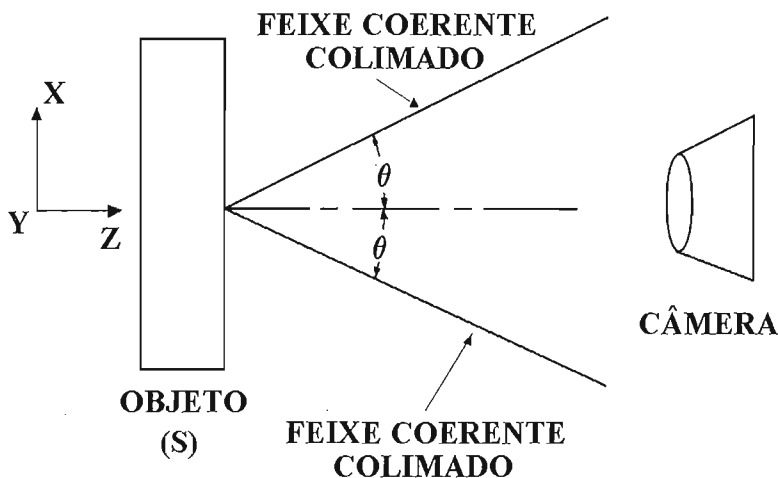


Figura 3: Configuração adotada para o experimento com as vigas

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Medição de Deslocamentos no Plano

Para a realização deste experimento foram medidas 20 posições ocupadas por uma superfície acoplada a uma mesa micrométrica. O objetivo da experiência é determinar uma curva de calibração que relacione o deslocamento aplicado à superfície com a distância entre as franjas observadas após a aplicação da Transformada de Fourier sobre a soma das imagens não deslocada (de referência) e deslocada.

O experimento nada mais é do que a técnica de fotografia de *speckle* duplamente exposta (método do feixe único), comentada anteriormente, porém aplicada com os aparatos característicos de DSPI. A dupla exposição é substituída por uma simples operação de soma entre as duas imagens distintas; a técnica de visualização das franjas deixa de ser com o arranjo de lentes tradicional para ser com a aplicação da Transformada de Fourier.

Conforme exposto anteriormente, para a realização deste experimento, foram gravadas as figuras de *speckle* da superfície em 20 posições distintas. Tomando-se a primeira posição como referência, deslocou-se de 5 em 5 centésimos de mm, a partir de 10 (a posição em 5

não foi medida) até 100 centésimos de mm. Estas imagens foram gravadas com o prefixo “s”, seguido do valor de deslocamento (em centésimos de mm) aplicado.

A idéia inicial do experimento era ver se a técnica funcionava também de forma digital. O ambiente escolhido para o desenvolvimento foi o MATLAB® (MATrix LABoratory), uma vez que este ambiente é otimizado para o cálculo de matrizes e a imagem (no formato tif) nada mais é do que uma matriz de pixels cujo tamanho é dado pela resolução da imagem (480x512). Assim, obteve-se as imagens: s0.tif, s10.tif, s15.tif, s20.tif, s25.tif,..., s95.tif, s100.tif (vide exemplo da Figura 3).

Uma vez adquiridas as imagens, o primeiro passo necessário era simular a dupla exposição através da soma algébrica entre as duas imagens desejadas. Em seguida, simulou-se as técnicas de visualização através da transformada de Fourier. Após alguns ajustes na intensidade da imagem resultante, foi possível observar as franjas. A implementação computacional foi bem sucedida, e a distância visual entre as franjas, aparentemente, seguia a relação inversa com o deslocamento prevista teoricamente.

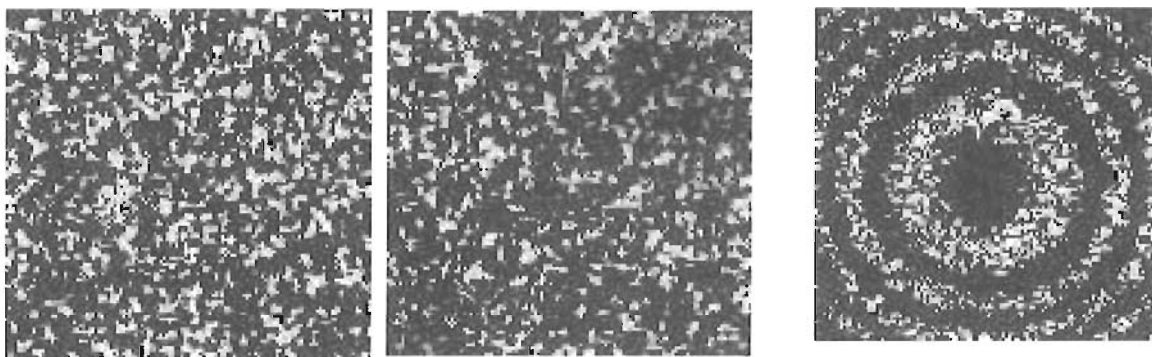


Figura 4: *Speckle* de objeto não deformado, deformado e superposição dos dois *Speckle*

Com o sucesso da técnica, o passo seguinte foi tentar levantar uma curva de calibração que relacionasse a distância entre as franjas com o deslocamento. Entretanto, não havia uma forma de medir a distância entre as franjas de uma maneira precisa, pois a qualidade das franjas era muito ruim. A tentativa de observar o perfil das franjas também não era eficaz, pois o ruído inerente ao *speckle* tornava-o muito serrilhado. Assim, era necessário proceder a um tratamento de imagens, de forma a melhorar a qualidade (ou suavidade) das franjas.

Sabendo que a transformada de Fourier passa do domínio do espaço para a frequência espacial, e que as franjas possuem uma frequência espacial característica (uma vez que estão regularmente espaçadas), teve-se a idéia de tentar melhorar a qualidade das franjas a partir da filtragem de frequências, deixando passar apenas a característica das franjas. Para tal, faz-se necessário aplicar uma segunda vez a transformada de Fourier sobre a imagem somada. Desta forma temos até então o seguinte fluxograma:

(Imagem não deslocada + Imagem deslocada)  $\Rightarrow$  1ª TF  $\Rightarrow$  2ª TF

Usando a representação de função composta, temos TF(TF(soma)). Assim, é possível observar dois picos simétricos em relação ao centro, relativos à frequência espacial das franjas. Ocorre que o máximo central das baixas frequências é muito mais intenso, e este fato inibe o uso da procura dos máximos para identificar automaticamente a frequência de interesse. Para contornar este problema, basta subtrair desta imagem (2ª TF da soma) uma imagem que só tenha as baixas frequências. Esta imagem é justamente a 2ª TF da soma da imagem não deslocada com ela mesma. Procedendo desta forma, a imagem resultante da diferença apresenta os dois picos de interesse positivos, e as baixas frequências negativas. Agora é possível aplicar a identificação automática dos picos baseados nos máximos. Temos, então, a seguinte representação por funções compostas: Diferença(TF(TF(Soma))).

Uma vez identificadas as frequências de interesse, dois possíveis caminhos para a solução são vislumbrados. O primeiro, que se subdivide em dois, consiste em, a partir da frequência de interesse, determinar diretamente o deslocamento aplicado teoricamente ou usá-la para levantar a curva de calibração.

O segundo caminho consiste em zerar as regiões externas aos picos, ou seja, zerar as frequências maiores que a de interesse, e, em seguida, aplicar a transformada inversa de Fourier para obter a imagem filtrada das franjas. Há ainda um terceiro caminho que consiste em zerar todas as frequências a menos da frequência de interesse e aplicar a transformada inversa de Fourier. Vamos comentar cada caso:

- Para o primeiro caminho, o programa foi terminado. O cálculo teórico envolve conhecimentos de abertura e distância focal da lente, frequências espaciais segundo a representação de Fourier. O outro procedimento simplesmente estabelece uma relação biunívoca entre a frequência e o deslocamento.
- Para o segundo e terceiro caminhos é necessário calcular a distância entre as franjas. Para tal é necessário construir um algoritmo que enxergue estes pontos extremos do perfil das franjas, para entendê-los como os “centros” da franja. Para que este algoritmo funcione, é necessário que a filtragem tenha sido feita de tal maneira que após a aplicação da transformada inversa de Fourier, o perfil das franjas seja não serrilhado, pois o algoritmo se baseia na detecção de máximos e mínimos relativos, ou seja, ele analisa os dois pontos vizinhos e se ambos são maiores ou menores do que ele, então ele é um ponto de mínimo ou máximo, respectivamente.

Assim, foram desenvolvidos os programas para calibração baseados nestes três caminhos. Uma vez levantadas as curvas de calibração, pode-se realizar a medição baseada na curva obtida. Vale destacar que para a obtenção da curva é necessário aplicar o método dos mínimos quadrados para sua otimização. Entretanto as curvas esperadas (para o 2º e 3º casos) comportam-se como hipérbolas, às quais não se pode aplicar diretamente o método. Para resolver

este inconveniente, basta aplicar o método sobre o inverso da função (uma reta) e, em seguida, reinverter para obter a função na forma de hipérbole (RUGGIERO e LOPES, 1996).

Houve um estudo para avaliar a influência da tolerância em torno do raio de filtragem, na qualidade dos perfis, após a aplicação da transformada inversa de Fourier. Os resultados estão expressos sob a forma de perfis na Figura 5.

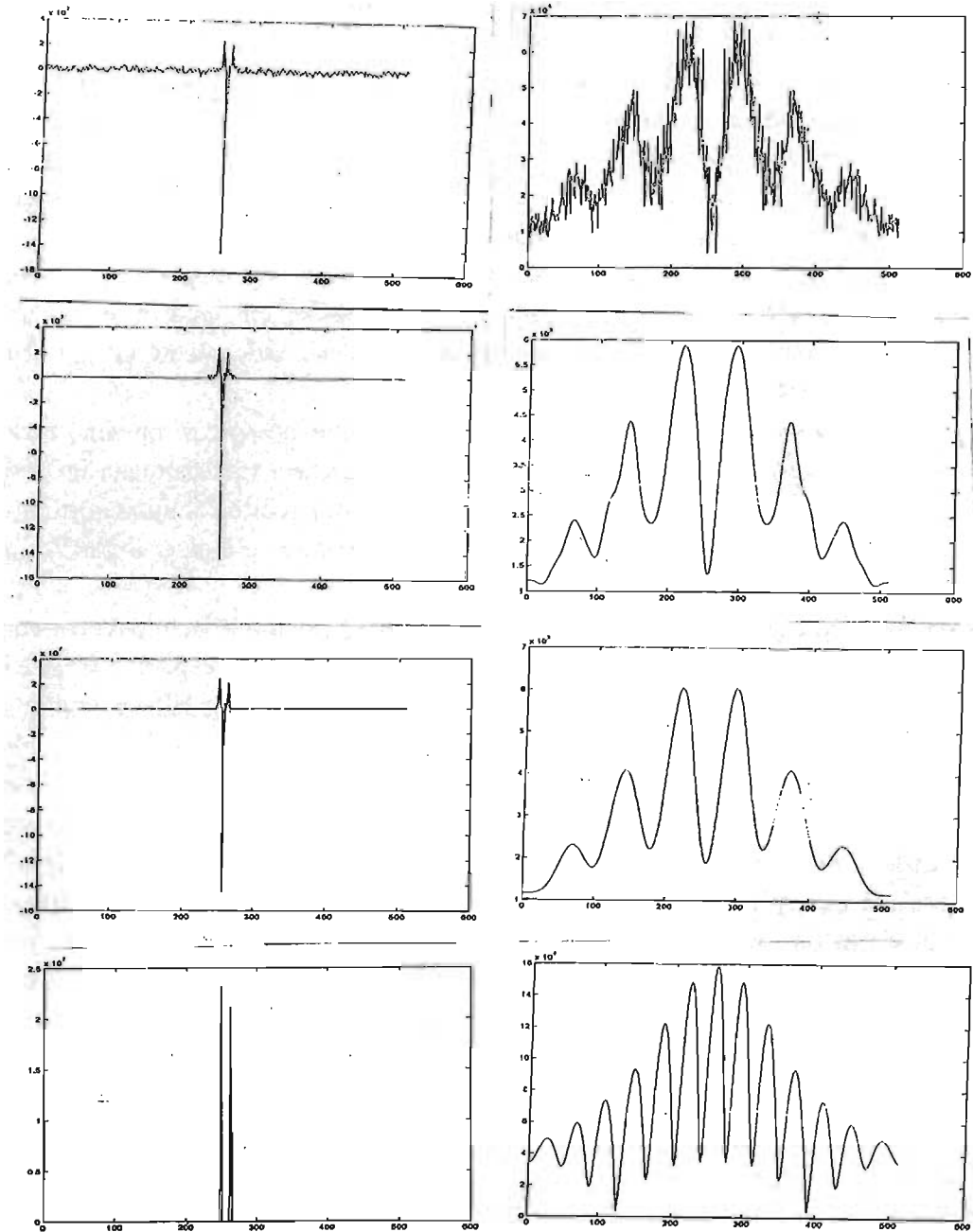


Figura 5: Efeito do raio de filtragem no perfil das franjas

Constata-se que quanto menor a tolerância, mais próxima da família das senóides fica a curva, o que é lógico, uma vez que a definição da frequência fica mais precisa.

A curva de calibração levantada, a partir dos perfis mostrados na Figura 6 obtido com 20 imagens com tratamento estatístico, é apresentada na Figura 7.

Perfis gerados nas 20 posições para levantamento da curva de calibração de idjff

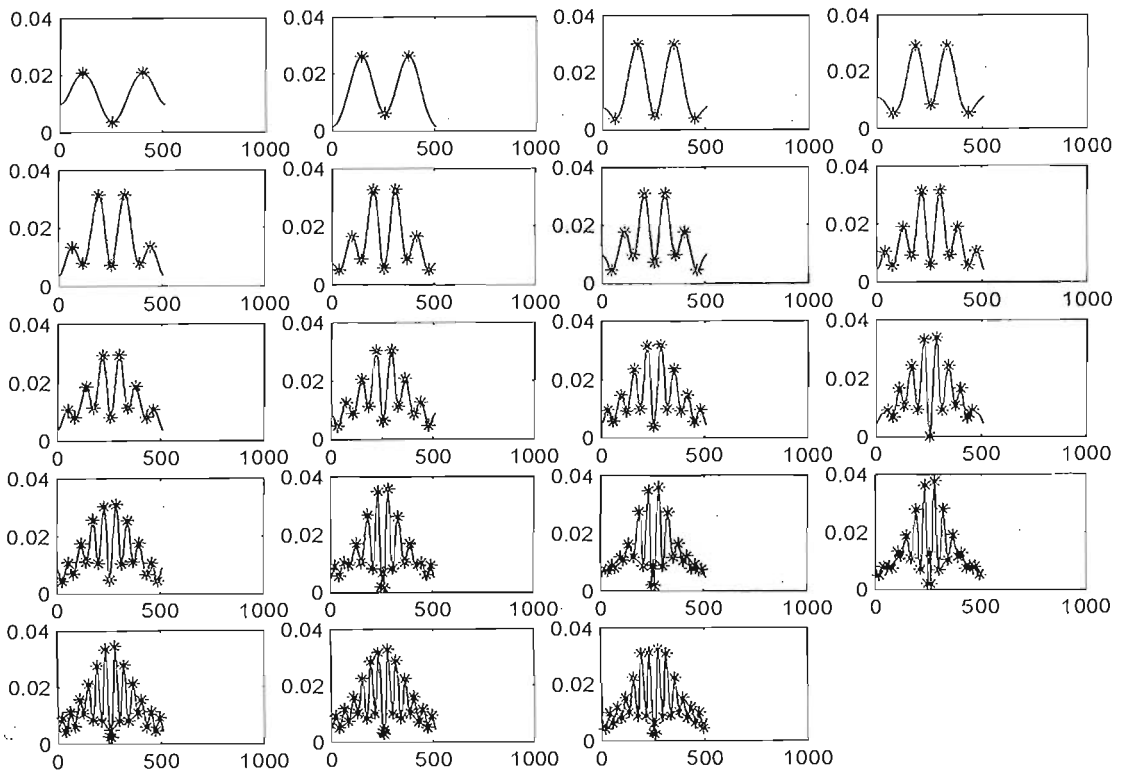


Figura 6: Variação da distância entre as franjas em função do deslocamento



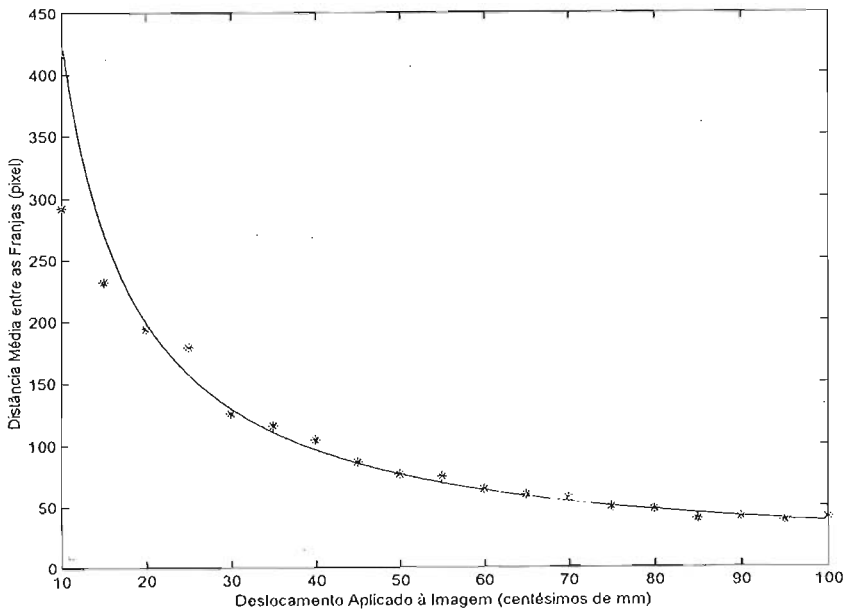


Figura 7: Curva de calibração da distância entre franjas e o deslocamento

Inicialmente verificou-se a diferença entre os caminhos 2 e 3 e suas variantes através do programa INICIAR. Este operou sobre as imagens s0.tif, s10.tif, s50.tif e s100.tif.

Nota-se que a rotina *ijffsoma\**, a qual não realiza a diferença com a 2ª TF da imagem não deslocada (para realçar os picos de interesse), apresenta um perfil do qual não se pode extrair informações confiáveis. Vê-se, portanto, que não é suficiente selecionar a região de interesse de frequência (pois esta rotina usa janela de filtragem), é necessário zerar ou tornar negativas as baixas frequências.

- Nota-se ainda a inversão de fase entre o caminho 2 (*ijdfssoma\**) e o caminho 3 (*ijpdfssoma\**). O caminho 3 apresenta-se bastante regular, com um espaçamento entre as franjas menor do que em 2 (para o mesmo deslocamento), o que faz dele (3) um algoritmo mais recomendado para pequenas deformações, ou seja, de maior sensibilidade.

Houve um estudo para avaliar a influência da tolerância em torno do raio de filtragem na qualidade dos perfis após a aplicação da transformada inversa de Fourier. Os resultados estão expressos sob a forma de perfis.

- Constata-se que quanto menor a tolerância, mais próxima da família das senóides fica a curva, o que é lógico, uma vez que a definição da frequência fica mais precisa.

As curvas de calibração levantadas foram para o 1º caminho com dez imagens (pontos), e 2º caminho (reta e hipérbole) com 10 e 20 imagens (sem e com tratamento estatístico).

- Para o 1º caminho observa-se que as frequências variam muito pouco para uma variação máxima de 100 centésimos de milímetro, ou 1mm. Fica evidente então que, para evitar erros, este método é mais recomendado para maiores níveis de deslocamento, ou seja, é menos sensível.
- Para o 2º caminho observa-se que a curva fica melhor ajustada para 20 pontos do que com 10. Nota-se que a partir de um deslocamento de 75 centésimos de milímetro, os perfis apresentam na região central dois pontos de mínimo e um máximo quando “deveriam” apenas conter um ponto de mínimo no centro. Isso gera uma variação na distância entre os extremos. Outra fonte de variação é a assimetria do perfil em torno de um extremo qualquer, por causa do efeito da envoltória da difração. Se o cálculo fosse feito separadamente para máximos e mínimos, esse problema seria menos grave. Na verdade, o programa calculava inicialmente a distância entre os máximos e mínimos separadamente. No entanto, quando havia apenas um mínimo (nos pequenos deslocamentos), não era possível calcular as distâncias entre os mínimos. Uma alternativa para contornar esse problema seria a verificação se o número de extremos é maior ou igual a quatro (dois mínimos e dois máximos), que é a condição mínima para o uso do cálculo separadamente em mínimos e máximos. O caminho adotado para minimizar as variâncias, no entanto, foi o tratamento estatístico dos dados. Criou-se uma rotina que avalia a média e o desvio padrão da amostra. Se algum ponto estiver fora dos limites de controle (dados pela média  $\pm$  um múltiplo do desvio padrão), ele será descartado e o processo reinicia até que todos os pontos caiam sempre dentro dos limites. Desta forma, obteve-se outra curva para 20 pontos, sendo os dados tratados estatisticamente, onde observa-se uma maior aproximação da curva ajustada com os pontos.

Os resultados obtidos para as curvas ajustadas são dados pelos valores dos coeficientes da reta:  $y = ax + b$ .

Caminho 1:  $a = 1.3090909e-001$   $b = -8.0000000e-001$

Caminho 2 (10 pontos):  $a = 2.8655033e-004$   $b = -7.9846717e-004$

Caminho 2.(20 pontos c/ tratamento estatístico):  $a = 6760486e-004$   $b = -3.2570687e-004$

Vale lembrar que para o caminho 2 deve-se inverter a função, da seguinte forma:

$$1/z = y = ax + b \Rightarrow z = 1 / (ax + b).$$

Este ajuste de curva feito no caminho 2 através do inverso da função (reta) e não da função propriamente dita (hipérbole) é a forma que se tem de aplicar o método dos mínimos quadrados ao problema em questão. Entretanto há um inconveniente com tal procedimento, por incorporar grandes erros nos pequenos deslocamentos.

Isto porque o método dos mínimos quadrados cria o polinômio de grau  $n$  (no caso  $n=1$  por ajustar a uma reta) que apresenta o menor somatório dos quadrados das diferenças entre os pontos dados e o seu valor nestes mesmos pontos. Para esclarecimento do que foi exposto, sejam  $f(x)$  o valor do polinômio ajustado em  $x$ ,  $F(x)$  o valor da ordenada no ponto de abscissa  $x$ ,  $g(x)$  e  $G(x)$  seus valores inversos, respectivamente. Considerando que o ajuste da curva é feito sobre os pontos  $(x, F(x))$  de forma a se obter  $f(x)$ , temos que um erro  $E = [F(x)-f(x)]$  após a inversão (para obtenção de  $g(x)$ ) toma a forma,

$$E = \frac{1}{G(x)} - \frac{1}{g(x)} = \frac{[g(x) - G(x)]}{G(x)g(x)}$$

no qual o termo entre colchetes no numerador representa o erro da função invertida, e o denominador o produto entre as “duas funções invertidas” no ponto  $x$ . Vê-se que para grandes valores do produto, para um mesmo valor de  $E$  da função original, o erro na função invertida será maximizado. Como no caminho 2 os maiores valores do produto são para pequenos deslocamentos, conclui-se que estas regiões terão maior erro no ajuste de curvas efetuado.

A sensibilidade tem um alcance grande por conta dos vários caminhos desenvolvidos. Dependendo da faixa de deslocamento, deve-se adotar rotas diferenciadas. A técnica é sensível a deslocamentos no plano, mas se a imagem não estiver bem focalizada (distância inapropriada ao plano de gravação, abertura da lente muito grande gerando aberrações) o sistema também ficará sensível a deslocamentos irregulares fora do plano (*tilt*). A melhor solução é usar lentes com grande distância focal.

Algumas considerações gerais a respeito da técnica merecem destaque:

- A resolução do sistema de gravação deve ser capaz de registrar a máxima frequência espacial do *speckle*. Assim:  $g_{min} = 1/f_{max} = v/a$ , onde  $a$  é a abertura,  $v$  é a distância da lente ao plano imagem.
- O deslocamento mínimo  $d_{min}$  que deve ser aplicado à superfície deve ser maior do que o tamanho dos grãos de *speckle*  $d_{sp}$ . Assim:  $d_{min} > d_{sp}/m > 1/2 (f/a)$ ;
- A princípio a sensibilidade pode ser reduzida para qualquer valor desejado através da diminuição da ampliação do sistema.
- O tamanho máximo do objeto observado é limitado, a princípio, pela potência do laser. Outra limitação advém dos efeitos de aberração na formação de uma imagem pequena de um objeto grande.

Uma extensão do método que ampliaria bastante a sua utilização seria a divisão da imagem em uma malha  $m \times n$ . Desta forma pode-se simular a observação por feixe não expandido, comentado anteriormente, e obter informações localizadas de deslocamento. Uma varredura em toda imagem forneceria um campo de deslocamentos.

Para tal realização, é necessário que o programa existente seja executado sobre cada célula da malha da imagem. Assim, implementando um programa principal que determine os deslocamentos de cada célula, e os indexe de forma a cobrir toda a imagem, é possível obter o campo de deslocamentos.

## Ensaio em vigas engastadas

Para avaliar a utilidade desta técnica para área de materiais, foram realizados testes com viga engastada. O material empregado foi um compósito de geopolímero, que vem sendo estudado no Instituto, e foram observados os danos nas vigas ensaiadas a partir da interferometria digital de correlação de *speckle*.

As franjas de correlação de *speckle* foram obtidas pela subtração ao vivo (em tempo real) da imagem atual pela imagem original (ou de referência). Isto é exatamente equivalente ao processo convencional, onde a posição de referência é um negativo da imagem.

Dos materiais disponíveis, alguns não funcionaram bem como geradores de franjas de correlação. Foram eles o *nylon* e o acrílico devido à alta transmissividade desses materiais. Outro par que não se adaptou bem foi o de compensados, devido à diferença de coloração entre as camadas, que compromete a leitura das franjas.

Dessa forma, desenvolveu-se a observação das franjas na maioria dos materiais restantes. Devido à grande sensibilidade do sistema utilizado, tornou-se evidente que era necessário um material que com pequenas deformações gerasse danos. Este material frágil adotado foi o geopolímero desenvolvido no IME, pelo grupo de compósitos.

Outra forma de visualizar os danos com pequenas deformações é através da indução proposital da formação do dano, o qual foi feito na viga de ipê através de um corte com uma penetração até a metade da sua seção (Figura 8).

Foram observados de deslocamentos nitidamente diferenciados, com uma interface muito bem definida na configuração das franjas de correlação. Esta interface ocorreu justamente na região onde posteriormente apareceu a trinca macroscópica

Para a viga de ipê foi possível notar as discontinuidades das franjas na região do corte. Continuando a solicitar a viga com o parafuso micrométrico houve um momento em que a configuração das franjas na região abaixo do corte mudou para um estado que sugere o início da trinca.

Nas vigas de geopolímero foram observados deslocamentos nitidamente diferenciados, com uma interface muito bem definida na configuração das franjas de correlação. Esta interface ocorreu justamente na região onde posteriormente apareceu a trinca macroscópica (Figura 9).

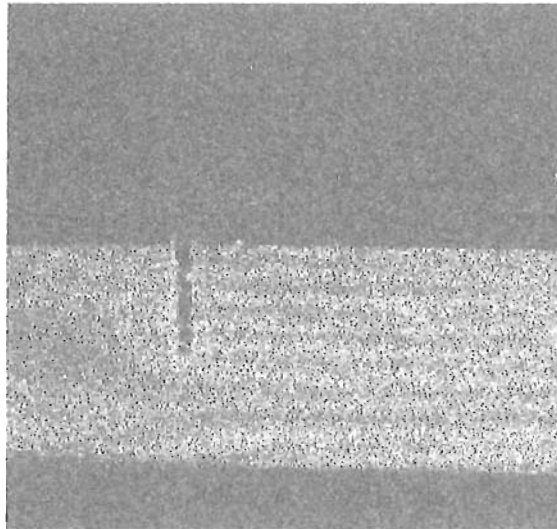
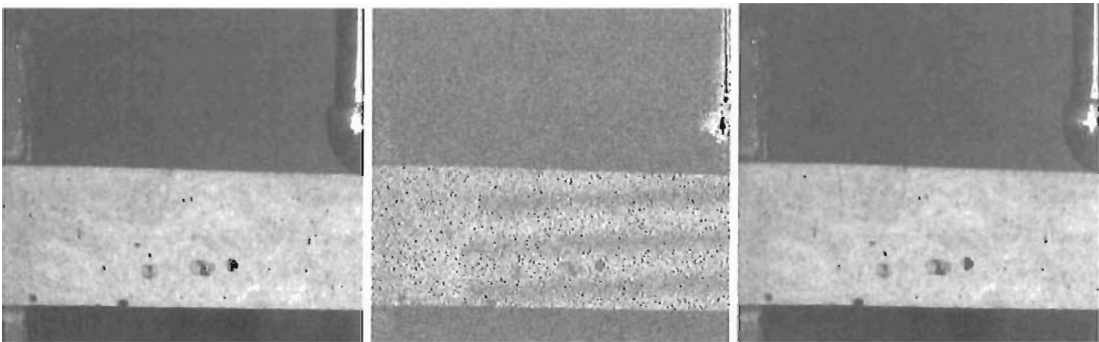


Figura 8: Franjas de interferência na viga de ipê serrada



**Figura 9:** Em seqüência: a) Trinca não observável macroscopicamente; b) evidência do defeito na região de descontinuidade por formação de franjas de interferência; c) confirmação macroscópica da formação da trinca

As franjas de correlação de *speckle* informam a condição de deslocamento da superfície. Se houver uma descontinuidade neste padrão de franjas, pode-se inferir que uma descontinuidade da matéria está aflorando na superfície. Só será possível detectar um dano através da presente técnica se este puder influenciar na superfície: estando na mesma, ou extremamente próximo a ela em materiais duros, ou ligeiramente afastados em materiais de matriz macia. Portanto, ao projetar o experimento, é necessário aplicar a carga de tal maneira que, para a sensibilidade do sistema, o nível e o tipo de deformação sejam tais que o dano possa se manifestar na superfície.

Outra característica que deve ser observada é a distância mínima entre as franjas que pode ser resolvida pelo meio de gravação. Se o efeito do defeito na superfície for menor do que esta distância mínima, o defeito não será observado. Para uma área de iluminação de 100mm de diâmetro, este espaçamento mínimo varia de 0.5-1mm.

As medições feitas neste experimento não têm qualquer fundamento estatístico. Foram apenas conduzidas com caráter investigativo e qualitativo. Sob esse ponto de vista, a técnica de correlação de *speckle* mostrou-se capaz de fornecer informações a respeito de danos, guardadas as observações anteriores.

Baseado nestas características de DSPI, o trabalho desenvolvido propôs-se a inicializar e desenvolver a utilização da técnica em casos reais de engenharia, fazendo-se valer de toda sua potencialidade. Para tal realização foram montados dois experimentos principais e uma série de rotinas de processamento de imagens e cálculo de medidas em MATLAB® (interligadas por programas principais), que dentre outras coisas, eliminam um dos principais problemas inerentes à técnica interferométrica de *speckle*: o ruído na imagem (inerente à técnica pelo fato do ruído fazer parte da portadora da informação).

Para o experimento de medição de deslocamentos no plano, foram gerados programas em MATLAB® que levantam curvas de calibração relacionando alguma característica mensurável da imagem processada (frequência espacial das franjas de interferência ou distância entre franjas filtradas) com o deslocamento aplicado. Baseados nestas curvas, os programas determinam o deslocamento relativo entre duas ou mais posições do objeto capturadas pelo sistema de aquisição de imagens. Dependendo da rota de processamento adotada pelo programa, o sistema terá sua sensibilidade variada para pequenos ou grandes deslocamentos, o que é muito interessante, pois confere versatilidade à técnica, aumentando seu espectro de atuação. Para as configurações adotadas no experimento – as quais englobam resolução limitante do sistema de aquisição de imagens (no caso, a câmera CCD), distância focal e abertura da lente – os valores de deslocamento mensuráveis variaram de ~0,1mm até ~30mm, o que representa um alcance de pelo menos três ordens de grandeza.

O segundo experimento desenvolvido foi o de avaliação qualitativa de danos em vigas engastadas pelo método da interferometria de correlação de *speckle*. Este método mostrou-se interessante para este propósito por permitir visualização em tempo real (a medida que o carregamento vai sendo aplicado) e variabilidade dinâmica na faixa de sensibilidade desejada (ou por meio de alteração no arranjo óptico, ou pela escolha de novas imagens de referência). Foi possível inferir a existência e localização de trincas pela descontinuidade no padrão de franjas antes de serem passíveis de observação macroscópica. Este fato, ainda que com um caráter apenas qualitativo, faz da técnica um instrumento interessante para detecção de trincas ou outros defeitos que gerem descontinuidades na superfície.


Conclui-se assim que a técnica de DSPI, em conjugação com programas bem elaborados, tem um grande potencial a ser (ainda) explorado na medição de deslocamentos, deformações e tensões e na detecção de defeitos superficiais de estruturas, desde que se tenha acesso às configurações solicitadas e não solicitadas das mesmas.

## CONCLUSÕES

Baseado nestas características de DSPI, o trabalho desenvolvido propôs-se a inicializar e desenvolver a utilização da técnica em casos reais de engenharia, fazendo-se valer de toda sua potencialidade. Para tal realização foram montados dois experimentos principais, e uma série de rotinas de processamento de imagens e cálculo de medidas em MATLAB® (interligadas por programas principais), que dentre outras coisas, elimina um dos principais problemas inerentes à técnica interferométrica de *speckle*: o ruído na imagem (inerente à técnica pelo fato do ruído fazer parte da portadora da informação).

Para o experimento de medição de deslocamentos no plano, foram gerados programas em MATLAB® que levantam curvas de calibração relacionando alguma característica mensurável da imagem processada (frequência espacial das franjas de interferência, ou distância entre franjas filtradas) com o deslocamento aplicado. Baseados nestas curvas, os programas determinam o deslocamento relativo entre duas ou mais posições do objeto capturadas pelo sistema de aquisição de imagens. Dependendo da rota de processamento adotada pelo programa, o sistema terá sua sensibilidade variada para pequenos ou grandes deslocamentos, o que é muito interessante, pois confere versatilidade à técnica, aumentando seu espectro de atuação. Para as configurações adotadas no experimento – as quais englobam resolução limitante do sistema de aquisição de imagens (no caso, a câmera CCD), distância focal e abertura da lente – os valores de deslocamento mensuráveis variaram de ~0,1mm até ~30mm, o que representa um alcance de pelo menos três ordens de grandeza.

O segundo experimento desenvolvido foi o de avaliação qualitativa de danos em vigas engastadas pelo método da interferometria de correlação de *speckle*. Este método mostrou-se interessante para este propósito por permitir visualização em tempo real (a medida que o carregamento vai sendo aplicado) e variabilidade dinâmica na faixa de sensibilidade desejada (ou por meio de alteração no arranjo óptico, ou pela escolha de novas imagens de referência). Foi possível inferir a existência e localização de trincas pela descontinuidade no padrão de franjas antes de serem passíveis de observação macroscópica. Este fato, ainda que com um caráter apenas qualitativo, faz da técnica um instrumento interessante para detecção de trincas ou outros defeitos que gerem descontinuidades na superfície.

Conclui-se assim que a técnica de DSPI, em conjugação com programas bem elaborados, tem um grande potencial a ser (ainda) explorado na medição de deslocamentos, deformações e tensões e na detecção de defeitos superficiais de estruturas, desde que se tenha acesso às configurações solicitadas e não solicitadas das mesmas. 

## BIBLIOGRAFIA

ALBERTAZZI JR., A. (1993a), *Generalized Least Squares Approach to Compute Displacements, Strains and Rotations from Combined Single and/or Double Illumination Holographic Interferometry*. Simpósio do SPIE de 1993, Interferometria II: Conferência de Aplicações, San Diego, Califórnia, julho.

- (1993b), *Measurement of Radial Deformation of a Long Internal Cylinder Using ESPI*. Simpósio do SPIE de 1993, Interferometria II: Conferência de Aplicações, San Diego, Califórnia, julho.
- ALONSO, M. & FINN, E. J. *Física – Um Curso Universitário*. V. II. Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo, 1972.
- ASHBY, M. F. *Materials Selection in Mechanical Design*. Butterworth-Heinemann, Oxford, 1992.
- PANASIUK, L. M. & ZHURMINSKII, I. L. *Elasticity Constants Determination of Materials with Holographic Interferometry Methods*. SPIE Industrial Optical Sensing and Metrology. V. 2066, p. 80-84, 1993.
- PÄRT-ENANDER, E., SJOBERG, A., MELIN, B. & ISAKSSON, P. *The MATLAB Handbook*, Addison-Wesley, Cambridge, 1996.
- RODRIGUES, E. & MARAMATSU, M. *Estudo de Deformação Através de Interferometria de Speckle-Shearing*. In: Revista de Física Aplicada e Instrumentação, V. 10, nº 4, dezembro de 1995.
- SCIAMMARELLA, C. A. *The Moiré Method – A Review*, National Science Foundation, 1982, p. 418-432, 1982.
- SHAMES, I. H. *Introdução à Mecânica dos Sólidos*. Prentice/Hall do Brasil, Rio de Janeiro, 1983.
- SHCHEPINOV, V. P., PISAREV, V. S., NOVIKOV, S. A., BALALOV, V. V., ODINTSEV, I. N. & BONDARENKO, M. M. *Strain and Stress Analysis by Holographic and Speckle Interferometry*. John Wiley & Sons Ltd., Inglaterra, 1996.
- SOUZA, A. R. *Utilização da Holografia Eletrônica para Detecção Não-Destrutiva de Defeitos em Cilindros Revestidos com Borracha*. Mimeo, UFSC, Florianópolis, 1994.
- TANT, M. R., McMANUS, H. L. N. & ROGERS, M. E. *High Temperature Properties and Applications of Polymeric Materials*. Developed for the 207<sup>o</sup> National Meeting of the American Chemical Society. San Diego, California, março de 1994.
- THE MATHWORKS INC. *Image Processing Toolbox User's Guide (MATLAB)*, MathWorks, 1998.
- ZHANG, H., LALOR, M. J. & BURTON, D. R. *Improved Technique for Measurement of a Long Radius of Curvature by a Digital Moiré Method*. In: SPIE Conference on Laser Interferometry IX: Applications, San Diego, California, julho de 1998.

*Com um rosto sorridente, o homem duplica  
as capacidades que possui.*

Provérbio Árabe

*É necessário muito pouco para provocar um sorriso  
e basta um sorriso para que tudo se torne possível.*

G. Gesbron