



MEDIÇÃO AUTOMÁTICA DE FRANJAS ISOCROMÁTICAS USANDO A FOTOELASTICIDADE RGB

José Luiz F. Freire

Marcelo B. Lavrador

Ana Cristina C. Soares

Pontifícia Universidade do Rio de Janeiro

Depto. de Engenharia Mecânica

Rua Marquês de São Vicente, 225 – Gávea

22450-900 Rio de Janeiro – RJ

Resumo. *O interesse pela fotoelasticidade em aplicações na determinação experimental de tensões, bem como seu uso na indústria como ferramenta de controle de qualidade e inspeção, voltou a ser estimulado graças à evolução da microinformática e, especialmente, dos equipamentos e softwares destinados à captura e processamento de imagens. O presente trabalho, classificado na linha Fotoelasticidade RGB, apresenta uma metodologia com inovações para detecção automática das ordens de franja (N) inteiras e fracionárias em imagens obtidas de modelos fotoelásticos.*

Palavras – Chave: *Fotoelasticidade, RGB, Automatização, Lógica nebulosa*

1. INTRODUÇÃO

A partir da década de 80, o estágio de desenvolvimento dos equipamentos de aquisição de imagens já permitia significativos avanços para a automatização da fotoelasticidade. Desde então algumas linhas de pesquisa tornaram-se importantes, como por exemplo “Phase – Stepping”, Análise Espectral e Fotoelasticidade RGB.

As linguagens de programação modernas (p.ex. Visual Basic) permitem a captura direta dos parâmetros R, G e B, que definem as intensidades de vermelho, verde e azul, dos pixels de imagens armazenadas em formato bitmap (BMP). Esta facilidade diminuiu o custo de pesquisa bem como agilizou os procedimentos da Fotoelasticidade RGB, tornando-a, hoje em dia, uma das mais promissoras linhas de pesquisa em fotoelasticidade para determinação de ordens de franja (N) entre 0 e 3.

O presente trabalho se baseia na metodologia de estimativas através de comparação por tabelas RGB-N, introduzida por Ajovalasit, Barone & Petrucci (1995) e contém inovações em relação ao estado da arte.

Entre as inovações destacam-se: i) a utilização de padrões que se aprimoram mediante correções nas estimativas erradas das ordens de franja (N); ii) a possibilidade de uso de várias

expressões de erro para ajuste dos dados; iii) um método automático para eliminação do ruído de leitura das ordens de franja (N). Um algoritmo baseado na teoria de lógica nebulosa é assunto de um trabalho ainda em fase de desenvolvimento (Lavrador, 1999).

2. A EVOLUÇÃO DA FOTOELASTICIDADE RGB

Uma das principais precursoras da Fotoelasticidade RGB é a técnica denominada "Half-Fringe Photoelasticity" (Voloshin & Burger, 1983). Utilizando luz monocromática, esta técnica se baseou na análise digital de níveis de cinza .

Aproximando-se mais da Fotoelasticidade RGB, foi publicado por Redner (1985) um método para a medição da retardação linear δ , baseado na separação espectral da luz (branca) emitida. A intensidade era medida para diversos comprimentos de onda através de um conjunto de fotodiodos.

A partir do desenvolvimento sugerido por Sanford & Iyengar (1985) na análise espectral, Ajovalasit *et al.* (1995) introduziram um novo conceito denominado **Fotoelasticidade RGB**. Este conceito envolve análise de imagens através da digitalização de apenas três limites de banda (λ_1 e λ_2) referentes às três cores primárias: vermelho, verde e azul. Estas cores são suficientes para definir a identidade de qualquer cor do espectro visível, conforme explicado detalhadamente por D.E.P Hoy (1997).

Sendo assim, Ajovalasit *et al.* (1995) definem a intensidade de luz fornecida pelo equipamento de aquisição de imagens em um polariscópio circular em campo escuro conforme a Eq. (1).

$$I = I_R + I_G + I_B = \sum_i \left\{ \frac{1}{\lambda_{i2} - \lambda_{i1}} \int_{\lambda_{i1}}^{\lambda_{i2}} F_i(\lambda) I_0(\lambda) \left[\sin^2 \frac{\pi \Delta C_\lambda}{\lambda C_0} (1 - \cos^2 2\alpha \sin^2 e) \right] d\lambda \right\} \quad (1)$$

onde:

$i = R, G, B;$

λ_1 e $\lambda_2 =$ Limites inferior e superior do espectro da fonte de luz utilizada;

C_λ e $C_0 =$ Coeficientes ou constantes de birrefringência do material, para um comprimento de onda arbitrário λ e para o comprimento de onde λ_0 ;

$\alpha =$ Ângulo da isoclínica;

$\varepsilon =$ Erro de retardação devido aos filtros de $\frac{1}{4}$ de onda $= \frac{\pi}{2} \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} - 1 \right)$.

A solução da Eq. (1) requer o conhecimento de diversos fatores de correção experimentais além do ângulo da isoclínica. Para contornar este problema, Ajovalasit *et al.* (1995) criaram um método com enfoque mais experimental, baseado em comparações.

Este método consiste na associação dos valores RGB capturados à outros valores RGB cujas ordens de franja (N) sejam conhecidas. Para construir-se uma tabela com os valores de R, G, B e N como padrão de referência utiliza-se, por exemplo, a imagem obtida de um modelo de flexão de viga simples, no qual a distribuição de tensões em sua seção transversal é linear. Esta peça, observada no polariscópio circular, apresenta franjas retas e paralelas. Determinando-se dois pontos onde o valor de N é conhecido obtém-se uma reta sobre a qual é

possível estimar todos os outros valores, através de interpolação linear. Todos estes valores são armazenados em uma tabela-padrão, conforme se observa na Fig. 1.

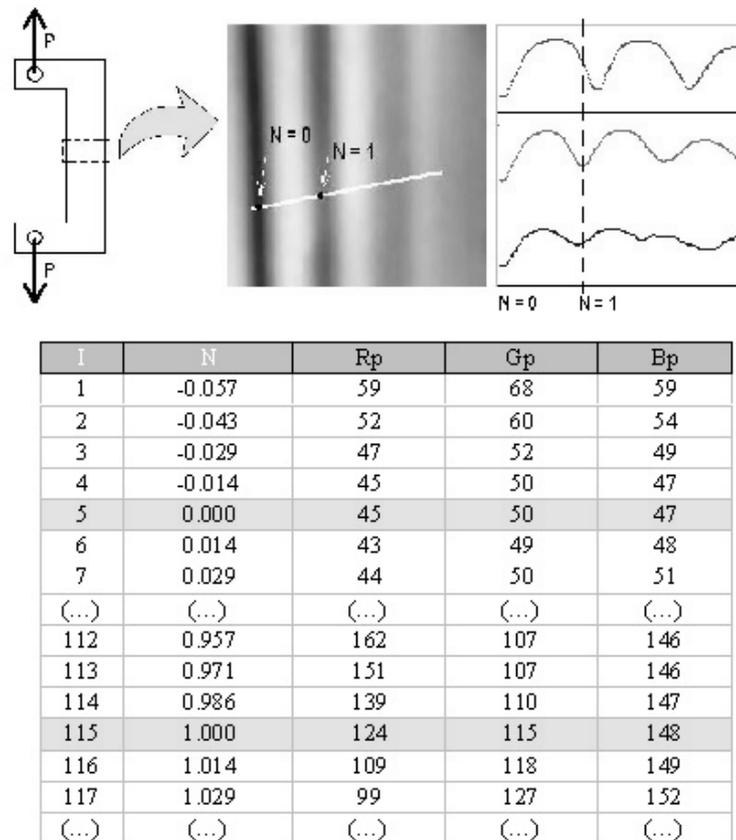


Figura 1 – Construção da tabela-padrão

A estimativa da ordem de franja (N) de um pixel do modelo é feita através da captura de seus parâmetros RGB e da comparação destes com os valores RGB da tabela-padrão previamente gerada. Esta comparação tem por objetivo encontrar o valor de N relativo ao terno RGB mais parecido com o do pixel capturado. A seleção do terno mais próximo é feita através da busca do mínimo de uma função erro mostrada na Eq. (2).

$$E^2_{(i)} = (R_{p(i)} - R_m)^2 + (G_{p(i)} - G_m)^2 + (B_{p(i)} - B_m)^2 \quad (2)$$

Onde:

R_m, G_m, B_m referem-se aos parâmetros RGB do pixel capturado na foto do modelo (no qual deseja-se estimar N);

$R_{p(i)}, G_{p(i)}, B_{p(i)}$ referem-se aos parâmetros RGB de todos os “ i ” pontos que pertencem à tabela previamente elaborada.

O valor de N no ponto em questão é o que possui menor valor de $E^2_{(i)}$ obtido na Eq. (2), entre todas as “ i ” linhas consultadas na tabela, conforme mostrado na Fig. 2.

O sistema de aquisição de imagens utilizado por Ajovalasit *et al.* (1995) na vídeo-captura permitia a detecção de 32 níveis de intensidade de cada uma das três cores primárias e os resultados obtidos para estimativa de N no intervalo $0.5 \leq N \leq 3$ mostraram-se corretos,

com exceção de pixels com similaridade de cor entre franjas de diferentes ordens. Para corrigir este problema, o método considerou os dois melhores resultados da referida comparação, escolhendo aquele que mais se aproximava dos valores de N obtidos nos pontos vizinhos.

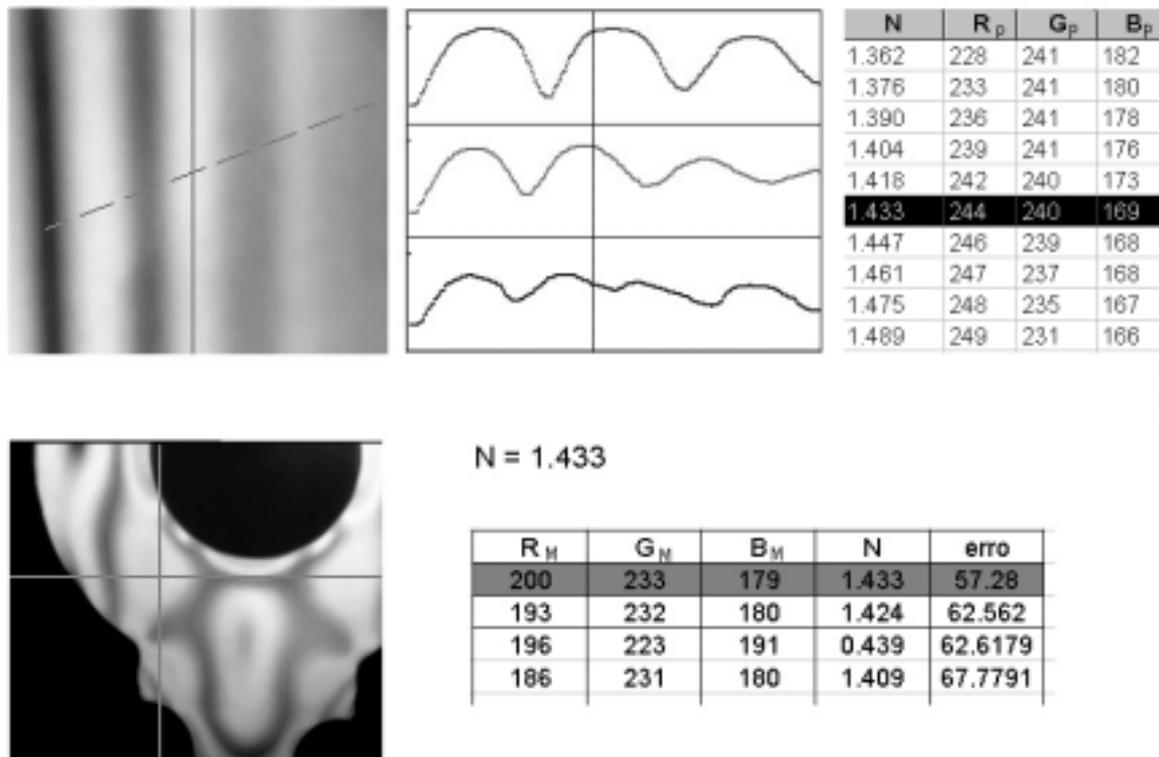


Figura 2 – Comparação do ponto selecionado com a tabela do padrão

Devido ao efeito da variação espacial da luminosidade no campo do polariscópio, foi utilizada a normalização dos níveis R, G e B, dividindo seus valores por R+G+B. Tal artifício foi aplicado tanto ao padrão quanto ao modelo de interesse.

Embora necessária, esta normalização causou imprecisão na determinação das ordens de franja menores que 0.5, pois, nesta faixa, os valores normalizados são os mesmos para diversos níveis de cinza. Correção para esta faixa de ordens de franja menores e sua possibilidade de aplicação na medição de tensões residuais em componentes de vidro foram publicados por Freire *et al.* (1998, 1999) e, ainda em desenvolvimento por Soares (1999).

Aperfeiçoamentos para o método de Ajovalasit *et al.* (1995) propostos por Ramesh & Deshmukh (1996). O primeiro deles foi utilizar não apenas uma, mas três tabelas de calibração. Cada tabela correspondia a um carregamento diferente, gerando ordens de franja nos intervalos (0 – 1), (0 – 2) e (0 – 3) respectivamente. Para alguns casos em que problemas de saturação em uma das três cores ocorria, foi proposta a substituição dos parâmetros R, G e B (conforme utilizados na Eq. (2)) pelas diferenças R-G, R-B e G-B.

Além de utilizar diretamente os valores de R, G e B obtidos com o modelo carregado em campo escuro, duas variações foram testadas e apresentaram diminuição dos pontos estimados erroneamente:

- a) Substituiu-se R, G e B pelas suas diferenças obtidas com carregamento e sem carregamento, mantendo-se o campo escuro;

b) Substituiu-se R, G e B pelas suas diferenças obtidas no campo-escuro e no campo-claro, mantendo-se o modelo carregado.

A segunda variação obteve resultados melhores.

A utilização de tabelas para determinação da ordem de franja (N) através de comparação é, hoje em dia, uma das linhas de pesquisa mais promissoras em fotoelasticidade. Isto acontece porque esta técnica, até agora, é a mais indicada aos que pretendem automatizar as estimativas de N com apenas uma fotografia do modelo. Este procedimento é denominado “Single-shot” e é extremamente importante uma vez que, em diversos casos, o sistema no qual se pretende analisar pode não ter comportamento estático. O procedimento “Single-shot” é o que mais se adequa às aplicações na indústria e, por este motivo, a pesquisa do presente trabalho tem por objetivo adotá-lo.

3. PARÂMETROS PARA COMPARAÇÃO

Pesquisadores de fotoelasticidade RGB que adotaram a linha de comparação por tabelas RGB-N vêm buscando a melhor forma de configuração dos parâmetros da Eq. (2), seja através da normalização dos parâmetros RGB ou outros arranjos como, p. ex., R-G, R-B e G-B conforme comentado anteriormente.

Experiências realizadas no presente trabalho sugerem não existir configuração ideal para todas as regiões de imagens fotoelásticas, mas sim configurações específicas para cada situação. Tal fato pode ser exemplificado pela normalização a que os parâmetros da Eq. (2) foram submetidos, ou seja, $R/(R+G+B)$, $G/(R+G+B)$ e $B/(R+G+B)$. Esta configuração atenua os efeitos de má distribuição de luminosidade nas imagens capturadas, porém prejudica a distinção das ordens de franja entre 0 e 0.5, uma vez que os valores normalizados se tornam os mesmos para diversos níveis de cinza que compõem esta faixa. Outro exemplo é a alteração para R-G, R-B e G-B, que embora consiga diferenciar os níveis de cinza da faixa mencionada, também diferencia cores que não deveria (idênticas), devido à diferenças de intensidade luminosa nas imagens.

Pela razão descrita, a presente metodologia utiliza a Eq. (3) como generalização da Eq. (2).

$$E_{(i)}^2 = (\mathcal{P}_1_{p(i)} - \mathcal{P}_1_{m})^2 + (\mathcal{P}_2_{p(i)} - \mathcal{P}_2_{m})^2 + \dots + (\mathcal{P}_n_{p(i)} - \mathcal{P}_n_{m})^2 \quad (3)$$

onde \mathcal{P} é qualquer parâmetro derivado de operações aritméticas entre R, G e B

Esta forma permite a configuração de parâmetros que melhor se adaptem à região de interesse na imagem. Além disto, peculiaridades relativas à qualidade do equipamento de aquisição utilizado podem ser compensadas através de configurações adequadas como, por exemplo, câmeras com sensibilidade deficiente para o azul. Neste caso sugere-se configurar os parâmetros de maneira a valorizar os valores de vermelho e verde: $\mathcal{P}_1 = 3R$, $\mathcal{P}_2 = 3G$, $\mathcal{P}_3 = R+G+B$. Algumas avaliações metrológicas relativas à particularidades de certos equipamentos de aquisição de imagens estão descritas em Lavrador, (1999).

4. CORREÇÃO DA TABELA PADRÃO

Maiores índices de acerto nas estimativas por comparação são obtidos quando as imagens do padrão e do modelo são obtidas com o mesmo equipamento, sob as mesmas condições de

luminosidade externa. Apesar disso alguns erros podem ocorrer devido à aproximações entre as cores de algumas franjas. Resultados experimentais mostraram que, fora da região entre $N = 0$ e $N = 0.5$, os erros geralmente ocorrem com diferenças de ordem de franja inteiras como, por exemplo, 0.6 ao invés de 1.6, 2.8 ao invés de 1.8 etc.

A Figura 3 apresenta a imagem de um modelo fotoelástico, onde a seta indica um ponto cuja estimativa correta seria $N = 1,24$. A Tabela 1 apresenta os menores valores obtidos de E^2 (em ordem crescente) para a estimativa de N neste ponto. Observa-se que, neste caso, o menor valor de E^2 não representa a estimativa correta.



Figura 3 – Imagem de um modelo fotoelástico com indicação de ponto onde $N = 1,24$

Tabela 1. Exemplo de estimativas de N e respectivos valores de E^2 obtidos em um ponto

N	E^2
2,252	37
1,241	68
2,236	123
1,227	207
1,209	245

Este erro poderia ser identificado observando-se as estimativas em três pontos vizinhos, conforme mostrado nas tabelas 2a, 2b e 2c.

Tabelas 2a, 2b e 2c. Exemplo de estimativas de N e respectivos valores de E^2 obtidos em três pontos vizinhos ao anterior

a

N	E^2
1,238	21
1,229	27
2,230	98
1,218	119
1,211	145

b

N	E^2
1,259	15
1,245	46
1,237	137
2,239	177
1,221	195

c

N	E^2
1,273	31
2,275	77
2,286	82
1,276	129
1,269	148

Como inovação ao método tradicional, a presente metodologia prevê a inserção do valor correto de N (associado aos seu valores RGB) na tabela de padrão. Com esta recente "informação", uma nova estimativa sobre o mesmo ponto de interesse seria correta e geraria, inclusive, $E^2 = 0$, uma vez que o padrão passou a conter exatamente os parâmetros RGB do ponto de interesse.

5. CORREÇÃO AUTOMÁTICA DOS VALORES DE N

5.1. Método da limitação dos deslocamentos

Uma maneira de julgar a validade de uma estimativa de N feita através da presente metodologia é realizar uma seqüência de estimativas sobre uma linha da imagem, conforme explicado pelo exemplo a seguir.

Utilizando-se a imagem apresentada na Fig. 3, traça-se uma linha contendo o ponto no qual se deseja verificar a não validade da estimativa $N = 2,252$, utilizada no exemplo anterior.

Conforme apresentado na Fig. 4., observando-se o respectivo gráfico N x pixel, apresentado na Fig. 5, nota-se claramente os pontos cujas estimativas estão erradas, incluindo a referida estimativa conforme assinalado no gráfico (Fig. 5)

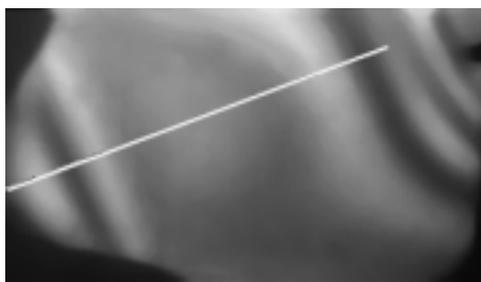


Figura 4 - Linha traçada na imagem, sob a qual foram realizadas estimativas de N

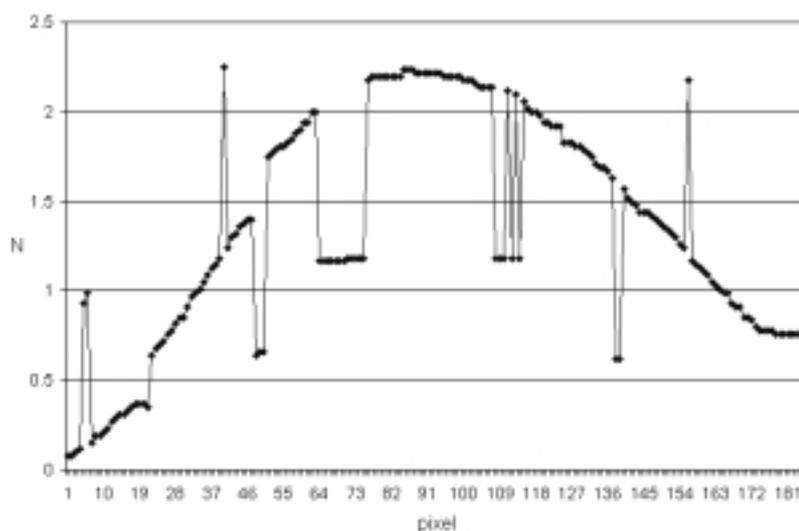


Figura 5 – Gráfico N x pixel das estimativas de N sob a linha traçada

Uma vez que ao utilizar-se a presente metodologia a maior parte das estimativas é correta, torna-se possível desenvolver um método para quantificar os deslocamentos dos pontos em relação à tendência da curva (os pontos com deslocamentos grandes representam as estimativas erradas), conforme apresentado a seguir.

Dada uma seqüência de m estimativas, conforme a curva N x pixel apresentada na Fig. 4, define-se outra curva N' x pixel, onde cada N' é o resultado da média entre três estimativas consecutivas, conforme mostrado esquematicamente na Fig. 6.

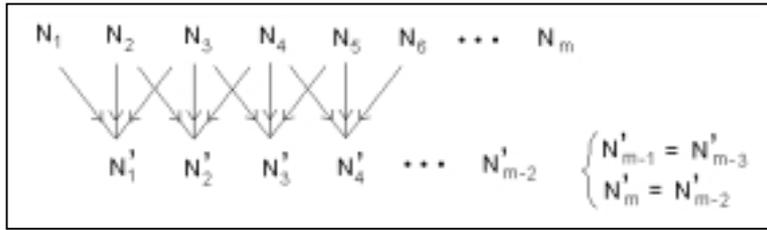


Figura 6 – Esquema para confecção da curva N' x pixel através de médias consecutivas

Repetindo-se este procedimento duas vezes obtém-se a curva N'' x pixel conforme apresentado na Fig. 7.

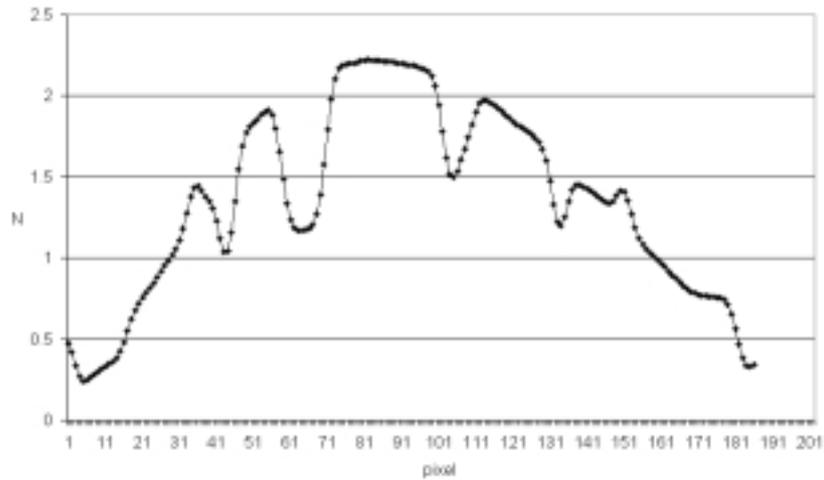


Figura 7 – Gráfico N'' x pixel das estimativas de N após médias consecutivas

Comparando-se as Figs. 5 e 7 observa-se que os pontos do gráfico que sofreram maior alteração foram exatamente aqueles que se encontravam muito deslocados em relação à tendência da curva, ou seja, as estimativas erradas. A Fig. 8 apresenta estes deslocamentos através das diferenças entre as posições dos pontos da curva original (Fig. 5) e a curva alterada (Fig. 7).

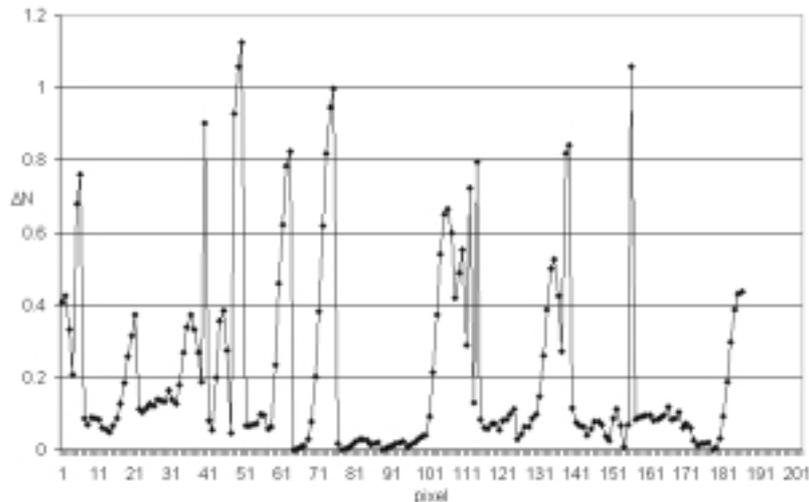


Figura 8 - Diferenças entre posições dos pontos da curva original (Fig. 5) e a alterada (Fig. 7).

Eliminando-se no gráfico N x pixel (Fig. 5) as estimativas que sofreram variação elevada, (observadas no gráfico N'''' x pixel da Fig. 8), obtém-se um gráfico N x pixel contendo apenas estimativas corretas.

Nota-se, no exemplo em questão, que eliminando-se as estimativas correspondentes aos pontos que sofreram variação superior a $\Delta N = 0,2$ no gráfico N'''' x pixel (Fig. 8), obtém-se, o gráfico N x pixel mostrado na Fig. 9. Este gráfico é similar ao da Fig. 5, sem as estimativas erradas. Nota-se que o preenchimento dos espaços vazios através de interpolação linear seria uma boa aproximação para, finalmente, obter-se um gráfico N x pixel correto e completo para a seqüência de estimativas em questão.

Finalmente tal correção de estimativas pode ser incorporada à tabela-padrão de forma a proporcionar menores índices de erro nas próximas seqüências de estimativas.

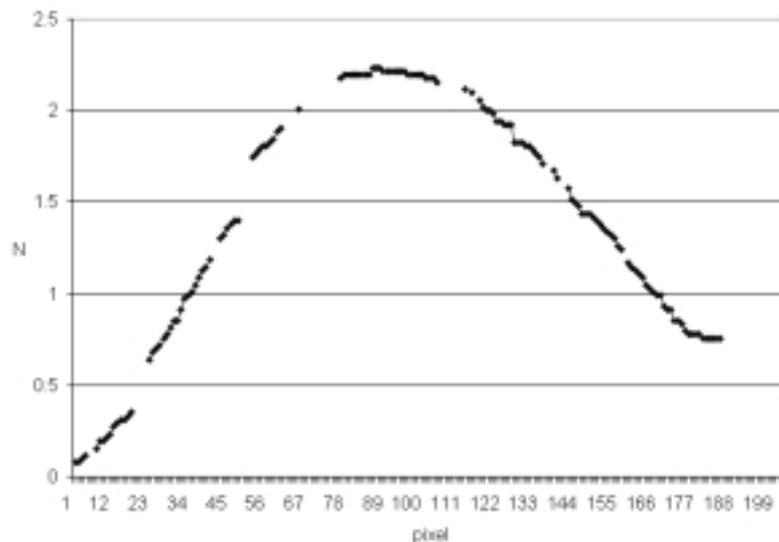


Figura 9 – Gráfico N x pixel das estimativas de N sob a linha traçada, sem as estimativas erradas

6. CONCLUSÕES

Visando a determinação automática de ordens de franja (N), este trabalho apresentou inovações em relação ao estado-da-arte em Fotoelasticidade RGB, tais como:

- Utilização de padrões que se aprimoram mediante correções nas estimativas erradas;
- Comparação com tabelas de padrão utilizando equações de erro com parâmetros variáveis;
- Algoritmo para detecção e remoção das estimativas erradas.

Estas inovações mostraram-se plenamente eficazes e estão sendo implementadas em um programa de computador. Este programa, especialmente confeccionado para identificar ordens de franja (N) entre 0 e 3, também utiliza algoritmos inteligentes baseados na teoria de lógica nebulosa para aumentar índices de acerto nas estimativas das ordens de franja e será apresentado por Lavrador (1999) e Soares (1999).

REFERÊNCIAS

- Ajovalasit, A., Barone, S., Petrucci, G., 1995, Towards RGB Photoelasticity: Full-Field Automated Photoelasticity in White Light, *Experimental Mechanics*, 193-200.
- Hoy, D.E.P., 1997, On The Use of Color Imaging in Experimental Applications”, *Experimental Techniques*, 17-19.
- Lavrador, M. B., 1999, Automatização na Determinação de Ordens de Franja em Fotoelasticidade RGB, Tese de Doutorado, PUC-Rio
- Ramesh, K., Deshmukh, S.S., 1996, Three Fringe Photoelasticity – Use of Colour Image Processing Hardware to Automate Ordering of Isochromatics”, *Strain*, 7996.
- Redner, A.S., 1985, Photoelastic Measurement By Means of Computer-assisted Spectral-contents Analysis, *Experimental Mechanics*, 25,2,148-153.
- Sanford, R.G., Iyengar, V., 1985, The Measurement of The Complete Photoelastic Fringe Order Using a Spectral Scanner, *Proc. 1985 Spring Conference on Experimental Mechanics*, 160-168.
- Soares, A. C. C. , 1999, Aplicação de Fotoelasticidade RGB na Medição de Tensões Residuais em Componentes de Vidro, Dissertação de mestrado, PUC-Rio.
- Voloshin, A.S. And Burger, C.P., 1983, Half-Fringe Photoelasticity: A New Approach to Whole-Field Stress Analysis, *Experimental Mechanics*, 304-313, September, 1983.

AUTOMATIC MEASUREMENT OF ISOCROMATIC FRINGE ORDERS USING RGB PHOTOELASTICITY

Abstract: *The subject of automated birefringent measurement has motivated a great amount of research in the last two decades. The recent development of a new technique of retardation measurement based on RGB video cameras has motivated the use of white light photoelasticity in model analysis. The use of this new technique is welcome to the industrial environment. This paper, classified in the RGB photoelasticity line, presents an innovator methodology for automated detection of the fringe order N.*

Keywords: *Photoelasticity, RGB, Automation, Fuzzy Logic*