

FOTOEL : SISTEMA DE PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS FOTOELÁSTICAS PARA CÁLCULO DO PARÂMETRO K_I DA MECÂNICA DA FRATURA

Wellington Antonio Soares (1)
Arnaldo Homobono Paes de Andrade (2)

SUMÁRIO

O objetivo deste trabalho é divulgar o sistema FOTOEL, o qual permite o cálculo do fator de intensidade de tensões no modo de abertura (K_I) através do processamento digital de imagens fotoelásticas. Com base em parâmetros geométricos, extraídos das isocromáticas geradas na região próxima da ponta de uma trinca, é possível obter-se o citado fator. Para isto, a imagem isocromática necessita ser antes preprocessada, esqueletonizada e então afinada, de modo a fornecer as franjas de interesse no cálculo de K_I . O sistema FOTOEL foi desenvolvido com base na linguagem *Visual C* e na interface *VicWin*, para o ambiente *Windows/DOS*. As imagens básicas a serem processadas na obtenção de K_I são isocromáticas geradas com luz monocromática (imagens em níveis de cinza). O sistema possui, ainda, recursos para simulação de imagens fotoelásticas sintéticas (isocromáticas, isólinas) com 228 níveis de cinza, sendo possível selecionar-se o arranjo desejado para o polariscópio e alguns tipos básicos de modelos estruturais.

fator de intensidade de tensões, fotoelasticidade, processamento digital de imagens.

1 INTRODUÇÃO

A fotoelasticidade é uma técnica de análise experimental de tensões bastante antiga [1,2], a qual faz uso das propriedades de birrefringência mecânica de alguns materiais não cristalinos e da propriedade de polarização da luz. Na ausência de esforço mecânico, tais materiais apresentam somente um índice de refração; entretanto, sob ação de esforços, eles passam a apresentar dois índices de refração. Quando atravessados por um feixe luminoso polarizado, os materiais birrefringentes se decompõem em duas componentes que coincidem com as direções das tensões principais. Tal fato permite que se relacione a intensidade luminosa emergente desse material sob tensão com a diferença entre as tensões principais σ_1 e σ_2 . Nesta técnica, são geradas imagens fotoelásticas, conhecidas como isocromáticas e isóclinas. Com as primeiras é possível relacionar-se ($\sigma_1 - \sigma_2$) com a intensidade luminosa da imagem. Com as segundas, descobre-se a inclinação das tensões principais. Com a ajuda de relações matemáticas, é possível separar-se as tensões principais σ_1 e σ_2 , que são valores de referência para o engenheiro.

O experimento fotoelástico é realizado com um equipamento denominado polariscópio, o qual consiste num arranjo de elementos ópticos denominados polarizador, analisador e lentes de quarto de onda. Ele pode ser realizado com luz monocromática (uma só frequência) ou

1 SEMINÁRIO DE MECÂNICA DA FRATURA

(1) Mestre em Ciências e Técnicas Nucleares e em Engenharia de Estruturas - Pesquisador do CDTN/CNEN

(2) Doutor em Metalurgia e Materiais - Pesquisador do IPEN/CNEN.

com luz branca (várias frequências) No caso da luz branca, a imagem gerada é colorida. Já com luz monocromática, a imagem é em níveis de cinza. Quando as lentes de quarto de onda são desativadas, o polariscópio é denominado plano. Com as lentes de quarto de onda ativas, o polariscópio é chamado de circular. O polariscópio pode ainda ser classificado com sendo de campo claro ou de campo escuro, dependendo do ângulo entre o polarizador e o analisador. No polariscópio circular, são geradas as isocromáticas e no polariscópio plano são geradas as isóclinas. Em condições de campo escuro, o polariscópio circular, alimentado com luz monocromática, gera as franjas isocromáticas de ordem inteira. Já em condições de campo claro, ele gera franjas isocromáticas múltiplas de $1/2$. Do ponto de vista da fotoelasticidade, nas isocromáticas geradas com luz monocromática, interessam os pontos em que a intensidade luminosa passa por um mínimo local. Numa isocromática ideal, isto corresponderia a se achar os pontos de intensidade nula.

A fotoelasticidade vem sendo utilizada para calcular o fator de intensidade de tensões K da Mecânica da Fratura, com base no campo de tensões gerado na região próxima da ponta de uma trinca [3,4,5,6,7]. Mais recentemente, com o advento de computadores de melhor performance, do ponto de vista de velocidade e de recursos gráficos, vários trabalhos relativos ao uso do processamento digital na análise de imagens fotoelásticas para cálculo do parâmetro K_I vem sendo publicados [9,10,11,12]. A utilização da área de processamento digital de imagens (PDI), com os recursos de *scanners* e de câmaras de vídeo, tem proporcionado uma melhor agilização nas atividades dos pesquisadores da área.

O primeiro autor deste trabalho, sob orientação do segundo, vem desenvolvendo um sistema de processamento digital de imagens fotoelásticas (FOTOEL) para cálculo do fator K_I , dentro de uma tese de doutorado na USP/IPEN, para o ambiente *Windows/DOS*. É um sistema aberto, o que permitirá a inclusão de novos conhecimentos que forem sendo desenvolvidos para obtenção do fator de intensidade de tensões. O cálculo de K_I é feito com base em parâmetros geométricos extraídos da isocromática na região próxima da ponta da trinca, a qual tem que ser primeiramente submetida a pré-processamento digital (filtros), edição, esqueletonização e afinamento (*thinning*) das regiões de menor intensidade luminosa.

O sistema FOTOEL dispõe, ainda, de um módulo denominado SIMFOT [13], o qual permite a simulação de ensaio fotoelástico com polariscópio alimentado com luz monocromática. Como modelo estrutural em material birrefringente, dispõe-se de um disco sob ação de cargas concentradas de compressão, diametralmente aplicadas, e chapas infinitas, com furo circular, submetidas à várias condições de carregamento nas extremidades das mesmas. É um módulo de cunho didático e que permite um rápido aprendizado dos conceitos básicos da fotoelasticidade, facilitando a introdução de novos pesquisadores na área. O módulo permite a seleção dos vários tipos de arranjos de polariscópio citados anteriormente. Através de menus, podem ser alterados carga, espessura, constante fotoelástica de tensão do modelo e rapidamente são geradas as isocromáticas e isóclinas correspondentes.

2 APRESENTAÇÃO DO SISTEMA FOTOEL

O sistema FOTOEL foi desenvolvido na linguagem *Visual C*, com base na interface de desenvolvimento *VicWin* [14], a qual fornece recursos para carga e gravação de imagens em vários formatos, digitalização via *scanner* e funções de processamento digital de imagens. Ele

foi projetado para o ambiente *Windows* operando sob o *DOS*, para funcionar no módulo de alta resolução de 800x600. Atualmente o sistema permite a carga de imagens BMP (de 8 e 24 bits) e imagens PCX (de 8 bits). O sistema possui, também, opção para digitalização de imagens por meio do *scanner* ScanJet 2C da Hewlet Packard.

Na Figura 1, é apresentada uma tela de trabalho do sistema, ilustrando os vários menus e subitens disponíveis, bem como opção para entrada de dados relativos ao módulo de simulação fotoelástica. Na Figura 2, é ilustrado um trecho referente ao menu de ajuda na parte teórica de fotoelasticidade. Nesta mesma Figura, tem-se uma janela auxiliar, a qual é flutuante e serve, quando ativada, para emissão de resultados de ações em curso. No caso em questão, esta janela apresenta a configuração do polariscópio em uso. Esta janela pode mostrar também o histograma da imagem o resultado do cálculo do fator K_1 .

2.1 Preprocessamento

Para preprocessamento de imagens, estão disponíveis as seguintes funções : histograma , binarização, negativo, controle do brilho e do contraste da imagem, multiplicação por uma constante, equalização histográfica e média , mediana e convolução com máscara de 3x3, dentre outras, como ilustrado na Figura 1 sob o menu PDI.

2.2 Edição de imagens

A edição das imagens pode ser do tipo corretiva, a qual pode ser feita através das opções *lápiz* e *borracha*, que são ativadas através do menu *Ferram*. A edição de composição de imagem pode ser feita com as opções *Imagens* (*Tela > Buffer*, *Buffer > Tela*) e *Cola_Img* (*Soma*, *Subtrai*, *AND*, *OR* e *XOR*).

2.3 Esqueletonização e afinamento

A esqueletonização pode ser feita binarizando-se a imagem, ou então utilizando-se um procedimento descrito por Yatagai [9], onde a procura da região mais escura da imagem é feita preservando-se os níveis de cinza da imagem. Na metodologia apresentada por Yatagai, é utilizada uma máscara de 5x5, a qual passeia sobre as imagens por várias etapas procurando determinar os pontos mais escuros, mantendo, ao mesmo tempo, a conectividade entre os pontos de uma mesma franja. Em cada ponto em que a máscara para, é tomada uma decisão em termos de cinco desigualdades previstas em [9], para decidir-se se o ponto em questão irá ou não ser incluído como ponto pertencente ao esqueleto da imagem. Já a binarização consiste em se fazer com que as cores abaixo de uma determinada cor de referência , caso de imagem com palheta, se torne por exemplo preta e acima dela se torne branca.

A operação de afinamento foi feita com base nas referências [10,15], onde é usada uma máscara (matriz) de 3x3 para reduzir a imagem esqueletonizada a curvas com espessura de um *pixel*, mantendo também a conectividade entre os pontos de uma mesma franja.

2.4 Extração de parâmetros geométricos

A partir da opção *régua*, são calculados os valores do raio e correspondente ângulo em relação ao semi-eixo positivo dos x . Se a opção *janela* está ativada, os valores de raio e ângulo são atualizados na mesma. O valor do raio depende da resolução usada na digitalização da imagem e de alguma ampliação ou redução que tenha sido feita anteriormente à digitalização.

2.5 Cálculo do fator K_I

O cálculo do fator K_I é feito com base nos parâmetros geométricos (raio e ângulo) extraídos da isocromática na região próxima da ponta da trinca, com a utilização de formulário disponível nas referências [11,16]. Atualmente, está implementado somente a metodologia de Irwin [16], onde o fator K_I é calculado a partir de uma única franja. Outras metodologias estão sendo implementadas no sistema FOTOEL.

2.6 Simulação fotoelástica

A simulação fotoelástica refere-se a estruturas com carga no seu plano médio, na condição de estado plano de tensões. Os modelos estruturais, constituídos de material birrefringente, podem ter as suas dimensões, propriedades fotoelásticas de tensão e carga aplicada controladas no sistema através dos menus. Para o equipamento de simulação, o polariscópio, estão disponíveis os arranjos circular e plano com opções de campos escuro e claro. O sistema permite ainda que se obtenha as isóclinas isoladas e que se controle do ângulo relativo à geração de isóclinas.

Os vários arranjos possíveis para o polariscópio são mostrados na Figura 3. Na parte superior está o polariscópio circular (PC E - campo escuro, PC C - campo claro) e na parte inferior está o polariscópio plano (PP E - campo escuro, PP C - campo claro). Os modelos estruturais disponíveis são ilustrados na Figura 4. As cargas mostradas nas chapas são simbólicas, uma vez que as chapas são infinitas.

2.7 Unidades utilizadas

As seguintes unidades são utilizadas no sistema : a) força - Newton; b) distância - mm (para entrada de dados); c) constante fotoelástica de tensão - N/m; e d) tensão - MPa.

3 RESULTADOS

3.1 Simulação fotoelástica

Na Figura 5, mostra-se que uma imagem fotoelástica gerada num polariscópio plano com campo escuro é igual a soma da isocromática gerada num polariscópio circular com campo escuro com a isóclina isolada.

Observa-se, na Figura 6, que para um disco de mesmas dimensões e mesmas propriedades, ao se aumentar a carga aplicada, aumenta o número de franjas na isocromática gerada.

Na Figura 7, é feito um estudo de sensibilidade do material birrefringente. Para um disco com mesmas dimensões e mesma carga aplicada, ao se diminuir a constante fotoelástica de tensão, aumenta-se o número de franjas na isocromática gerada.

3.2 Análise de imagens fotoelásticas

Na Figura 8, é mostrada uma imagem de referência neste trabalho, a qual foi extraída da referência [16], a partir da digitalização da mesma com o *scanner* Scanjet 2C da Hewlett Packard, com a resolução de 87 dpi (*dots per inch*). Esta imagem, de acordo com a figura original da referência, foi reduzida pela metade. Sobre a imagem básica, foram desenhadas a distribuição de intensidade luminosa ao longo de linhas horizontais, utilizando os recursos do sistema FOTOEL. Com esta distribuição, pode-se observar que os mínimos locais se dão em pontos da imagem em que a mesma é mais escura.

Nas Figuras 9, 10 e 11, são mostradas respectivamente as imagens original, original submetida à mediana e imagem original submetida à mediana e depois à média. No lado direito dessas Figuras são mostrados os respectivos histogramas, os quais fornecem informações auxiliares no pré-processamento das imagens.

3.3 Extração de franjas

A imagem da Figura 12 é resultado da aplicação do processamento de binarização, com limiar igual a 180, sobre a imagem da Figura 11. Aplicando-se a operação de afinamento sobre a imagem da Figura 12, obtém-se a imagem mostrada na Figura 13. Uma superposição da imagem afinada sobre a imagem original é mostrada na Figura 14.

Nas Figuras 15 e 16, ilustra-se a operação de afinamento realizada em apenas um trecho da imagem. Observa-se que a imagem afinada está situada na região mais escura da imagem. A imagem utilizada nestas duas Figuras foi extraída da referência [3] por meio de digitalização via *scanner*.

3.4 Cálculo do fator K_1

Para cálculo do fator K_1 , é necessário os parâmetros geométricos distância e ângulo. O cálculo da distância, utilizando a régua eletrônica, depende da resolução da imagem. Assim, na Figura 17, ilustra-se um recurso do sistema FOTOEL, o qual apresenta as propriedades da imagem, incluindo a sua resolução. Pode-se ver que esta imagem foi digitalizada com resolução de 87 dpi.

Nas Figuras 18 e 19, é feito um procedimento de aferição do cálculo de distância com a régua eletrônica, levando-se em conta a resolução da imagem e medições na direção horizontal e numa direção inclinada. Na janela de resultados do cálculo da distância, pode-se ver também o ângulo entre o semi-eixo positivo dos x e a reta que une os dois pontos selecionados com a régua eletrônica.

Na Figura 20, faz-se uma simulação do cálculo do fator K_I , uma vez que, até o momento de elaboração deste trabalho, não se dispunha de uma imagem isocromática real na ponta de uma trinca, onde fossem conhecidas todas as propriedades, tais como espessura e constante fotoelástica de tensão do material birrefringente. Na ausência de tais informações, foi feita uma simulação do cálculo de K_I , utilizando-se as propriedades *default* do sistema FOTOEL, ou seja, espessura de 6 milímetros e constante fotoelástica de 23640 N/m. Para o cálculo de K_I , seria necessário saber-se, ainda a ordem da franja, a partir da qual seriam medidos o raio máximo e o correspondente ângulo. Foi arbitrado a ordem como sendo igual a 2. Para estas condições, o resultado do cálculo é mostrado na Figura 20.

4 CONCLUSÕES

O sistema FOTOEL ainda está em fase de desenvolvimento. Entretanto, várias funções necessárias ao cálculo do fator de intensidade de tensões no modo de abertura já estão funcionando muito bem, como é a parte de pré-processamento de imagens, extração de franjas (esqueletização e afinamento), medição de ângulos e distâncias e operações de edição de imagem. O cálculo do fator K_I foi apenas simulado, uma vez que ainda não se dispõe de imagens isocromáticas reais na ponta de uma trinca, conhecendo-se todas as suas propriedades, tais como constante fotoelástica de tensão, espessura do material birrefringente, resolução de digitalização da imagem e possível ampliação ou redução da da imagem original. O cálculo de K_I , com base numa única franja, tem as suas limitações em termos de faixa angular de aplicação. Outras metodologias aplicáveis a outras faixas angulares irão ser implementadas. Uma outra etapa a ser implementada será a rotulação semi-automática das franjas (atribuição de um número de ordens às franjas afinadas), a partir de um número de ordem de referência fornecido pelo usuário.

A parte de simulação de ensaio fotoelástico é uma ferramenta de cunho didático bastante interessante, uma vez que o usuário obtém uma resposta rápida em termos de imagem gerada, não necessitando, para efeito de aprendizado, que se disponha de equipamentos necessários à realização do experimento fotoelástico.

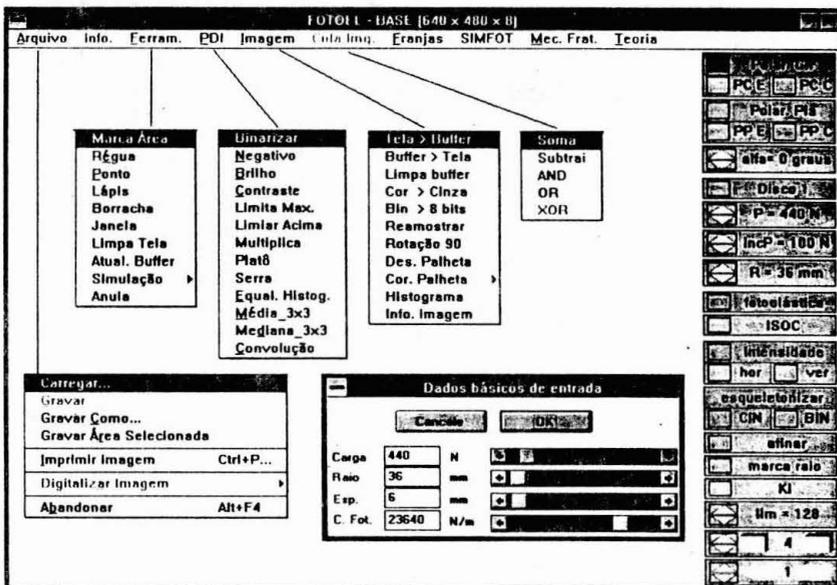


Figura 1. Visão geral da tela de trabalho do sistema FOTOEL, ilustrando alguns menus e itens dos respectivos menus

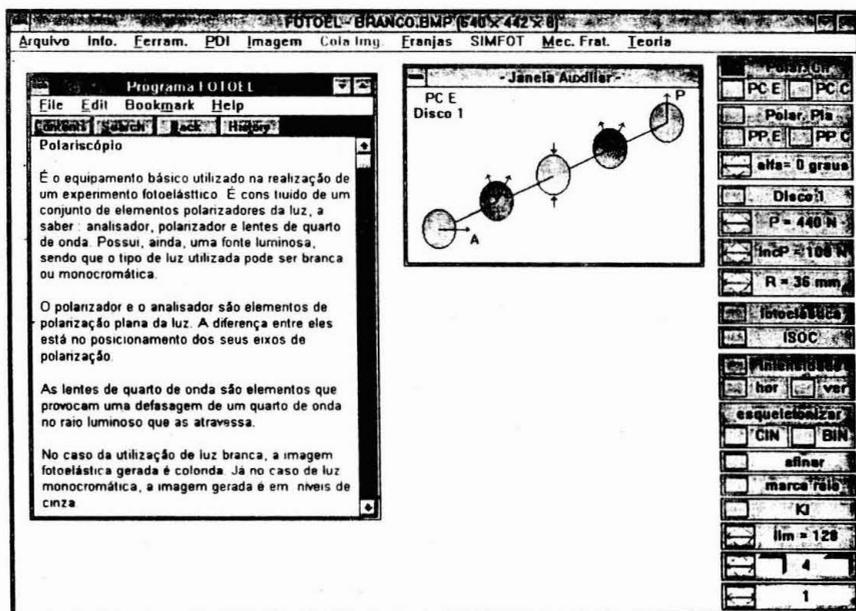
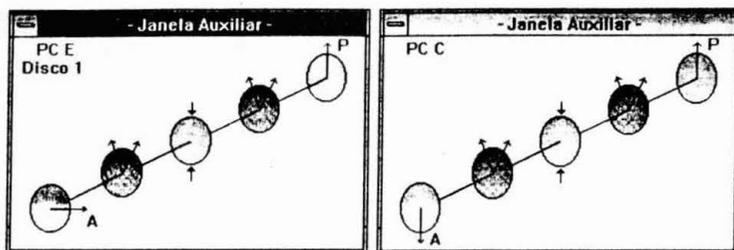
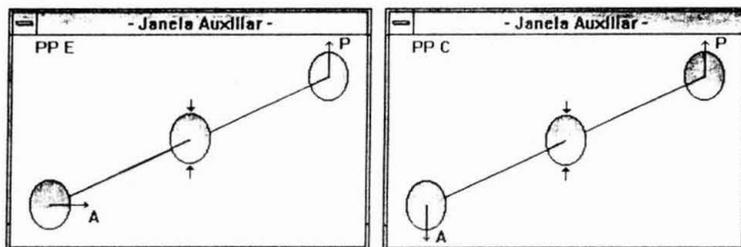


Figura 2. Ilustração do menu de ajuda no tópico relativo à fotoelasticidade e da janela flutuante para emissão de resultados



(a) polariscópio circular



(b) polariscópio plano

Figura 3. Ilustração dos arranjos dos elementos de um polariscópio.

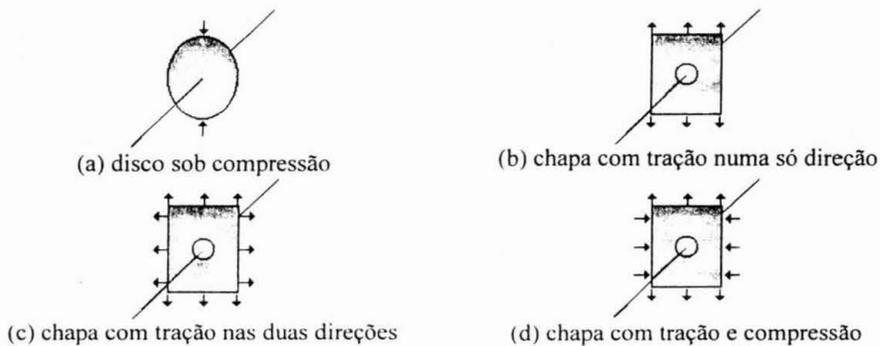


Figura 4. Ilustração dos tipos de modelos estruturais disponíveis.

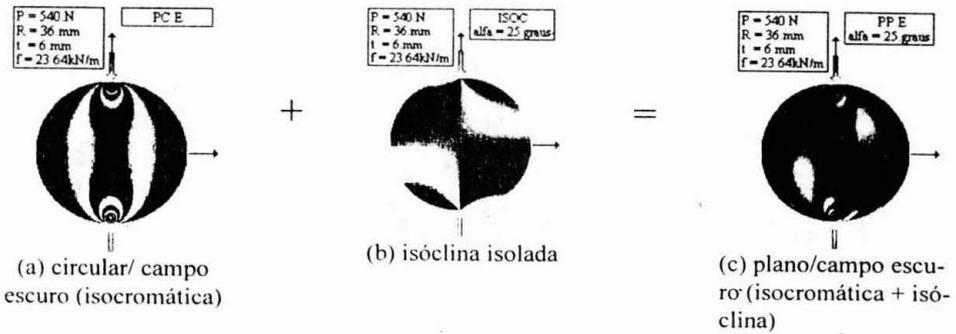


Figura 5. Isocromáticas para condição de polariscópios circular (a) e plano (c), na condição de campo escuro e isóclina isolada (b)

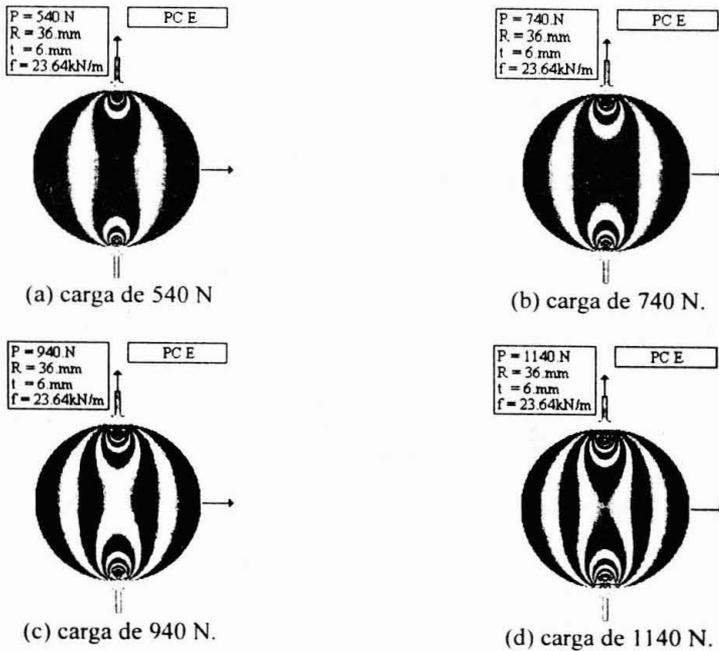


Figura 6. Efeito da variação da carga sobre o número de franjas

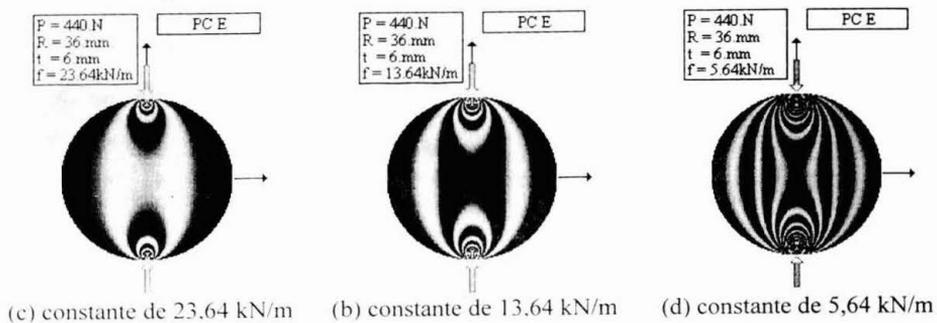


Figura 7. Efeito da variação da constante fotoelástica sobre o número de franjas

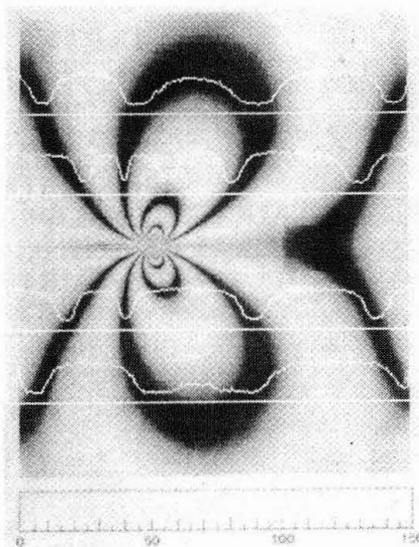


Figura 8. Intensidade luminosa sobre a imagem original [16].

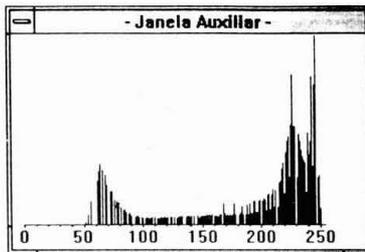
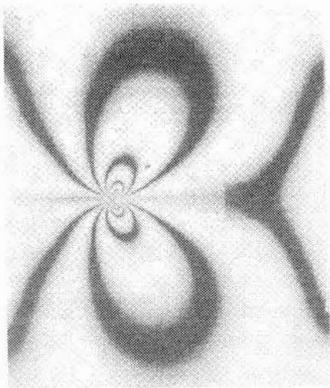


Figura 9. Imagem original com o respectivo histograma.

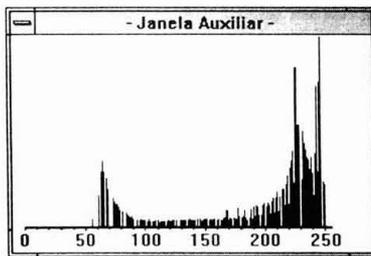
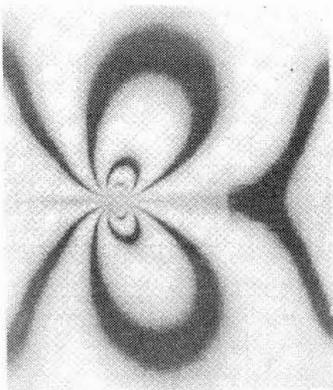


Figura 10. Imagem original submetida ao filtro da mediana e respectivo histograma.

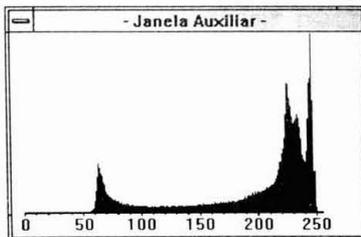
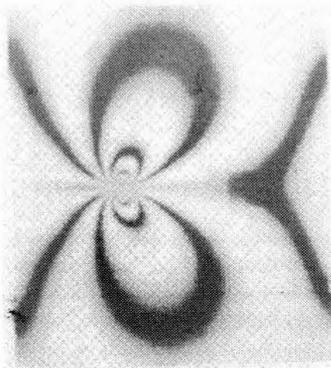


Figura 11. Imagem original submetida a mediana e depois à média e respectivo histograma.

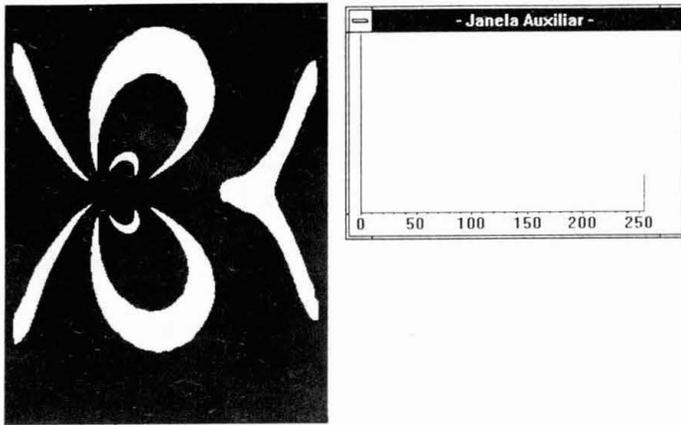


Figura 12. Esqueleto da imagem da Fig. 11 via binarização com limiar igual a 180.

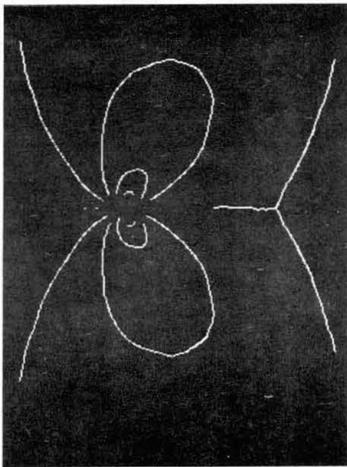


Figura 13. Afinamento da imagem esqueleto-nizada da Figura 12.

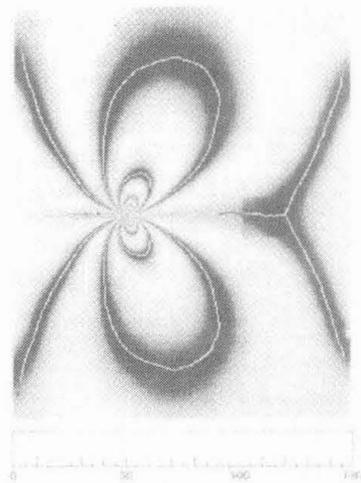


Figura 14. Superposição da imagem afinada sobre a imagem original

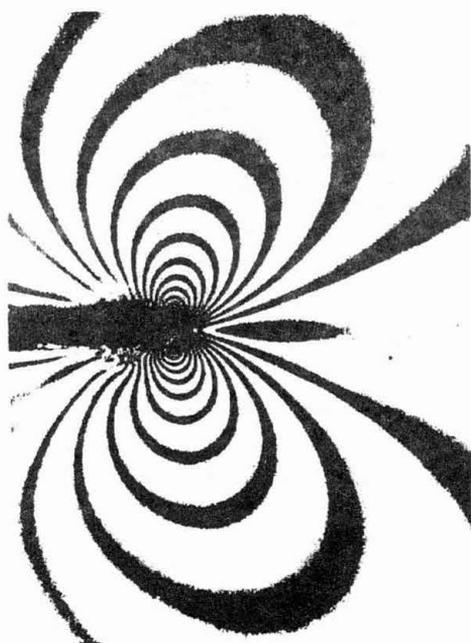


Figura 15. Isocromática na ponta de uma trinca.

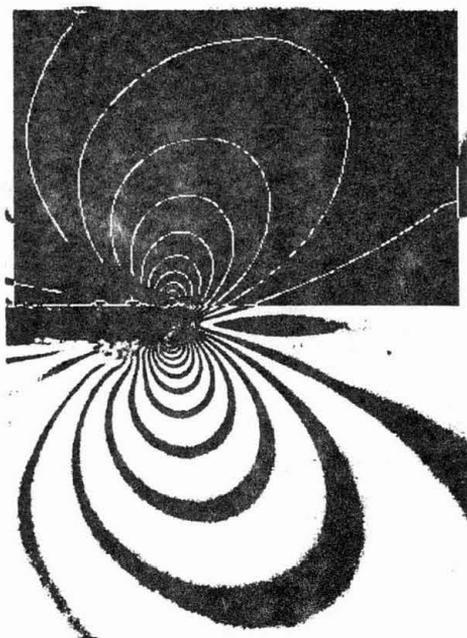


Figura 16 - Extração de franjas num determinado trecho da imagem

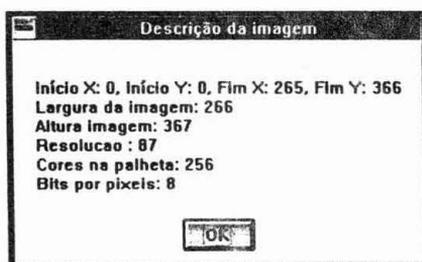
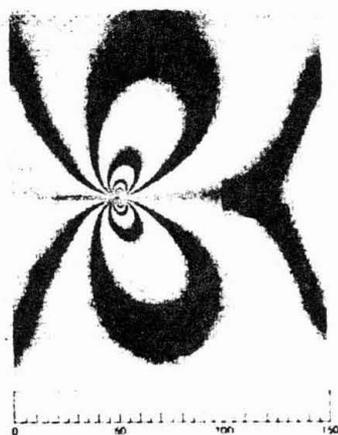


Figura 17. Informações sobre a imagem mostrada

REGUA INCLINADA - Res. 150 dpi

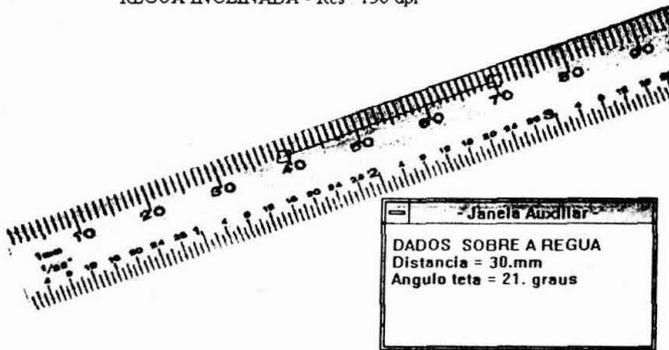
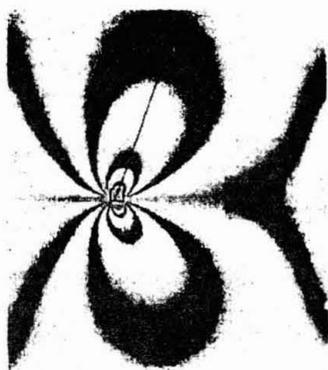


Figura 18. Obtenção do valor da distância sobre uma régua, numa situação inclinada, utilizando régua eletrônica.

Resolução : 150 dpi



Figura 19. Obtenção do valor da distância sobre uma escala, utilizando a régua eletrônica.



- Janelia Auxiliar -	
FATOR DE INTENSIDADE DE TENSÕES	
Modo de abertura (KI)	
Mecânica da Fratura Linear Elástica	
Metodologia - Irwin / Uma só franja	
Constante fotoelástica = 23640.N/m	
Espessura material = 6.mm	
Franja ordem = 2.	
Razo máximo [r] = 73.6766mm	
Angulo teta = 71.9957 graus	
KI = 6.61928 MPa.m[1/2]	

Figura 20. Simulação do cálculo do fator de intensidade de tensões K_I (modo de abertura)

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] FROCHT, M. M. **Photoelasticity**. New York : John Wiley, v.2, 1948.
- [2] FROCHT, M. M. **Fotoelasticidad**. Tucumán, Argentina : John Wiley, tomo I, 1950.
- [3] THEOCARIS, P. S. & GDOUTOS, E. E. A photoelastic determination of KI stress-intensity factors. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 7, p. 331-339, 1975.
- [4] SANFORD, R. J. & DALLY, J. W. A general method for determining mixed-mode stress intensity factors from isochromatic fringe patterns. **Engineering Fracture Mechanics**, v.11, p.621-633, 1979.
- [5] MARLOFF, R. H. et al. Photoelastic determination of stress intensity factors. **Experimental Mechanics**, v. 11, n. 12, p. 529-539, 1971.
- [6] DALLY, J.W. & SANFORD, R.J. Classification of stress-intensity factors from isochromatic-fringe patterns. **Experimental Mechanics**, v.18, n. 2, p.441-448, 1978.
- [7] ETHERIDGE, J. M. & DALLY, J. W. A Critical review of methods for determining stress-intensity factors from isochromatic fringes. **Experimental Mechanics**, v. 17, n.7, p.248-254, 1977.
- [8] MISKIOGLU, I. et al. Stress intensity factors for near edge cracks by digital image analysis. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 27, n. 3, p.329-343, 1987.
- [9] YATAGAI, T. et al. Automatic fringe analysis using digital image processing techniques. **Optical Engineering**, v.21, n.33,p. 432-435, 1982.

- [10] CHEN, T. Y. & TAYLOR, C. E. Computerized fringe analysis in photomechanics. **Experimental Mechanics**, v.29, p. 323-329, 1989.
- [11] RAMESH, K. Digital image processing of fringe patterns in photomechanics. **Optical Engineering**, v.31, n. 7, p.1487-1479, 1992.
- [12] KHADAKKAR, A. G. et al. Fringe tracing by image processing. **Optical Engineering**, v.33, n.6, p.1872-1875, 1994.
- [13] SOARES, W.A. SIMFOT : **Software para simulação de experimento fotoelástico**. Brasília, 1994. (Primeiro prêmio na categoria Educacional / Pós-Graduação do Concurso Nacional de Software Tecnológico e Educacional).
- [14] Catenary System Inc. Victor Image processing Library for Windows, St Louis, 1994.
- [15] HUSSAIN, Z. **Digital image processing**. New York, Ellis Horwood, 1991.
- [16] DALLY, J. M. e RILEY, W. F. **Experimental stress analysis**. New York : McGraw-Hill, 1991.

FOTOEL : A DIGITAL PROCESSING SYSTEM OF PHOTOELASTIC IMAGES FOR COMPUTING THE K_I FRACTURE MECHANICS PARAMETER.

The goal of this work is to present the digital image processing system called FOTOEL , which by analysing photoelastic images, allows the computation of the K_I stress-intensity factor in the fracture opening mode. From geometrical information extracted from the isochromatics in the region near a tip crack, it is possible to compute the K_I factor. For obtaining such geometrical values, it is first necessary to perform digital operation on the image in order to improve the quality of the image for purpose of making the skeletonization and thinning operations on the image. The FOTOEL system was developed using the *Visual C* language for operating in the *Windows/DOS* environment, and was based on the *VicWin* image development kit. The images to be analysed by the system should be in gray levels, which are generated in a polariscope fed with monochromatic light. The system has also a module for simulating a photoelastic experiment, in which synthetic 228-gray level images are generated. Options are available for selecting the polariscope arrangement and some basic types of structural models.

stress-intensity factor, photoelasticity, digital image processing