



**CNEN/SP**

**ipen** Instituto de Pesquisas  
Energéticas e Nucleares

AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE  
DE SÃO PAULO

**DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DA MECÂNICA DE  
FRATURA A PARTIR DE IMAGENS FOTOELÁSTICAS,  
USANDO PROCESSAMENTO DIGITAL**

**WELLINGTON ANTONIO SOARES**

**Tese apresentada como parte dos  
requisitos para obtenção do Grau de  
Doutor em Ciências na Área de  
Reatores Nucleares de Potência e  
Tecnologia do Combustível Nuclear.**

**Orientador:**

**Prof. Dr. Arnaldo Homobono Paes de  
Andrade**

**São Paulo**

**1997**

**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**  
**Autarquia Associada à Universidade de São Paulo**

**DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DA MECÂNICA DE  
FRATURA A PARTIR DE IMAGENS FOTOELÁSTICAS,  
USANDO PROCESSAMENTO DIGITAL**

**WELLINGTON ANTONIO SOARES**

Tese apresentada como parte dos requisitos  
para obtenção do Grau de Doutor em Ciências  
na Área de Reatores Nucleares de Potência e  
Tecnologia do Combustível Nuclear.

**Orientador : Prof. Dr. Arnaldo Homobono Paes de Andrade**

**São Paulo**



**1997**

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Lino Soares de Souza (*in memoriam*) e Misblande Maria de Souza (dona Mãezinha). Dedico, ainda, em especial à minha esposa Sandra Eliana Correa Soares e aos meus filhos Wellington Antonio Soares Júnior e Guilherme Correa Soares, os quais foram os mais prejudicados pela minha ausência física e espiritual durante a etapa de realização desta tese.

## AGRADECIMENTOS

Ao Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear - CDTN e ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN, pela oportunidade que me deram em poder conciliar as minhas atividades técnicas normais com a realização deste trabalho de tese. Ao Centro Tecnológico da Marinha - CTMSP, pelo apoio com hospedagem, em São Paulo, durante a obtenção de créditos do doutorado.

Ao Dr. Arnaldo Homobono Paes de Andrade, pela pronta aceitação em orientar este trabalho e pela contribuição na parte técnica da tese e na agilização dos trâmites burocráticos junto ao Curso de Pós-graduação.

Ao Dr. Fernando Soares Lameiras, um dos grandes incentivadores da renovação do quadro de doutores do CDTN. À Dra. Solange Vaz Coelho, pelo apoio e entusiasmo com a realização deste trabalho. Ao Dr. Waldemar Augusto de A. Macedo, um dos grandes facilitadores do meu deslocamento para São Paulo, durante a realização do doutorado.

Aos colegas de trabalho, Tânius Rodrigues Mansur, Geraldo de Paula Martins, Marcos Carneiro de Andrade e Vanderley de Vasconcelos, que leram cuidadosamente esta tese e a enriqueceram com suas sugestões e correções. Ao colega Lúcio Carlos Martins Pinto, pelo apoio na área de computação. A pesquisadores, tecnologistas, técnicos de nível médio, bibliotecárias e secretárias do CDTN e do IPEN e outras pessoas que porventura tenha esquecido de citar, que, direta ou indiretamente, contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos doutores José Luiz de França Freire e Marco Antônio M. Cavaco, pelo apoio na obtenção experimental de isocromáticas em ponta de trinca, no laboratório de fotomecânica da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Ao professor Sílvio Túlio Corrêa, pela revisão do texto da tese em relação à língua portuguesa.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais - FAPEMIG, pelo apoio financeiro na apresentação de trabalhos em Congressos e Seminários no Brasil.

# DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DA MECÂNICA DE FRATURA A PARTIR DE IMAGENS FOTOELÁSTICAS, USANDO PROCESSAMENTO DIGITAL

WELLINGTON ANTONIO SOARES

## RESUMO

O fator de intensidade de tensões é um dos parâmetros da Mecânica Elástica Linear de Fratura utilizados para garantir a segurança de estruturas contra a propagação de trincas. A fotoelasticidade é uma técnica experimental de análise de tensões que pode ser usada na determinação deste fator, com base em parâmetros geométricos de franjas isocromáticas na ponta de trincas, em modelo constituído de material birrefringente. No caso de isocromáticas em matizes de uma mesma cor, os dados de interesse são os pontos onde ocorre a extinção da luz. Estes pontos podem ser obtidos por meio de operações de Processamento de Imagens Digitais, disponíveis para imagens em níveis de cinza. Um exemplo típico destas operações é o algoritmo de afinamento, com o qual são obtidas as linhas médias centrais das franjas, com um *pixel* de espessura, formando laços com origem na ponta da trinca. Os raios que unem a ponta da trinca a pontos destes laços e respectivos ângulos são os dados básicos usados para obtenção do fator de intensidade de tensões.

Neste trabalho, é desenvolvido um sistema de processamento de imagens digitais, FOTOEL, para análise de franjas isocromáticas, em níveis de cinza, tendo recursos específicos para cálculo do fator de intensidade de tensões,  $K_I$ , correspondente ao modo de carregamento de trinca por abertura. São implementados os métodos de dois parâmetros, de Irwin e de Schroedl & Smith, e o método superdeterminístico, de vários parâmetros, de Dally. O sistema foi desenvolvido para ambiente *Windows*<sup>TM</sup>, com base na linguagem C, para microcomputadores compatíveis com *IBM-PC*<sup>TM</sup>. É feita uma revisão dos fundamentos de Fotoelasticidade, Mecânica Elástica Linear de Fratura, Processamento de Imagens Digitais e Métodos Numéricos utilizados para cálculo de  $K_I$  com base na técnica fotoelástica. Alguns exemplos de isocromáticas, geradas por computador ou experimentalmente, são processados com o sistema desenvolvido. Os resultados obtidos são compatíveis com valores previamente conhecidos, no caso de isocromáticas geradas por computador, ou com dados obtidos em trabalhos de outros pesquisadores.

# **DETERMINATION OF FRACTURE MECHANICS PARAMETERS FROM PHOTOELASTIC IMAGES USING DIGITAL PROCESSING**

**WELLINGTON ANTONIO SOARES**

## **ABSTRACT**

The stress intensity factor is one of the Linear Elastic Fracture Mechanics parameters used for assuring safety of structures against crack propagation. Photoelasticity is an experimental stress analysis technique that can be used for determining this factor based on geometrical parameters from isochromatic fringes at crack tip in birefringent models. Regions where light extinction occurs are the key points, in case of images with a same color hue. Digital Image Processing gray levels algorithms can be used for obtaining these points. Thinning operations are typical examples of such algorithms. Its applications produces medial central lines, generating one pixel width fringe loops having the origin at crack tip. The radius connecting crack tip to points on these fringe loops and related angles are basic values used for computing the stress intensity factor.

A computer-based system, named FOTOEL, for digital image processing of gray isochromatic images, with resource for computing the stress intensity factor for the opening mode,  $K_I$ , is developed in this thesis. Two-parameters methods of Irwin and Schroedl & Smith, and the overdeterministic method of Dally are the numerical procedures implemented in FOTOEL. The system has been developed in Windows™, using C language for compatible IBM-PC™ microcomputers. An overview of the fundamentals of Photoelasticity, Linear Elastic Fracture Mechanics, Digital Image Processing and Numerical Methods used for calculating  $K_I$  from photoelastic technique is done. Synthetic isochromatic generated by computer and experimental isochromatics are processed by FOTOEL. Results are compatible with prescribed values, in case of synthetic images, and with results found in the technical literature in case of experimentally generated images.

# **DETERMINATION OF FRACTURE MECHANICS PARAMETERS FROM PHOTOELASTIC IMAGES USING DIGITAL PROCESSING**

**WELLINGTON ANTONIO SOARES**

## **ABSTRACT**

The stress intensity factor is one of the Linear Elastic Fracture Mechanics parameters used for assuring safety of structures against crack propagation. Photoelasticity is an experimental stress analysis technique that can be used for determining this factor based on geometrical parameters from isochromatic fringes at crack tip in birefringent models. Regions where light extinction occurs are the key points, in case of images with a same color hue. Digital Image Processing gray levels algorithms can be used for obtaining these points. Thinning operations are typical examples of such algorithms. Its applications produces medial central lines, generating one pixel width fringe loops having the origin at crack tip. The radius connecting crack tip to points on these fringe loops and related angles are basic values used for computing the stress intensity factor.

A computer-based system, named FOTOEL, for digital image processing of gray isochromatic images, with resource for computing the stress intensity factor for the opening mode,  $K_I$ , is developed in this thesis. Two-parameters methods of Irwin and Schroedl & Smith, and the overdeterministic method of Dally are the numerical procedures implemented in FOTOEL. The system has been developed in Windows™, using C language for compatible IBM-PC™ microcomputers. An overview of the fundamentals of Photoelasticity, Linear Elastic Fracture Mechanics, Digital Image Processing and Numerical Methods used for calculating  $K_I$  from photoelastic technique is done. Synthetic isochromatic generated by computer and experimental isochromatics are processed by FOTOEL. Results are compatible with prescribed values, in case of synthetic images, and with results found in the technical literature in case of experimentally generated images.

## SIGLAS E MARCAS REGISTRADAS CITADAS

### SIGLAS

CDTN - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear

MELF - Mecânica Elástica Linear de Fratura

PID - Processamento de Imagens Digitais

PUC/RIO - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

### MARCAS REGISTRADAS

As marcas registradas que aparecem neste trabalho são de propriedade de seus titulares, sendo citadas apenas como referência. São relacionadas, a seguir, as marcas citadas:

- *Microsoft, Visual C ++, Windows, Windows 95, MS-DOS - Microsoft Corporation;*
- *HP e Hewlett-Packard : Hewlett-Packard Corporation;*
- *IBM, PC - IBM Corporation;*
- *Victor - Catenary Systems;*
- *Panasonic, Hitachi, INSTRON.*



## SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 FUNDAMENTOS DE FOTOELASTICIDADE.....	9
2.1 Introdução.....	9
2.2 Revisão bibliográfica.....	13
2.3 Tensões principais e estado plano de tensões.....	14
2.4 Polarização da luz.....	15
2.5 Material com birrefringência mecânica.....	15
2.6 Polariscópio.....	17
2.6.1 Polariscópio plano.....	17
2.6.2 Polariscópio circular.....	20
2.6.2.1 Polariscópio circular / campo escuro.....	20
2.6.2.2 Polariscópio circular / campo claro.....	21
2.7 Técnicas auxiliares na fotoelasticidade.....	22
3 FUNDAMENTOS DA MECÂNICA ELÁSTICA LINEAR DE FRATURA.....	25
3.1 Introdução.....	25
3.2 Tensões singulares em defeitos do tipo trinca.....	26
3.3 Modos de carregamento de uma trinca e fator de intensidade de tensões.....	27
3.4 Equações para o campo de tensões nas vizinhanças da ponta da trinca.....	29
3.4.1 Campo de tensões na região muito próxima da ponta da trinca.....	31
3.4.1.1 Modo I - carregamento por abertura.....	32
3.4.1.2 Modo II - carregamento por cisalhamento.....	32
3.4.2 Campo de tensões na região próxima da ponta da trinca.....	32
3.4.2.1 Modo I - carregamento por abertura.....	33
3.4.2.2 Modo II - carregamento por cisalhamento.....	33
3.5 Tenacidade à fratura.....	34

	Página
4 FOTOELASTICIDADE APLICADA À MECÂNICA DE FRATURA.....	36
4.1 Introdução.....	36
4.2 Determinação de $K_I$ por métodos de dois parâmetros.....	37
4.2.1 Método de Irwin.....	38
4.2.2 Método de Smith & Schroedl.....	44
4.2.3 Comentários sobre a precisão dos métodos de dois parâmetros.....	45
4.3 Determinação de $K_I$ por métodos de vários parâmetros.....	45
4.3.1 Método superdeterminístico de Dally.....	46
4.4 Trabalhos sobre uso da fotoelasticidade na obtenção de parâmetros da Mecânica de Fratura.....	50
5 PROCESSAMENTO DE IMAGENS DIGITAIS.....	51
5.1 Conceitos básicos de processamento de imagens digitais.....	51
5.1.1 Imagem digital e <i>pixel</i> .....	51
5.1.2 Paleta de cores e escala de cinza.....	52
5.1.3 Tipos de imagens.....	53
5.1.4 Histograma de uma imagem.....	53
5.1.5 Digitalização de imagens.....	54
5.2 Operações de processamento de imagens digitais.....	55
5.2.1 Filtros pontuais e exemplos de aplicação a uma imagem isocromática.....	59
5.2.2 Filtros espaciais e exemplos de aplicação.....	62
5.2.3 Algoritmos de esqueletonização.....	65
5.2.4 Algoritmo de afinamento de imagens binárias.....	66
5.2.5 Exemplos de aplicação dos algoritmos de afinamento .....	67
6 IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA FOTOEL.....	70
6.1 Introdução.....	70
6.2 Descrição dos módulos que compõem o sistema FOTOEL.....	72
6.2.1 Descrição do Módulo de Imagens.....	72
6.2.1.1 Digitalização da imagem.....	72

	Página
6.2.1.2 Pré-processamento digital.....	73
6.2.1.3 Processamento digital.....	75
6.2.1.4 Rotulação de franjas.....	75
6.2.1.5 Operações da Mecânica de Fratura.....	75
6.2.1.6 Emissão de resultados.....	75
6.2.2 Descrição do Módulo de Arquivos.....	76
6.3 Descrição detalhada das interfaces gráficas.....	76
6.3.1 Descrição da interface FOTOFRAN.....	77
6.3.1.1 Descrição das funções do menu horizontal.....	79
6.3.1.2 Descrição das funções do menu vertical.....	80
6.3.1.3 Ilustração de algumas funções realizadas com a interface FOTOFRAN.....	81
6.3.2 Descrição da interface FOTOVER.....	84
6.4 Comentários sobre implementação dos algoritmos mais importantes de FOTOEL.....	89
6.5 Exemplos das etapas de processamento de isocromáticas com FOTOFRAN.....	93
6.6 Recomendações para uso do sistema FOTOEL.....	99
7 EQUIPAMENTOS E MATERIAIS UTILIZADOS NA GERAÇÃO DE IMAGENS FOTOELÁSTICAS.....	100
7.1 Equipamentos, materiais e <i>software</i> de simulação de isocromáticas.....	100
7.1.1 Fase de estudos básicos de fotoelasticidade e de aquisição de imagens fotoelásticas.....	100
7.1.2 Simulação de imagens isocromáticas por computador.....	104
7.2 Isocromática digitalizada com a ajuda de um <i>scanner</i> HP de mesa.....	107
7.3 Equipamentos e materiais da PUC/RIO.....	109
7.4 Equipamentos e materiais adquiridos pelo CDTN para o sistema FOTOEL.....	114
8 APLICAÇÃO DO SISTEMA FOTOEL A CASOS EXEMPLOS.....	116
8.1 Introdução.....	116
8.2 Aplicação dos métodos de dois parâmetros.....	116
8.2.1 Método de Irwin.....	116

	Página
8.2.2 Método de Smith & Schroedl.....	118
8.3 Aplicação do método de Dally - análise superdeterminística.....	120
8.3.1 Considerações sobre amostragem de franjas e convergência do método....	120
8.3.2 Aplicação à isocromática sintética gerada por computador.....	123
8.3.3 Aplicação à isocromática digitalizada, com <i>scanner</i> , a partir de um artigo de Oladimeji.....	125
8.3.3.1 Isocromática com franjas de ordem fracionária.....	125
8.3.3.2 Isocromática de ordem inteira, obtida a partir de operações de PID sobre isocromática de ordem fracionária.....	126
8.3.4 Aplicação a isocromáticas obtidas experimentalmente na PUC/RIO.....	127
8.3.4.1 Isocromática com franjas de ordem inteira.....	127
8.3.4.2 Isocromática com franjas de ordem fracionária.....	127
9 CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	130
APÊNDICE I -MÓDULO DE SIMULAÇÃO DO <i>SOFTWARE</i> FOTOFRAN.....	132
APÊNDICE II - LISTAGEM DE RESULTADOS DO PROCESSAMENTO DE ISOCROMÁTICAS EM PONTA DE TRINCA COM OS <i>SOFTWARES</i> FOTOFRAN E FOTOVER.....	137
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	157

## LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1 - O sistema FOTOEL e as grandes áreas envolvidas no trabalho.....	4
Figura 2 - Diagrama de blocos relacionando os capítulos da tese.....	5
Figura 3 - Ilustração de imagem fotoelástica num experimento com luz branca, mostrando a seqüência de cores geradas.....	10
Figura 4 - Equipamentos e materiais envolvidos na geração de imagens fotoelásticas.	11
Figura 5 - Isocromática gerada experimentalmente num disco de material birrefringente iluminado com luz branca.....	12
Figura 6 - Isocromática gerada por simulação com computador, para um disco de material birrefringente, na condição de luz monocromática.....	12
Figura 7 - Elemento de estado plano de tensões, mostrando as tensões pertinentes.....	14
Figura 8 - Ilustração das polarizações da luz (plana e circular).....	15
Figura 9 - Esquema ilustrando o fenômeno da birrefringência mecânica.....	16
Figura 10 - Formas comerciais de materiais birrefringentes.....	16
Figura 11 - Esquema do polariscópio plano, mostrando o arranjo das lentes e modelo..	18
Figura 12 - Imagens de um experimento fotoelástico com polariscópio plano e luz monocromática para uma chapa com furo circular, tracionada na direção vertical.....	19
Figura 13 - Elementos de tensões principais ao longo de isóclinas em disco birrefringente.....	19
Figura 14 - Esquema das lentes de um polariscópio circular (campo escuro).....	20
Figura 15 - Isocromáticas numa chapa de material birrefringente com furo circular e tracionada na direção vertical (polariscópio circular com luz monocro- mática).....	21
Figura 16 - Tensões na borda de um furo circular em uma chapa furada sob tração.....	22
Figura 17 - Ilustração de franja de ordem inteira, na extremidade mais carregada do furo.....	23
Figura 18 - Tensão máxima na borda de um furo elíptico de uma placa infinita.....	27

	Página
Figura 19 - Modos de carregamentos de uma trinca com base nos quais são definidos os fatores $K_I$ , $K_{II}$ e $K_{III}$ .....	27
Figura 20 - Sistema de coordenadas cartesianas e cilíndricas na ponta de uma trinca.....	28
Figura 21 - Placa infinita com carregamento nas direções x e y e sistema de coordenadas.....	29
Figura 22 - Variação de $K_I$ em função de $\sigma_0$ , para diferentes tamanhos de trinca.....	29
Figura 23 - Zonas 1, 2 e 3 nas vizinhanças da ponta da trinca.....	30
Figura 24 - Relação entre $K_I$ crítico e espessura h de uma chapa.....	35
Figura 25 - Isocromática na ponta de uma trinca, gerada por computador, com base nas equações do campo de tensões de Westergaard.....	38
Figura 26 - Isocromática na ponta de uma trinca, obtida experimentalmente.....	38
Figura 27 - Informações geométricas ( $r_m$ e $\theta_m$ ) referentes ao método de Irwin.....	39
Figura 28 - Isocromática na ponta de uma trinca, gerada por computador com base nas equações de Westergaard e modificadas pelo fator de tensão $\sigma_{0x}$ de Irwin.....	40
Figura 29 - Variação de $K_I / [2\tau_m (2 \pi r_m)^{1/2}]$ em função do ângulo $\theta$ ( 0 a 180 graus)....	43
Figura 30 - Variação de $K_I / [2\tau_m (2 \pi r_m)^{1/2}]$ em função do ângulo $\theta$ ( 63 a 180 graus)...	43
Figura 31 - Franjas isocromáticas obtidas experimentalmente.....	46
Figura 32 - Escala de 256 níveis de cinzas.....	52
Figura 33 - Ilustração de uma imagem em níveis de cinza e respectivo histograma.....	54
Figura 34 - Exemplo de uma imagem digitalizada com várias resoluções espaciais.....	55
Figura 35 - Esquema do processo de digitalização de imagens.....	56
Figura 36 - Transformação de binarização.....	57
Figura 37 - Ilustração da operação de binarização.....	57
Figura 38 - Transformação negativo.....	57
Figura 39 - Ilustração do negativo de uma imagem.....	57
Figura 40 - Transformação de brilho.....	58
Figura 41 - Transformação de contraste.....	58
Figura 42 - Transformação de limite de nível de cinza a um valor máximo.....	59
Figura 43 - Transformação de limiar acima.....	59
Figura 44 - Transformação de multiplicação.....	59
Figura 45 - Transformação de troca de nível de intensidade.....	59

	Página
Figura 46 - Transformação tipo dente de serra.....	60
Figura 47 - Visão geral dos resultados de aplicação dos filtros pontuais a uma isocromática.....	61
Figura 48 - Máscaras de 3x3 e de 5x5.....	62
Figura 49 - Ilustração dos filtros de média e de mediana em termos de <i>pixels</i> .....	62
Figura 50 - Aplicação dos filtros de média e mediana sobre uma mesma imagem.....	63
Figura 51 - Exemplo de histograma de uma imagem.....	64
Figura 52 - Imagem submetida à equalização histogrâmica e respectivo histograma.....	64
Figura 53 - Convolução da imagem com uma máscara (matriz de 3x3) fornecida.....	65
Figura 54 - Máscara para esqueletonização.....	66
Figura 55 - Máscara para afinamento.....	67
Figura 56 - Efeito dos filtros de média e mediana sobre as operações de esqueleto- nização e de afinamento.....	68
Figura 57 - Exemplo de aplicação do algoritmo de afinamento, mostrando a importância do pré-processamento.....	69
Figura 58 - Ilustração dos <i>softwares</i> que compõem o sistema FOTOEL.....	70
Figura 59 - Esquema global de etapas relacionadas com a utilização do sistema FOTOEL.....	71
Figura 60 - Digitalização de franjas isocromáticas.....	73
Figura 61 - Tela de apresentação do <i>software</i> FOTOFRAN.....	77
Figura 62 - Visão geral dos itens contidos no menu horizontal de FOTOFRAN.....	78
Figura 63 - Visão geral dos itens contidos no menu vertical de FOTOFRAN.....	78
Figura 64 - Janela de diálogo para controle de <i>scanner</i> .....	82
Figura 65 - Digitalização de isocromática com <i>scanner</i> controlado por FOTOFRAN....	82
Figura 66 - Janela de diálogo para impressão de imagem.....	83
Figura 67 - Ilustração do uso da função <i>zoom</i> em FOTOFRAN.....	83
Figura 68 - Ilustração do fluxo de arquivos entre os <i>softwares</i> FOTOFRAN e FOTOVER.....	84
Figura 69 - Tela de apresentação do <i>software</i> FOTOVER.....	87
Figura 70 - Ilustração do menu relativo ao item Método Superdeterminístico.....	87
Figura 71 - Ilustração de janelas referentes ao item de reamostragem de franjas.....	88
Figura 72 - Ilustração de janela referente ao item de cálculo de $K_I$ .....	88
Figura 73 - Ilustração de janelas referentes ao item de Editar Arquivos.....	89

	Página
Figura 74 - Diagrama de blocos do algoritmo usado para rotulação de franjas.....	90
Figura 75 - Diagrama de blocos do algoritmo usado para amostragem de franjas por faixas angulares.....	91
Figura 76 - Esquema da divisão dos setores para amostragem por faixas angulares.....	91
Figura 77 - Diagrama de blocos do algoritmo usado para amostragem de franjas por pontos.....	92
Figura 78 - Esquema da amostragem de laço de franjas pela amostragem por pontos....	93
Figura 79 - Carregamento de isocromática em FOTOFRAN.....	93
Figura 80 - Seleção da resolução espacial da imagem e do fator de ampliação.....	94
Figura 81 - Localização da ponta da trinca com o <i>mouse</i> .....	94
Figura 82 - Resultado da operação de Esqueletonização (opção BIN).....	95
Figura 83 - Resultado da operação de Afinamento.....	95
Figura 84 - Resultado da operação de edição com Lápis borracha.....	96
Figura 85 - Entrada de dados precedendo à rotulação de franjas.....	96
Figura 86 - Resultado da rotulação de franjas.....	97
Figura 87 - Seleção dos métodos de cálculo de $K_I$ .....	97
Figura 88 - Seleção do tipo de amostragem para o método superdeterminístico.....	98
Figura 89 - Operação XOR entre a imagem original e as franjas afinadas finais.....	98
Figura 90 - Utilização da opção Régua para medir distâncias.....	99
Figura 91 - Experimento fotoelástico com disco birrefringente sob compressão.....	101
Figura 92 - Esquema do carregamento da viga de alumínio, revestida com uma camada de material birrefringente, tendo um chanfro concentrador de tensões.....	102
Figura 93 - Equipamentos básicos usados na aquisição de imagens fotoelásticas na viga de alumínio da Figura 92.....	102
Figura 94 - Variação da isocromática em uma viga de alumínio com um chanfro, revestida com material birrefringente, em função da carga aplicada.....	103
Figura 95 - Isocromática sintética na região muito próxima da ponta da trinca.....	105
Figura 96 - Isocromática sintética, na região muito próxima da ponta da trinca, ilustrando a franja de ordem 4.....	105
Figura 97 - Isocromática sintética na região próxima da ponta da trinca.....	106
Figura 98 - Isocromática sintética, na região próxima da ponta da trinca, ilustrando a franja de ordem 2.....	106



	Página
Figura 99 - Isocromática gerada com polariscópio circular - campo claro (Oladimeji)..	107
Figura 100 - Digitalização da região próxima da ponta da trinca, com base na isocromática da Figura 99.....	108
Figura 101 - Isocromática, com franjas de ordem inteira, obtida com aplicação de operações de PID, sobre a imagem da Figura 100.....	109
Figura 102 - Polariscópio de transmissão, adaptado a um projetor de perfil, tendo fator de ampliação de 10 vezes (PUC/RIO).....	110
Figura 103 - Visão geral de um polariscópio de transmissão da PUC/RIO.....	110
Figura 104 - Geometria e dimensões de modelo birrefringente.....	111
Figura 105 - Detalhes da trinca no modelo birrefringente.....	111
Figura 106 - Franjas isocromáticas de ordem inteira, para modelo birrefringente, com trinca pré-fabricada e analisadas sob o polariscópio da Figura 102.....	112
Figura 107 - Franjas isocromáticas de ordem fracionária, para modelo birrefringente, com trinca pré-fabricada e analisadas sob o polariscópio da Figura 102...	112
Figura 108 - Isocromática com escala (faixa com 1 cm de largura) superposta, para controle de dimensões.....	113
Figura 109 - Franjas isocromáticas de ordem inteira, para modelo birrefringente, com trinca pré-fabricada e analisadas sob o polariscópio da Figura 103...	113
Figura 110 - Equipamentos adquiridos para o sistema FOTOEL.....	114
Figura 111 - Materiais birrefringentes e acessórios adquiridos em apoio ao sistema FOTOEL.....	115
Figura 112 - Isocromática sintética, com franjas de ordem inteira, na região <i>muito próxima</i> da ponta da trinca.....	117
Figura 113 - Superposição de franjas afinadas sobre a isocromática da Figura 112.....	117
Figura 114 - Isocromática na região próxima da ponta da trinca.....	120
Figura 115 - Verificação do tipo de amostragem sobre o valor de $K_I$ .....	121
Figura 116 - Franjas isocromáticas de ordem fracionária, selecionadas para amostragem.....	122
Figura 117 - Influência do número de pontos amostrados sobre o valor de $K_I$ .....	122
Figura 118 - Influência do número de pontos de amostragem sobre a tensão $\sigma_{0x}$ .....	123
Figura 119 - Isocromática sintética na região <i>próxima</i> da ponta da trinca.....	124
Figura 120 - Superposição de franjas afinadas sobre a isocromática da Figura 119.....	124

	Página
Figura 121 - Superposição de franjas inteiras afinadas sobre a imagem original.....	126
Figura 122 - Superposição de franjas inteiras e afinadas sobre isocromática da Figura 106.....	128
Figura 123 - Superposição de franjas fracionárias afinadas sobre isocromática da Figura 107.....	129
Figura 124 - Ilustração dos <i>softwares</i> que compõem o sistema FOTOEL.....	132
Figura 125 - Visão geral dos itens contidos nos menus horizontal e vertical do módulo de simulação do <i>software</i> FOTOFRAN.....	133
Figura 126 - Ilustração do módulo de simulação (arranjo do polariscópio, controle de carga e geração de isocromática).....	135
Figura 127 - Simulação de imagens fotoelásticas para várias condições do polariscópio.....	135
Figura 128 - Ilustração do menu de apoio na parte teórica de fotoelasticidade.....	136

## LISTA DE QUADROS

	Página
Quadro 1 - Itens contidos no menu horizontal de FOTOFRAN.....	79
Quadro 2 - Itens contidos no menu vertical de FOTOFRAN.....	81
Quadro 3 - Conteúdo de arquivos-textos utilizados em FOTOVER.....	85
Quadro 4 - Descrição de alguns itens contidos no menu horizontal de FOTOVER.....	86
Quadro 5 - Propriedades geométricas do modelo birrefringente.....	111
Quadro 6 - Resultados de $K_I$ pelo método de Irwin (franjas superiores).....	118
Quadro 7 - Resultados de $K_I$ pelo método de Irwin (franjas inferiores).....	118
Quadro 8 - Resultados do método de Smith referentes à faixa de ângulos positivos.....	119
Quadro 9 - Resultados do método de Smith referentes à faixa de ângulos negativos.....	110
Quadro 10 - Valores finais de $K_I$ e erros absolutos e relativos - método de Smith.....	120
Quadro 11 - Resultados de $K_I$ pelo método superdeterminístico para isocromática sintética.....	123
Quadro 12 - Resultados de $K_I$ , pelo método superdeterminístico, para isocromática, com franjas de ordem fracionária, digitalizada com <i>scanner</i> .....	125
Quadro 13 - Resultados de $K_I$ , pelo método superdeterminístico, para isocromática com franjas de ordem inteira, obtida por operações de PID.....	127
Quadro 14 - Resultados de $K_I$ , pelo método superdeterminístico, para isocromática com franjas de ordem inteira, gerada experimentalmente.....	128
Quadro 15 - Resultados de $K_I$ , pelo método superdeterminístico, para isocromática com franjas de ordem fracionária, gerada experimentalmente.....	129
Quadro 16 - Itens do menu horizontal do Módulo de Simulação de FOTOFRAN.....	134
Quadro 17 - Itens do menu vertical do Módulo de Simulação de FOTOFRAN.....	134

## 1 INTRODUÇÃO

Estruturas e equipamentos do nosso dia-a-dia convivem, em maior ou menor grau, com a presença de descontinuidades. Estas podem estar presentes na forma de defeitos básicos nos materiais constituintes, podem ser introduzidas durante o processo de fabricação ou, ainda, surgir em função da própria utilização da estrutura ou do equipamento. Estruturas de grande responsabilidade, tais como vasos de pressão utilizados em usinas nucleares, cascos de navios e aeronaves, podem sofrer falhas severas em função da propagação de trincas, se não forem adequadamente projetadas. O fenômeno da fragilização dos materiais pela ação da radiação levam fatalmente à formação de trincas nos materiais. Assim, o estudo de metodologias que levam em conta a influência de trincas no desempenho mecânico de estruturas e equipamentos é uma parte de relevância dentro do escopo de projeto de usinas nucleares.

As teorias convencionais de projeto de estruturas levam em consideração a resistência do material e fatores de concentração de tensões em furos e reentrâncias, não considerando, entretanto, a existência de defeitos e de pequenas trincas já existentes nos materiais ou que venham a surgir com a utilização da estrutura.

A Mecânica de Fratura é uma ferramenta utilizada para analisar materiais ou estruturas contendo trincas e fornecer respostas quantitativas para efeito de projeto. As trincas são defeitos que apresentam singularidades, do ponto de vista de cálculo de tensões na sua ponta. Para contornar este problema, nos desenvolvimentos iniciais da Mecânica de Fratura, foi proposta a utilização do fator de intensidade de tensões  $K$ , o qual leva em conta o esforço aplicado sobre a estrutura e a dimensão da trinca presente na estrutura. Com base neste fator, pode-se tomar decisões quanto à segurança da estrutura contendo trincas, comparando-se o valor de  $K$  com o valor da tenacidade à fratura  $K_c$  do material. Para materiais com baixa tenacidade, o mecanismo que governa a falha da estrutura é a fratura frágil. Neste caso, a tensão crítica de falha varia de forma linear com a tenacidade. Este problema é tratado na Mecânica Elástica Linear de Fratura (MELF). Dependendo da forma

de aplicação do carregamento, em relação ao plano que contém a trinca, encontram-se na literatura as denominações de modos I, II e III, correspondendo, respectivamente, aos modos de carregamento da trinca por abertura ( $K_I$ ), cisalhamento ( $K_{II}$ ) e rasgamento ( $K_{III}$ ), os quais podem ocorrer separados ou isoladamente. O modo de abertura, avaliado através do parâmetro  $K_I$ , em geral é o mais crítico e o que ocorre com maior frequência na prática.

A determinação do fator de intensidade de tensões, por meio de soluções analíticas, só é possível para casos em que a geometria e forma de carregamento são relativamente simples; para casos mais complicados, é necessária a utilização de técnicas numéricas ou experimentais. Entre as técnicas experimentais, pode-se citar a fotoelasticidade. Os padrões de franjas isocromáticas fornecidos pela fotoelasticidade, nas vizinhanças da ponta da trinca, permitem a determinação do fator de intensidade de tensões  $K$ .

A fotoelasticidade, uma técnica de análise experimental de tensões, faz uso das propriedades de *birrefringência mecânica* apresentada por alguns materiais não-cristalinos, quando submetidos a esforços. Nestas condições, quando iluminados com luz polarizada de um polariscópio, estes materiais produzem imagens que são um reflexo das tensões induzidas nos mesmos pelos esforços aplicados. O interessante desta técnica, é que se consegue relacionar as tensões e deformações no material fotoelástico com a imagem gerada no experimento. Os pesquisadores Irwin, Post, Wells e Sanford descobriram que era possível relacionar o fator de intensidade de tensões com dados geométricos extraídos das franjas isocromáticas geradas nas vizinhanças da ponta de uma trinca, em um modelo constituído de material birrefringente.

Irwin, Smith & Schroedl desenvolveram métodos de cálculo de  $K_I$  com base em franjas isocromáticas situadas numa região *muito próxima* da ponta da trinca. Estes métodos são bastante sensíveis a erros na determinação de parâmetros geométricos das franjas (raios e ângulos). Dally desenvolveu um outro método, conhecido como método *superdeterminístico*, onde o valor de  $K_I$  é feito com base em franjas situadas numa região um pouco mais ampla, denominada região *próxima* da ponta da trinca. Existem outros métodos, não abordados nesta tese, em que é possível utilizar-se, também, dados de franjas isocromáticas em regiões *distantes* da ponta da trinca.

A área de computação tem trazido uma grande contribuição à área de fotomecânica, pela agilização nas operações de aquisição, registro e processamento de imagens, com vista a obtenção de parâmetros de interesse para a área de engenharia, como é o caso da

determinação do fator de intensidade de tensões. As isocromáticas geradas num experimento fotoelástico podem ser coloridas, quando a luz do polariscópio é branca ou em matizes de uma mesma cor, quando a luz é monocromática. Com a utilização de filtros especiais num polariscópio, é possível transformar-se as imagens coloridas em imagens monocromáticas. As imagens monocromáticas podem ser analisadas com base em algoritmos de Processamento de Imagens Digitais (PID), disponíveis para imagens em níveis de cinza.

Para as isocromáticas em matizes de uma mesma cor, os dados geométricos, citados anteriormente, são extraídos em pontos de mínimos locais de intensidade luminosa. Tais pontos podem ser sistematicamente obtidos a partir da utilização de algoritmos de afinamento de franjas, cuja função é determinar a linha que passa pela região mais escura da imagem. Para que tais operações possam ser realizadas, é necessário que a imagem esteja na forma digital, ou seja, na forma de um arranjo matricial, adequado ao processamento por meio de computador. Os elementos deste arranjo são denominados *pixels* e contêm informações sobre os níveis de cinza ou sobre as cores da imagem.

Uma imagem isocromática pode ser documentada por meio de uma câmara fotográfica, gerando uma fotografia, ou então por meio de câmaras de vídeo analógica ou digital. No caso de fotografias e de imagens de câmaras de vídeo analógicas, o registro das imagens se encontra na forma analógica. Nesta forma, a intensidade luminosa é uma função contínua em duas dimensões, em termos dos níveis de cinza (no caso de imagens monocromáticas em níveis de cinza). O processo de se obter a imagem digital correspondente consiste em se extrair um número finito de pontos da imagem analógica, numa quantidade tal que seja possível reproduzi-la com fidelidade na tela do monitor de um computador. As fotografias podem ser digitalizadas por meio de *scanners*, gerando arquivos de imagens digitais (PCX, BMP, etc.) que podem ser manipulados por computador. Uma placa digitalizadora, conectada à placa mãe do computador, permite a digitalização da imagem de uma câmara de vídeo. Em geral, uma placa digitalizadora vem acompanhada de um *software*, que permite que uma determinada cena mostrada no vídeo possa ser capturada e armazenada na forma de um arquivo de imagem.

Neste trabalho, é desenvolvido um sistema de processamento de imagens digitais (FOTOEL), com recursos para o cálculo do fator de intensidade  $K_I$  com base em franjas isocromáticas, em níveis de cinza, geradas na ponta de uma trinca carregada no modo de abertura. Este sistema é baseado em dois *softwares* (FOTOFRAN e FOTOVER), desenvolvidos pelo autor, para o ambiente *Windows*, utilizando a versão 2.0 do compilador *Visual C*

da *Microsoft*. FOTOFRAN é um módulo dedicado ao processamento de imagens, com objetivo final de extração de parâmetros geométricos das franjas isocromáticas. Ele foi desenvolvido com base em algumas funções de PID da biblioteca *Vicwin for Windows*, da *Catenary System* e dispõe de recursos de digitalização de imagens, a partir de *scanners* do tipo *ScanJet IIc, IIIc e 4c* da *Hewlett Packard*. Como resultado das operações realizadas com FOTOFRAN, obtém-se, em arquivo-texto, os valores das coordenadas  $x$  e  $y$  de todas as franjas de interesse para o cálculo do fator de intensidade de tensões e o valor de  $K_I$  para os métodos de Irwin e de Smith & Schroedl. O método de Dally requer o processamento de um número maior de dados das franjas e ainda operações de soma, multiplicação e inversão de matrizes. Estas operações são realizadas com o *software* FOTOVER, onde dispõe-se da flexibilidade de se fazer a reamostragem de pontos das franjas, bem como retirar franjas que não se queira inserir no cálculo de  $K_I$ . Em FOTOVER, dispõe-se, ainda, de funções de manipulação de arquivos-textos envolvidos na obtenção de  $K_I$ .



Figura 1 - O sistema FOTOEL e as grandes áreas envolvidas no trabalho.

O desenvolvimento do sistema FOTOEL envolveu a integração de várias áreas do conhecimento, tais como a Fotomecânica, em particular a Fotoelasticidade, a Mecânica de Fratura e a Ciência da Computação, em particular o Processamento de Imagens Digitais, como ilustrado na Figura 1.

Na Figura 2, é dada uma idéia geral da estrutura do texto da tese. Os blocos situados no lado direito desta Figura, correspondem a tópicos teóricos em que o sistema FOTOEL está fundamentado. Nos blocos do lado esquerdo, estão os tópicos relacionados com a implementação do sistema, sua utilização, resultados e bibliografia consultada.

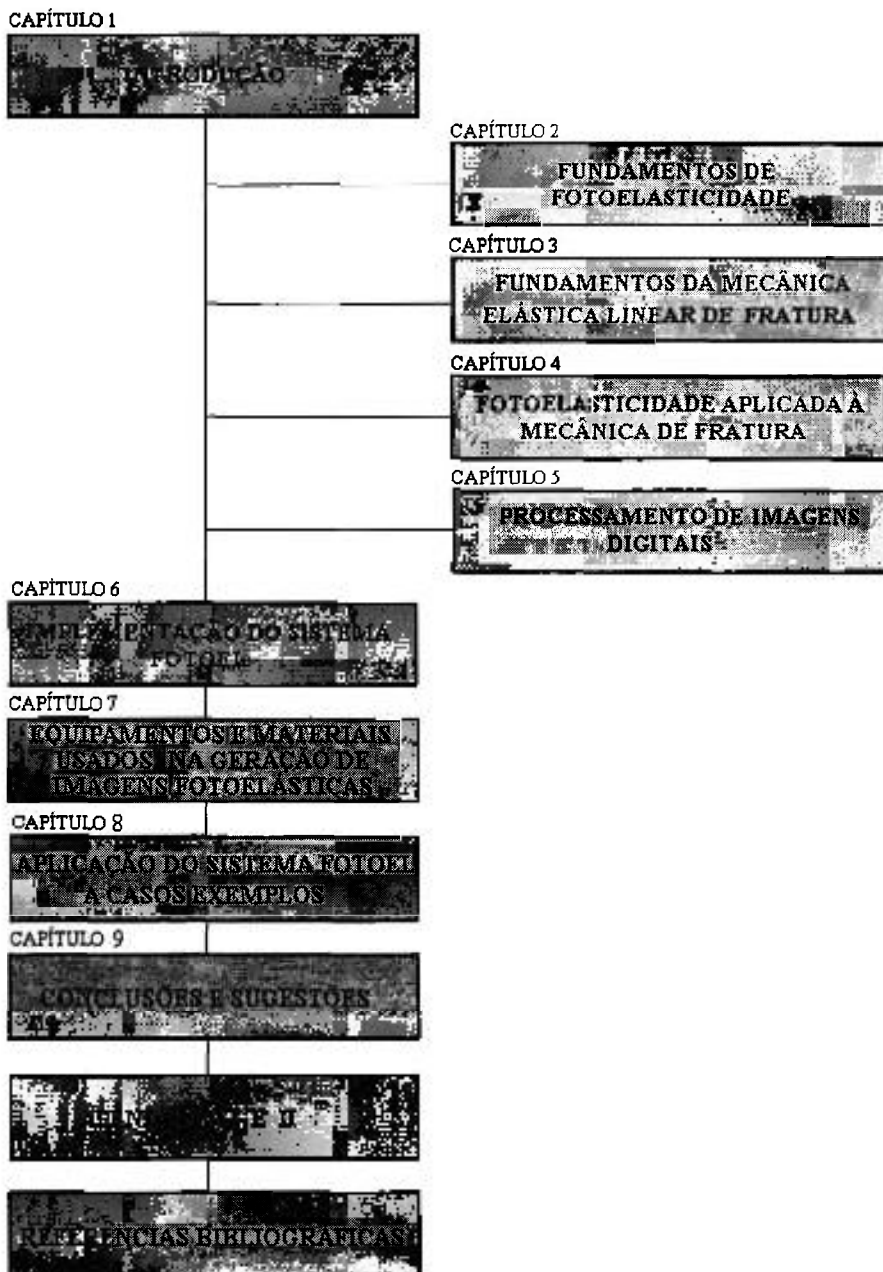


Figura 2 - Diagrama de blocos relacionando os capítulos da tese.



No Capítulo 2, são apresentados, de forma sucinta, os fundamentos de fotoelasticidade, abordando-se os conceitos de polarização da luz, material birrefringente, polariscópio, fotoelasticidade bidimensional e imagens geradas em um experimento fotoelástico.

Os modos de carregamento de uma trinca, campos de tensões nas vizinhanças da ponta da trinca, definições do fator de intensidade de tensões e de tenacidade à fratura são apresentados no Capítulo 3.

O relacionamento entre a Mecânica de Fratura e a Fotoelasticidade são abordados no Capítulo 4. Neste capítulo são apresentadas algumas metodologias disponíveis para o cálculo de  $K_I$ , com base em isocromáticas em ponta de trinca, e que fazem parte do sistema FOTOEL.

No Capítulo 5, são fornecidos conceitos básicos de análise de imagens utilizando-se processamento digital, sendo dada ênfase aos filtros usados para adequar as imagens isocromáticas às operações de afinamento de franjas. Estas operações possibilitam a extração de dados geométricos das franjas, que dão suporte ao cálculo de  $K_I$ . A maior parte das rotinas de *software* do sistema FOTOEL foi escrita pelo autor. Foram adquiridos, também, os programas-fontes relativos à biblioteca de funções de PID utilizada. Assim, este sistema poderá ser adaptado com facilidade na incorporação de novas técnicas que forem surgindo na área de aplicações da fotomecânica. O ambiente *Windows* facilita a utilização de modos de alta resolução dos monitores de vídeo, requisito necessário quando se trabalha com imagens, das quais se necessita obter informações geométricas, de forma interativa, a partir do vídeo.

No Capítulo 6, é mostrado como o conteúdo teórico das várias áreas relacionadas no capítulos anteriores se interagem de modo a produzir os *softwares* que constituem o sistema FOTOEL. São apresentadas descrições detalhadas dos itens de menu das interfaces gráficas de FOTOFRAN e FOTOVER. O primeiro *software* possui uma interface gráfica amigável, com recursos de carregamento, salvamento e aquisição de imagens via *scanner* e impressão de imagens. Dispõe, ainda, de funções de PID específicas para operações de extração de franjas de ordens inteiras ou fracionárias, em níveis de cinza, rotulação de franjas e cálculo do fator de intensidade de tensões,  $K_I$ . O sistema incorpora os métodos iniciais para cálculo de  $K_I$ , com base em franjas isocromáticas na região  *muito próxima* da ponta de trinca, desenvolvidos pelos pesquisadores Irwin, Smith & Schroedl. É implementado, também, o método superdeterminístico, com seis parâmetros, de Dally,

aplicável à região *próxima* da ponta da trinca. No Capítulo 7, acompanha-se, passo-a-passo, as etapas envolvidas na extração de parâmetros de franjas isocromáticas, usando FOTOFRAN, com vista a obtenção de parâmetros necessários ao cálculo e  $K_I$ .

No capítulo 7, são apresentados os equipamentos de geração e aquisição de imagens fotoelásticas, utilizados ao longo do desenvolvimento do sistema FOTOEL. No Capítulo 7, são mostradas, também, as imagens isocromáticas que irão ser processadas no Capítulo 8. Relativamente a estas imagens, são relacionadas as propriedades fotoelásticas e geométricas.

Resultados de aplicações do sistema FOTOEL a casos exemplos são mostrados no Capítulo 8. São analisadas isocromáticas sintéticas, geradas por computador, das quais já se conhece, *a priori*, o resultado de  $K_I$  e ainda isocromáticas geradas experimentalmente. São feitas comparações dos cálculos de  $K_I$  por meio de processamento de imagens digitais com resultados conhecidos.

No Capítulo 9, são apresentadas as conclusões e feitas algumas sugestões sobre trabalhos futuros relacionados com tópicos desta tese.

No Apêndice I, é apresentado o Módulo de Simulação de imagens fotoelásticas disponível em FOTOFRAN.

No Apêndice II, são apresentados, de forma condensada, listagens de arquivos de resultados de processamento de imagens e de cálculos de  $K_I$  realizados no Capítulo 8.

A estrutura do sistema FOTOEL, em termos de manipulação de imagens e de extração de franjas, permite que, com algum esforço extra, se introduza o cálculo de  $K_{II}$ , ou ainda, o cálculo do fator de intensidade de tensões no modo misto de carregamento (ação simultânea de  $K_I$  e de  $K_{II}$ ), bem como outros métodos de cálculo envolvendo franjas em regiões *distantes* da ponta da trinca. Para isto, basta que se insira, no sistema, rotinas contendo as funções necessárias ao cálculo dos coeficientes usados na aproximação do campo de tensões por série de polinômios. O dado básico de entrada destes métodos são as coordenadas das franjas afinadas, sendo esta tarefa facilmente realizada pelo *software* FOTOFRAN.

O *software* FOTOVER tem bastante flexibilidade do ponto de vista de se lidar com franjas isocromáticas já rotuladas. Em princípio, não se trabalha com todos os pontos rotulados para as franjas afinadas, ou seja, faz-se uma amostragem das mesmas. Com o referido *software*, consegue-se, com facilidade, reamostrar as franjas rotuladas, podendo-se

variar, para cada ordem de franjas, o número de pontos a serem amostrados. Além disto, se necessário, pode-se alterar as coordenadas da ponta da trinca, caso descubra-se, posteriormente ao processamento em FOTOFRAN, que elas estejam erradas. Pode-se, com este recurso, fazer simulações sobre a influência de erros na localização da ponta da trinca sobre o resultado de  $K_I$

Vários trabalhos vêm sendo publicados noticiando a utilização do processamento de imagens digitais (PID) na área de fotoelasticidade, especialmente em aplicações voltadas para obtenção de fatores de intensidade de tensões, com base em pacotes de *softwares* de propósito geral. Entretanto, poucas são as informações técnicas disponíveis quanto à parte de *software* e de especificação de equipamentos. Há, ainda, carência de literatura técnica, abordando de forma integrada os temas tratados nesta tese. Assim, além de contribuir com a disponibilização de um sistema de processamento de imagens digitais nacional, dedicado ao cálculo do fator de intensidade de tensões com o apoio da fotoelasticidade, este trabalho se constitui numa valiosa ferramenta de consulta para os interessados na aplicação de PID na área de fotomecânica.

## 2 FUNDAMENTOS DE FOTOELASTICIDADE

### 2.1 Introdução

A fotoelasticidade é uma técnica de análise experimental de tensões e deformações, que faz uso das propriedades de *birrefringência mecânica* apresentada por alguns materiais não-cristalinos e das propriedades de polarização da luz. O experimento é feito com um equipamento denominado polariscópio, o qual pode ser alimentado com luz branca ou com luz monocromática. São geradas imagens, com base nas quais se obtêm informações sobre as tensões em materiais sob ação de esforços. Com a simples observação da forma e cor da imagem fotoelástica, é possível fazer-se uma rápida análise qualitativa da distribuição global de tensões na região do material sob análise. Dados quantitativos precisos podem ser obtidos com instrumentos ópticos modernos associados com técnicas de medição.

Quando um material fotoelástico, submetido a esforços, é observado num polariscópio alimentado com luz branca, observam-se padrões de cores (isocromáticas) que são diretamente proporcionais às tensões e deformações neste material. A seqüência de cores observada ao se aumentar a tensão é a seguinte : preta, amarela, vermelha, azul, verde, amarela, vermelha, verde, amarela, vermelha, verde, etc. como ilustrado na Figura 3. A linha de transição entre as cores vermelha e verde é um exemplo típico de franja, região onde ocorre a extinção da luz. Quando o polariscópio é alimentado com luz monocromática, as isocromáticas são geradas em matizes da cor desta luz. Neste caso, as franjas são identificadas como as regiões em que se têm a ocorrência do tom de cor mais escuro, que também corresponde a pontos de extinção da luz. À medida em que aumenta o número de franjas, há aumento proporcional nas tensões no material. Quando o espaçamento entre estas franjas é pequeno, significa que se tem altos gradientes de tensões. A presença de uma mesma cor numa área significa tensão uniformemente distribuída. Assim, a distribuição global de tensões pode ser obtida a partir do reconhecimento das franjas, suas ordenações e o espaçamento entre elas.

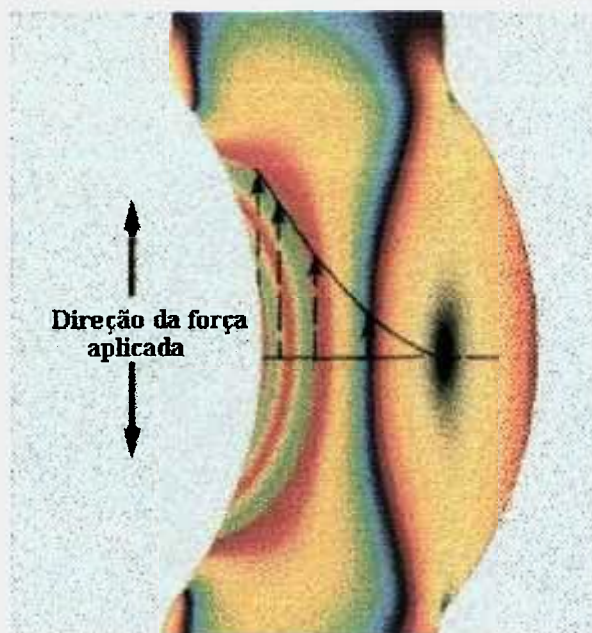


Figura 3 - Ilustração de imagem fotoelástica num experimento com luz branca, mostrando a seqüência de cores geradas <sup>(1)</sup>.

A fotoelasticidade pode ser dividida em três categorias: (a) a técnica do recobrimento fotoelástico; (b) a análise de modelos bidimensionais e (c) a análise de modelos tridimensionais. Na Figura 4, são ilustradas as categorias (a) e (b) citadas.

Na técnica do recobrimento fotoelástico, uma camada de material birrefringente é colada sobre a estrutura ou equipamento onde se deseja avaliar as tensões. O material utilizado para colagem possui propriedades de reflexão da luz. A seguir, aplicam-se cargas sobre a estrutura e ilumina-se o material de recobrimento fotoelástico, cuja luz refletida é observada num polariscópio. Neste caso, tem-se a chamada fotoelasticidade por reflexão. As informações sobre tensões na estrutura são obtidas com base nas deformações na interface entre o material birrefringente e o material da estrutura.

No caso da análise de modelos bidimensionais, modelos transparentes de material birrefringente, com geometrias correspondentes ao protótipo de estrutura a ser analisada, são analisados num polariscópio de transmissão. Neste caso, não há reflexão da luz proveniente do polariscópio. Tem-se, então, a fotoelasticidade por transmissão. Os resultados obtidos com o modelo podem ser extrapolados para a estrutura real.

Com a utilização da técnica da fotoelasticidade tridimensional, é possível analisar tensões no interior de modelos fotoelásticos. Nesta técnica, as tensões no modelo são



Figura 4 - Equipamentos e materiais envolvidos na geração de imagens fotoelásticas <sup>(1-4)</sup>.

aplicadas dentro de um forno, com o objetivo de congelar as tensões, com base numa temperatura crítica. Após o congelamento de tensões, o modelo é fatiado e as fatias são analisadas num polariscópio de transmissão, para obtenção das tensões.

Há dois tipos básicos de imagens geradas diretamente no polariscópio: as isocromáticas e as isóclinas. Com as isocromáticas é possível, em cada ponto das franjas, obter-se uma relação entre as tensões principais. Com base nas isóclinas, obtém-se a orientação das tensões principais em relação a uma dada direção de referência.

No caso da utilização de luz branca, as isocromáticas geradas são coloridas, como mostrado na Figura 5, enquanto que, com luz monocromática, as imagens são em matizes da cor da luz utilizada no experimento, como ilustrado na Figura 6 .

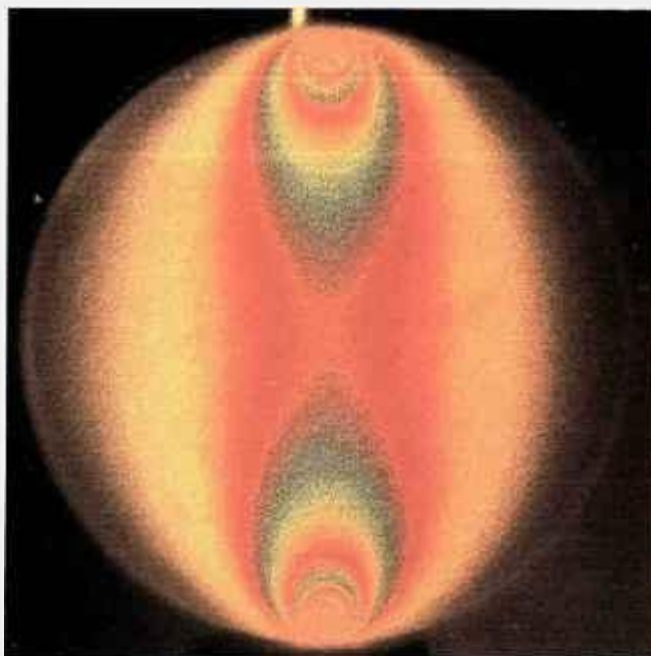


Figura 5 - Isocromática gerada experimentalmente num disco de material birrefringente iluminado com luz branca<sup>(5)</sup>.

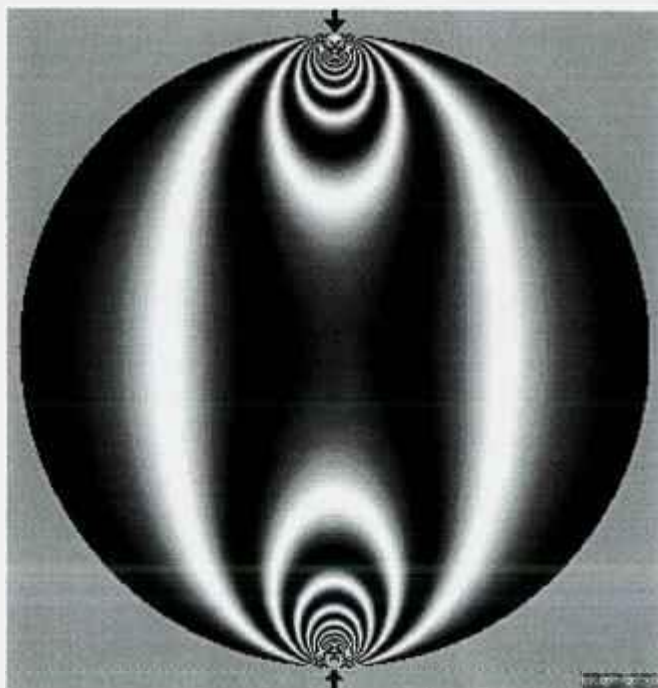


Figura 6 - Isocromática gerada por simulação com computador, para um disco de material birrefringente, na condição de luz monocromática<sup>(6,7)</sup>.

A separação das tensões principais pode ser feita a partir de condições de contorno ou através de técnicas numéricas de diferenças finitas. O relacionamento entre as tensões principais é feito em pontos particulares de uma isocromática. Numa isocromática gerada com luz monocromática, estes pontos são aqueles em que a intensidade luminosa passa por um valor mínimo. Numa isocromática gerada com luz branca, estes pontos correspondem a regiões em que os componentes da luz branca se extinguem. Neste caso, é necessário consultar-se uma tabela de cores com os respectivos comprimentos de onda <sup>(8,9,10)</sup>.

Neste trabalho, são consideradas somente as imagens provenientes da análise de modelos birrefringentes bidimensionais.

Os casos estruturais, dentro do escopo desta tese, a serem abordados pela fotoelasticidade, são aqueles que podem ser tratados dentro da teoria em que domina o comportamento elástico linear de estruturas.

## 2.2 Revisão bibliográfica

Os conceitos teóricos de óptica, polarização da luz e birrefringência temporária são detalhadamente apresentados em DALLY<sup>(8)</sup>, DURELLI & RILEY<sup>(10)</sup> e HECHT<sup>(11)</sup>.

DINIZ<sup>(5)</sup> é uma literatura, em português, que faz uma revisão extensiva dos conceitos de elasticidade e fotoelasticidade, além de apresentar uma aplicação real a uma mola componente de um elemento combustível de um reator nuclear. FROCHT<sup>(12,13)</sup> são referências básicas citadas na maioria dos trabalhos de fotoelasticidade. DALLY & RILEY<sup>(8)</sup> é um livro, de 1991, sobre análise experimental de tensões, abordando os conceitos de material birrefringente, polarização da luz, fotoelasticidade bi e tridimensional e ainda a utilização da fotoelasticidade na Mecânica de Fratura. BUDYNAS<sup>(14)</sup> apresenta um capítulo sobre análise experimental de tensões utilizando fotoelasticidade. DURELLI & RILEY<sup>(10)</sup> é um livro sobre fotomecânica, abordando a fotoelasticidade aplicada a problemas bi e tridimensionais, térmicos e dinâmicos. FREIRE<sup>(9)</sup>, KHOL<sup>(15)</sup>, POST<sup>(16)</sup> e SOARES<sup>(17)</sup> apresentam conceitos básicos da fotoelasticidade.

Informações detalhadas sobre materiais birrefringentes, utilização da técnica fotoelástica e calibração utilizando modelo bidimensionais podem ser encontrados em algumas publicações técnicas<sup>(1-4)</sup>.



### 2.3 Tensões principais e estado plano de tensões

A tensão, num material sob esforço, é definida como a carga por unidade de área infinitesimal nas vizinhanças do ponto de interesse. Em coordenadas cartesianas, o elemento infinitesimal tem a forma de um paralelepípedo, ilustrado na Figura 7. Nesta mesma Figura, são indicadas as tensões normais,  $\sigma_x$  e  $\sigma_y$ , e a tensão de cisalhamento  $\tau_{xy}$ .

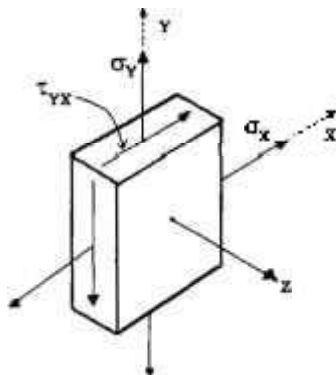


Figura 7 - Elemento de estado plano de tensões, mostrando as tensões pertinentes.

As tensões normais máximas, num determinado ponto do material, são denominadas de tensões principais, referidas na literatura como  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  e  $\sigma_3$ . No estado plano de tensões, a tensão na direção “z” é desprezível ( $\sigma_3 \approx 0$ ). Neste caso, as tensões estão contidas em planos paralelos ao plano que contém a carga atuante sobre a estrutura. Os cálculos na área da fotoelasticidade giram em torno de relações matemáticas que envolvem a diferença  $\sigma_1 - \sigma_2$  com as propriedades do material birrefringente e com os comprimentos de onda da luz usada no experimento fotoelástico.

### 2.4 Polarização da luz

De acordo com a teoria ondulatória, a luz é caracterizada por vetores descritos por funções senoidais. A polarização da luz consiste em se fazer com que o vetor luminoso tenha uma trajetória espacial predeterminada<sup>(11)</sup>. Quando a luz se propaga num meio, com o seu vetor luminoso vibrando num único plano, tem-se a polarização plana da luz. Quando a luz polarizada emergente de um polarizador descreve, num plano perpendicular ao sentido de propagação da luz, trajetórias circulares, tem-se a luz polarizada circular. Na Figura 8, são ilustrados os tipos de polarização plana e circular da luz.

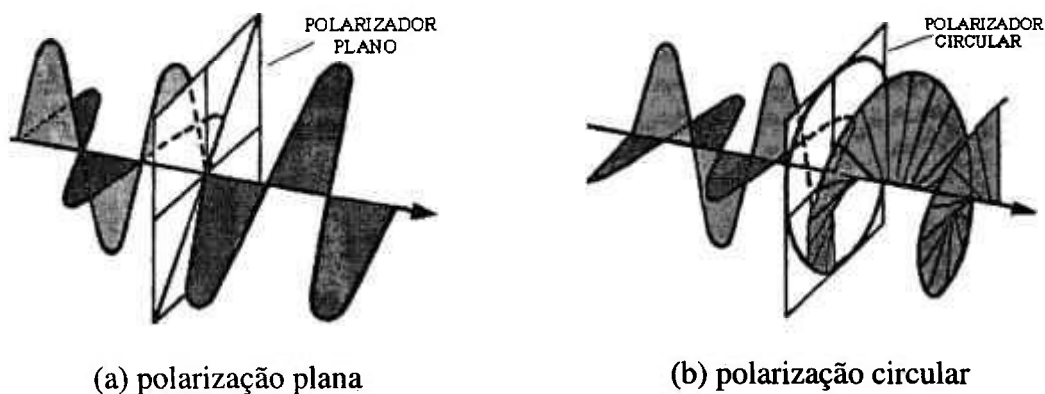
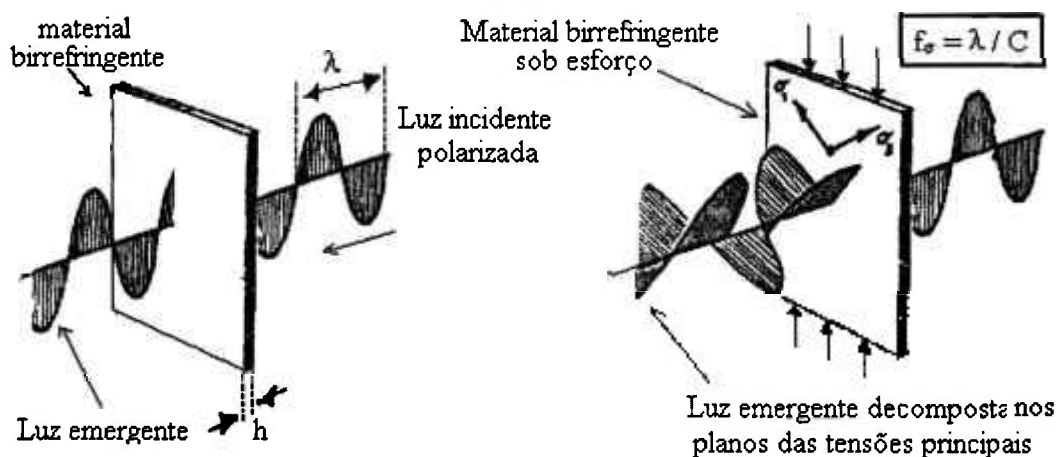


Figura 8 - Ilustração das polarizações da luz (plana e circular)<sup>(18)</sup>.

## 2.5 Material com birrefringência mecânica

Muitos materiais transparentes não-cristalinos, que são opticamente isotrópicos quando livres de tensões, se tornam opticamente anisotrópicos quando submetidos à ação de esforços. Estas características persistem enquanto as cargas sobre o material são mantidas, desaparecendo, entretanto, quando as cargas são removidas. Este comportamento, conhecido como *refração temporária dupla*, foi observado pela primeira vez por *Sir David Brewster* no ano de 1816. O método da fotoelasticidade é baseado no comportamento destes materiais. A teoria relacionando variações nos índices de refração de um material com refração temporária dupla sob ação de tensão é devida a Maxwell, que relatou o fenômeno em 1853. Maxwell observou que as variações nos índices de refração eram proporcionais às cargas e, portanto, às tensões ou deformações para um material com comportamento elástico-linear. Os materiais que possuem refração temporária dupla sob ação de cargas são denominados, também, de materiais com *birrefringência mecânica*<sup>(8)</sup>. Na Figura 9, ilustra-se o comportamento de um material birrefringente, com e sem carga externa aplicada, ao ser atravessado pela luz polarizada plana.

Os materiais birrefringentes são vendidos na forma de blocos, barras ou chapas para utilização na confecção de modelos fotoelásticos, ou na forma de resina líquida com endurecedor, combinados na hora de montagem da camada de recobrimento fotoelástico. Na Figura 10, são mostrados modelos bidimensionais usados na fotoelasticidade por transmissão e na fotoelasticidade por reflexão (camada de material fotoelástico de recobrimento sobre uma peça). Os materiais comercialmente disponíveis são resinas à base de epoxi e policarbonatos<sup>(8)</sup>.



$\lambda$  - comprimento de onda da luz

$f_\sigma$  - constante fotoelástica de tensão

$C$  - constante óptica de tensão do material fotoelástico

$\sigma_1, \sigma_2$  - tensões principais

Figura 9 - Esquema ilustrando o fenômeno da birrefringência mecânica<sup>(16)</sup>.

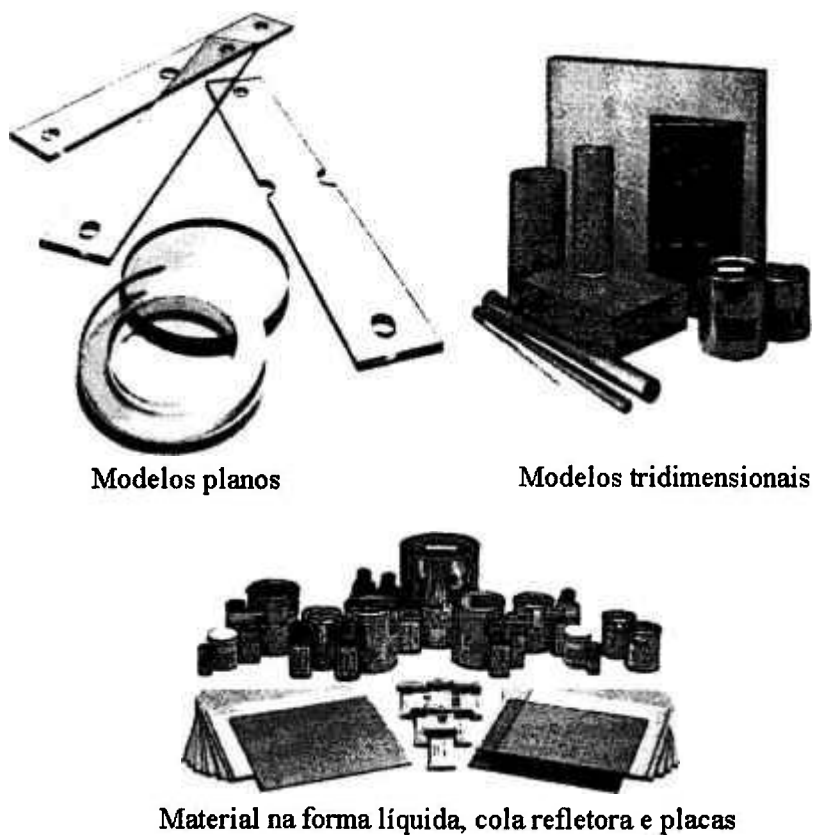


Figura 10 - Formas comerciais de materiais birrefringentes<sup>(1,3,4)</sup>.

## 2.6 Polariscópio

O polariscópio é o equipamento básico utilizado na realização de um experimento fotoelástico. Ele é composto basicamente de uma fonte de luz (branca ou monocromática), dois polarizadores de luz plana (analisador e polarizador) e dois polarizadores de luz circular (lentes de quarto de onda). O polarizador é o elemento óptico mais próximo da fonte luminosa. O analisador é o elemento óptico onde são observadas as imagens fotoelásticas. As lentes de quarto de onda ficam localizadas antes e depois do modelo fotoelástico ou do material de recobrimento, em relação à trajetória luminosa. Dependendo se o arranjo possui ou não lentes de quarto de onda, o polariscópio pode ser classificado como sendo plano ou circular. Quando não são utilizadas lentes de quarto de onda o polariscópio é do tipo plano. Já quando se usam estas lentes, o polariscópio é do tipo circular, uma vez que a luz emergente do polarizador é circular.

O mecanismo básico da teoria da fotoelasticidade é a defasagem  $\Delta$  que a onda luminosa sofre ao atravessar o material birrefringente, a qual é proporcional à diferença entre as tensões principais em cada ponto do material birrefringente sob tensão. A luz polarizada, que chega ao material birrefringente sob tensão, ao atravessá-lo, decompõe-se na direção de dois planos perpendiculares entre si, que correspondem às direções das tensões principais em cada ponto do material. As ondas luminosas, emergentes nestes planos, saem com uma defasagem  $\Delta$  em relação à onda incidente, cujo valor em radianos é dado por

$$\Delta = 2\pi [ (C h) / \lambda ] (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (1)$$

onde “C” é a constante óptica de tensão do material birrefringente, “ $\lambda$ ” é o comprimento de onda da luz e “h” é o espaço percorrido pela onda luminosa dentro do material birrefringente. Na fotoelasticidade por transmissão, “h” é a espessura do material birrefringente. No caso da reflexão, “h” é o dobro da espessura deste material. Em (1), como unidades típicas das variáveis mencionadas, tem-se: “C” [ $m^2/N$ ], “ $\lambda$ ” [m], “h” [m],  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  [ $N / m^2$ ].

### 2.6.1 Polariscópio plano

O arranjo consistindo de fonte de luz, analisador e polarizador, é denominado de polariscópio plano, o qual é ilustrado na Figura 11. Para este arranjo, a intensidade

luminosa “I” no analisador é dada por (2), onde “ $\alpha$ ” é o ângulo entre o eixo do polarizador e a direção da tensão principal  $\sigma_1$ , “A” é uma amplitude de referência e “ $\Delta$ ” a defasagem.

$$I = A \text{sen}^2(2\alpha) \text{sen}^2(\Delta / 2) \quad (2)$$

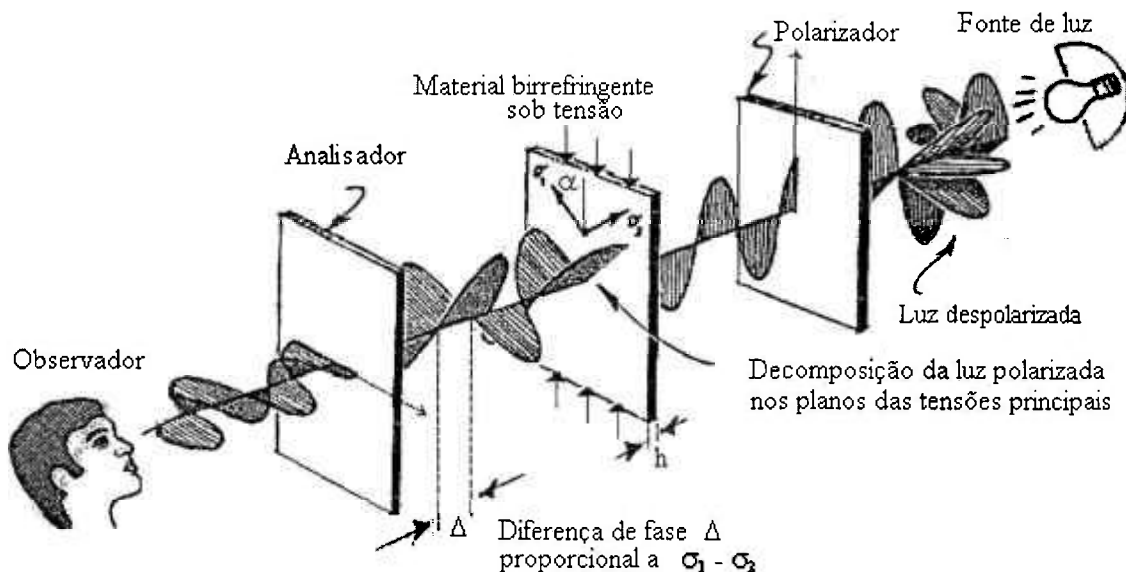


Figura 11 - Esquema de polariscópio plano, mostrando o arranjo das lentes e modelo<sup>(14,16)</sup>

O fator  $\text{sen}^2(2\alpha)$  da equação (2) define as isóclinas. Já o fator  $\text{sen}^2(\Delta / 2)$  define as isocromáticas. Num experimento fotoelástico com polariscópio plano, a imagem resultante é uma superposição de isóclinas com isocromáticas, como ilustrado no lado esquerdo da Figura 12, para o caso de um experimento com luz monocromática para uma chapa, com um furo circular, tracionada num única direção. As isóclinas são imagens que fornecem a orientação das tensões principais. No lado direito desta mesma figura, mostra-se, separadamente, a isóclina correspondente a um determinado ângulo  $\alpha$ , para esta mesma chapa.

As isocromáticas são imagens, para as quais, uma mesma cor corresponde a uma mesma diferença entre as tensões principais. As isóclinas permitem que se determine o ângulo das tensões principais em relação a uma determinada direção de referência. Na Figura 13, são ilustrados os elementos correspondentes às tensões principais ao longo da linha mais escura da isóclina. Observa-se que os elementos têm uma mesma inclinação em relação à direção horizontal. No cálculo do fator de intensidade de tensões, a imagem básica utilizada é a isocromática.

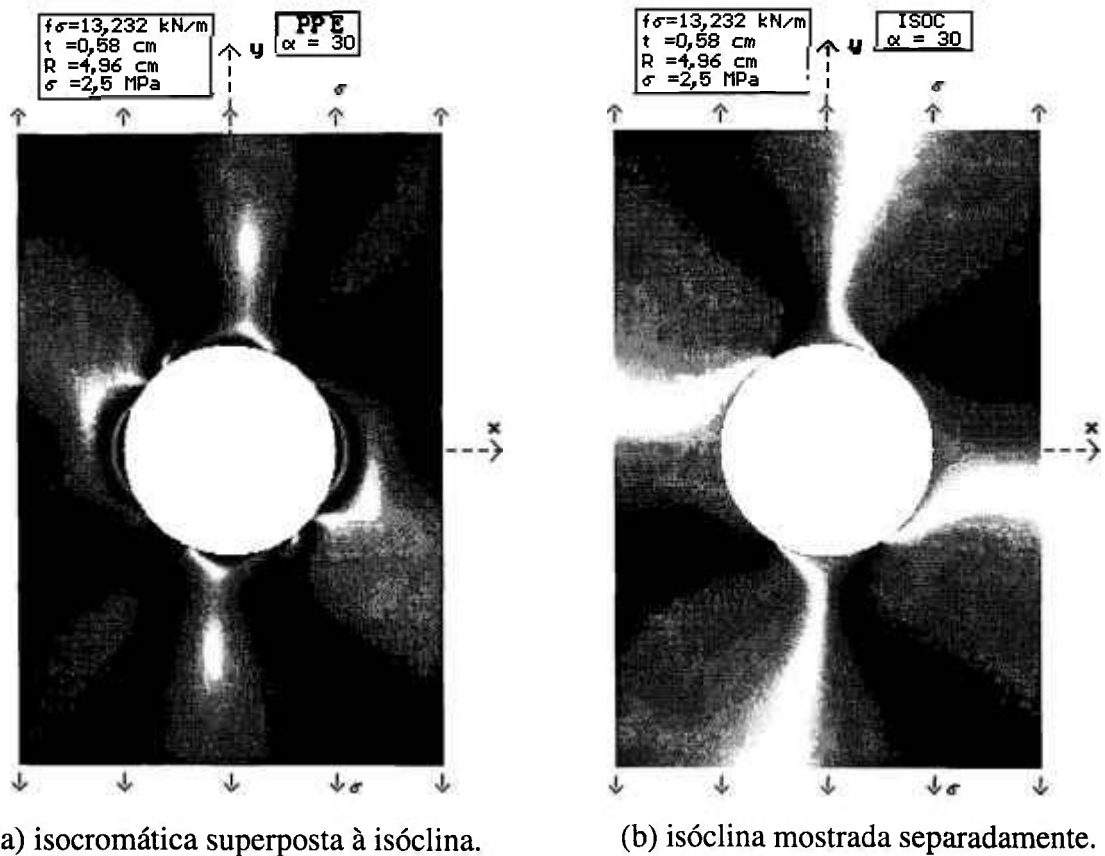


Figura 12 - Imagens de um experimento fotoelástico com polariscópio plano e luz monocromática para uma chapa com furo circular, tracionada na direção vertical <sup>(19)</sup>.

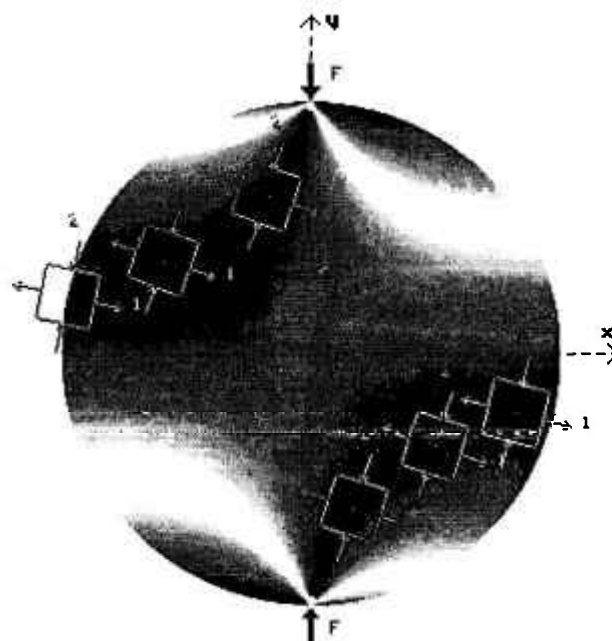


Figura 13 - Elementos de tensões principais ao longo de isóclinas em disco birrefringente <sup>(6)</sup>.

## 2.6.2 Polariscópio circular

Quando ao arranjo de polariscópio plano são incluídas lentes de quarto de onda, tem-se o polariscópio circular, ilustrado na Figura 14. A lente de quarto de onda é caracterizada por dois eixos, denominados eixos rápidos e lentos, fazendo entre si um ângulo de 45 graus. Por meio de um giro apropriado destas lentes de quarto de onda, é possível fazer-se com que o primeiro fator em seno da equação (2) seja igual a 1. Neste caso, a imagem produzida representa somente as isocromáticas.

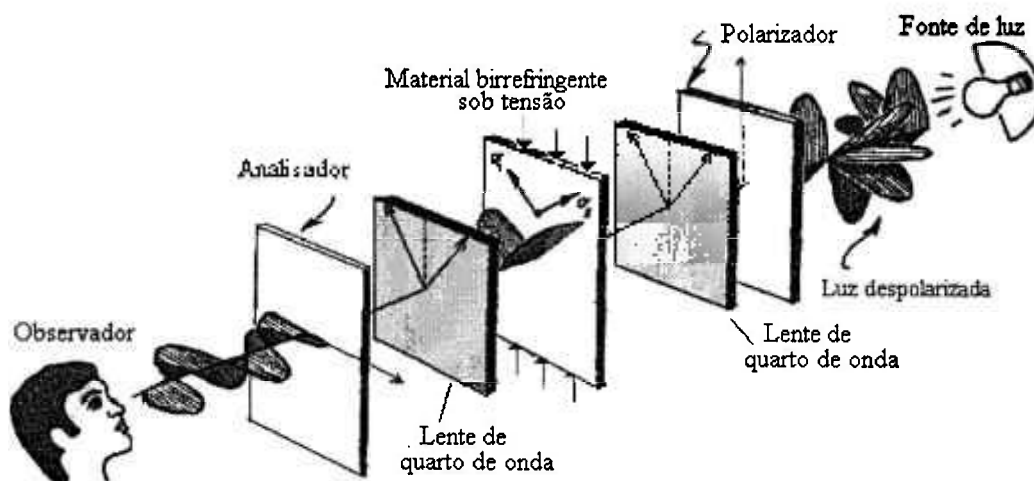


Figura 14 - Esquema das lentes de um polariscópio circular (campo escuro) <sup>(14,16)</sup>.

### 2.6.2.1 Polariscópio circular / campo escuro

Para a condição de posição cruzada dos eixos do analisador e polarizador, como mostrado na Figura 14, a intensidade luminosa no analisador é dada por

$$I = A \sin^2(\Delta / 2). \quad (3)$$

Uma análise da equação (3) mostra que é possível relacionar-se as tensões principais,  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$ , com parâmetros extraídos da imagem isocromática. Para isto, basta anular o fator em seno da equação (3), obtendo-se a expressão (4)

$$\sigma_1 - \sigma_2 = N f_\sigma / h, \quad (4)$$

onde “N” é um número inteiro e  $f_{\sigma}$  (constante fotoelástica de tensão) é igual a  $\lambda / C$ . Na fotoelasticidade, o trabalho básico é obter-se este número “N”. Na condição de campo escuro, são geradas as isocromáticas de ordem inteira, como mostrado na Figura 15 (a).

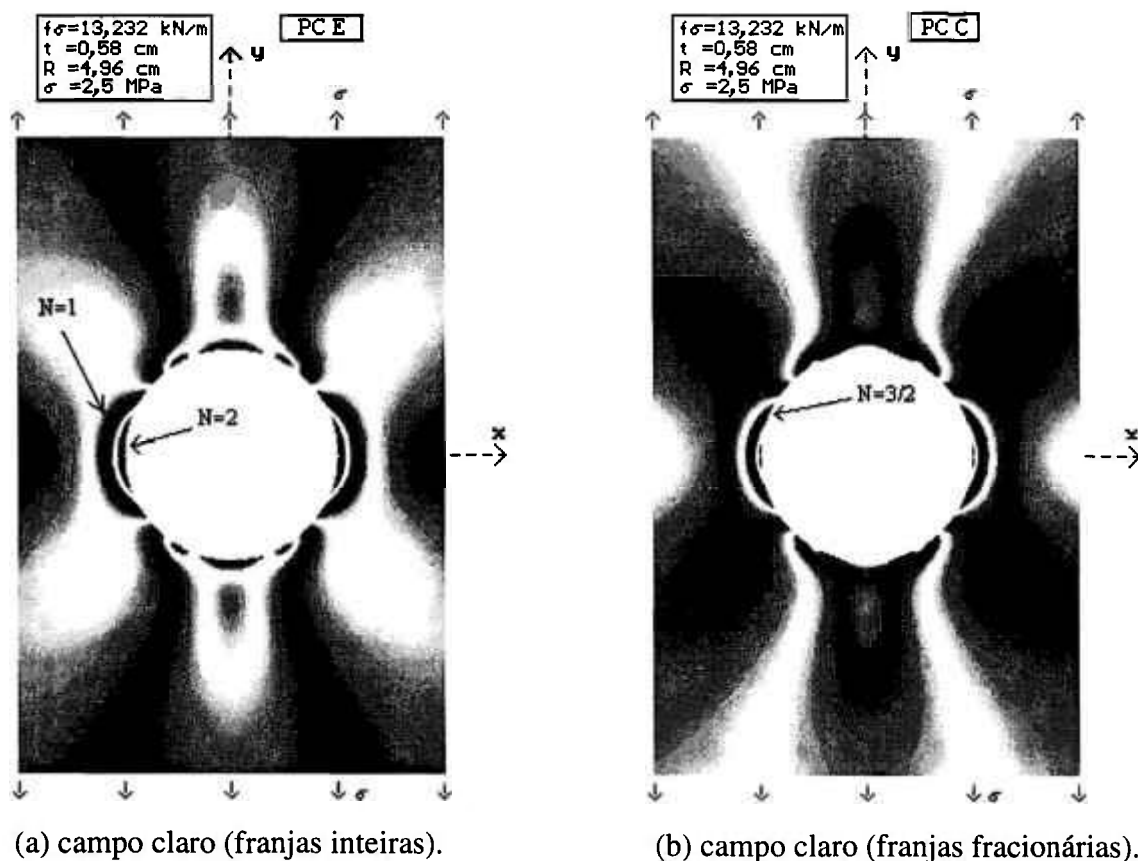


Figura 15 - Isocromáticas numa chapa de material birrefringente com furo circular e tracionada na direção vertical (polariscópio circular com luz monocromática) <sup>(19)</sup>.

### 2.6.2.2 Polariscópio circular / campo claro

Na condição em que os eixos do polarizador e analisador estão alinhados, tem-se a condição de campo claro, sendo a intensidade luminosa “I” da imagem fotoelástica no analisador dada por

$$I = A \cos^2(\Delta / 2). \quad (5)$$

Neste caso, os pontos de extinção da luz, correspondem a pontos da imagem isocromática onde a diferença entre as tensões principais produz valores de “N” iguais a  $1/2, 3/2, 5/2, \dots$



Neste processo, é gerada uma imagem denominada de franja isocromática de ordem fracionária, ilustrada na Figura 15(b).

Ao número “N” que corresponde a pontos de extinção da luz, denomina-se ordem da franja. Na condição de polariscópio com campo escuro, têm-se as franjas de ordem inteira. No caso de campo claro, têm-se as franjas de ordem fracionária.

## 2.7. Técnicas auxiliares na fotoelasticidade

Com base nos padrões das isocromáticas de campo escuro e de campo claro, consegue-se determinar somente as diferenças de tensões principais de meia em meia ordem de franja. Caso se deseje uma melhor precisão nos resultados, é necessário que sejam usadas técnicas denominadas de compensação. Uma das técnicas mais usadas é conhecida como *método de Tardy*, o qual é descrito nas referências<sup>(5,8,10,14)</sup>. Com esse método, é possível determinar-se a ordem da franja em qualquer ponto da isocromática, ou seja, é possível obter-se a relação  $(\sigma_1 - \sigma_2)$  em qualquer ponto da superfície sob análise via fotoelasticidade.

Em algumas condições de contorno conhecidas, como por exemplo na superfície do furo circular de uma chapa furada, ilustrada na Figura 16, é possível separar-se a tensão  $\sigma_1$  de  $\sigma_2$ , uma vez que esta última é nula. Assim, a tensão  $\sigma_{\theta\theta}$ , no ponto B da superfície da chapa da Figura 16, é igual a  $\sigma_1$ .

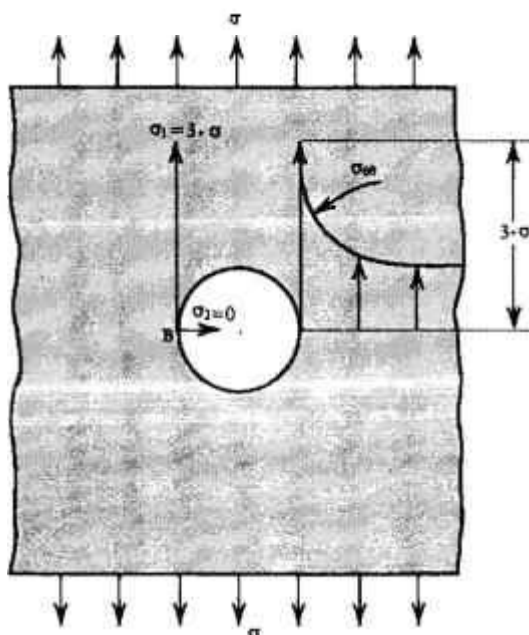


Figura 16 - Tensões na superfície de um furo circular em uma chapa furada sob tração.

Com base na equação (4), é possível obter-se o valor para a tensão no ponto B através da equação (6)

$$\sigma_1 = N f_\sigma \quad (6)$$

onde,  $f_\sigma$  é a constante fotoelástica de tensão do material birrefringente e “N” é a ordem da franja isocromática que passa por este ponto. Na Figura 17, mostra-se que, para a situação de geometria e carregamento da chapa, a franja passando pelo ponto B tem  $N=4$ . Assim, no exemplo da Figura 17, para calcular-se a tensão no ponto B, basta multiplicar a constante  $f_\sigma$  por 4. Esta técnica é conhecida como separação das tensões principais.

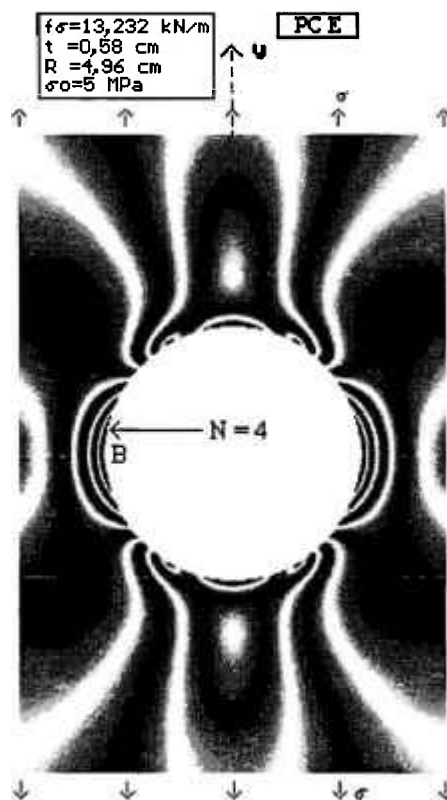


Figura 17 - Ilustração da franja de ordem inteira, na extremidade mais carregada do furo<sup>(19)</sup>.

Em regiões da superfície do modelo, não pertencentes à região do contorno, não se pode obter os valores individuais das tensões principais,  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$ , diretamente a partir das isóclinas e isocromáticas, sem usar dados suplementares ou sem empregar métodos numéricos. Nas referências <sup>(5,8,10)</sup>, são apresentados os métodos das Diferenças das Tensões de Cisalhamento e o Método Analítico de Separação. O primeiro método exige a aplicação da

técnica das diferenças finitas. O Método Analítico, descrito por DALLY<sup>(8)</sup>, envolve a aplicação dos conhecimentos das equações de Laplace e da Análise de Fourier.

Na análise fotoelástica, a distribuição de tensões é função da carga aplicada. Para determinar-se a distribuição de tensões com precisão, é necessária a calibração da constante fotoelástica de tensão  $f_{\sigma}$  do material birrefringente. Os valores de  $f_{\sigma}$  dados na literatura são valores típicos. Os valores reais de  $f_{\sigma}$  variam com o fornecedor, com a batelada, temperatura e idade do material birrefringente; é, portanto, necessário calibrar-se o material fotoelástico na época de realização do teste.

Uma das maneiras de se calibrar o material fotoelástico é analisar-se um disco de material birrefringente submetido a duas cargas concentradas, de compressão, aplicadas ao longo do diâmetro do disco<sup>(8)</sup>. Como é conhecida a solução analítica para os componentes de tensões em todos os pontos do disco, consegue-se relacionar a carga aplicada com a constante fotoelástica e com a ordem da franja isocromática. Aplica-se, então, uma carga concentrada “F” que faça com que uma franja de ordem inteira “N” passe pelo centro do disco. Nesta situação, a constante fotoelástica  $f_{\sigma}$  é calculada por :

$$f_{\sigma} = [8 / (\pi D)] (F/N) \quad (7)$$

onde “D” é o diâmetro do disco.

Após a análise de um modelo fabricado com material birrefringente, é necessário que os dados obtidos sejam extrapolados para o protótipo. Para isto, é necessário utilizar-se a análise dimensional. Para as variáveis que serão apresentadas a seguir, o subscrito  $m$  refere-se ao modelo e o subscrito  $p$  refere-se ao protótipo. Com base nesta notação, e de maneira simplificada, pode-se dizer que as tensões  $\sigma_p$  e deslocamentos no protótipo são dados por (8) e (9), respectivamente.

$$\sigma_p = \sigma_m (F_p/F_m) (h_m/h_p) (L_m/L_p) \quad (8)$$

$$\delta_p = \delta_m (F_p/F_m) (E_m/E_p) (h_m/h_p) \quad (9)$$

onde “F” é carga aplicada, “E” é o módulo de elasticidade, “h” é a espessura do modelo e “L” é alguma dimensão lateral típica do modelo. As referências<sup>(8,20,21,22)</sup> apresentam maiores informações sobre extrapolação de dados do modelo para o protótipo.

### 3 FUNDAMENTOS DA MECÂNICA ELÁSTICA LINEAR DE FRATURA

#### 3.1 Introdução

Para materiais contendo trincas, a teoria da elasticidade não é suficiente para prever o comportamento estrutural do material sob ação de esforços, do ponto de vista de se determinar o instante de ruptura da estrutura. A dificuldade em se fazer tal previsão é devida, principalmente, à geometria da ponta da trinca, a qual possui raio de curvatura próximo de zero, gerando tensões locais que tendem para o infinito. Com estas tensões locais singulares, tanto o limite de escoamento como a resistência última do material são excedidos, mesmo para pequenas cargas aplicadas; com isto, a abordagem usual para se prever as cargas de ruptura, com base nas teorias de ruptura convencionais, não mais se aplica. A Mecânica de Fratura é a ferramenta, em substituição a teoria convencional da elasticidade, que leva em consideração o estado singular de tensões na ponta da trinca. A Mecânica de Fratura tem como um dos objetivos promover respostas quantitativas para problemas específicos relacionados com a presença de trincas nas estruturas<sup>(23,24)</sup>.

A Mecânica de Fratura descreve a fratura de materiais em termos de leis da mecânica aplicada e de propriedades macroscópicas dos materiais. Ela permite que se faça uma avaliação quantitativa, baseada na análise de tensões, relacionando a resistência à fratura do material à carga aplicada e à geometria da estrutura ou componente contendo defeito. Normalmente, o defeito é substituído por uma trinca equivalente de modo que a resistência à fratura pode ser estabelecida em termos de condições de tensão-deformação na ponta da trinca. Na Mecânica de Fratura, assume-se que a influência das cargas aplicadas sobre o aumento de tamanho da trinca pode ser representada em termos de certos parâmetros, que caracterizam a intensidade tensão-deformação próximo à ponta da trinca. Estes parâmetros é que servem de base para a seleção das propriedades do material que são relevantes para o aumento de tamanho da trinca<sup>(25)</sup>.

Neste trabalho, os conceitos estão limitados ao campo da Mecânica Elástica Linear de Fratura (MELF), a qual é uma abordagem ao fenômeno de fratura baseada na teoria da elasticidade linear. A MELF fornece um procedimento analítico que relaciona o campo de tensões nas vizinhanças da ponta de uma trinca a outros parâmetros, tais como tensão nominal aplicada à estrutura, dimensão, forma e orientação da trinca em relação ao carregamento aplicado. Ela permite, em muitos casos, a representação das propriedades de fratura do material em termos de um único parâmetro<sup>(25)</sup>. A MELF, para efeito de projeto, restringe-se a materiais que se rompem sob o fenômeno de fratura frágil. A fratura frágil é o tipo de processo de ruptura do material que ocorre sem deformação plástica macroscópica, sob valores de tensões inferiores àqueles correspondentes ao escoamento generalizado, e com uma velocidade de propagação de trinca bem elevada<sup>(23)</sup>.

### 3.2 Tensões singulares em defeitos do tipo trinca

Na Figura 18, ilustra-se uma chapa infinita com um furo elíptico, com uma tensão nominal  $\sigma_0$  aplicada nas bordas infinitas e orientada segundo a direção do menor eixo da elipse. Demonstra-se<sup>(26)</sup> que, ao se utilizar os conceitos da elasticidade para esta condição de geometria e de carregamento, a tensão máxima, ilustrada na Figura 18, se dá ao longo do eixo “x”, na direção “y” e é dada pela equação (10)

$$\sigma_{YMAX} = \sigma_0 [ 1 + 2 (a / b) ] \quad (10)$$

onde “a” e “b” são os semi-eixos do furo. Com base na equação (10), observa-se que se a dimensão do semi-eixo menor da elipse “b” tender para zero, ou seja, se o furo elíptico passar a ter a forma de uma linha, então a tensão máxima tende para um valor infinito, independentemente do valor da tensão  $\sigma_0$  aplicada. Na abordagem convencional da elasticidade, o procedimento básico de segurança estrutural, em termos de projeto, seria, numa primeira análise, comparar-se a tensão máxima com alguma tensão de referência (limite de proporcionalidade, limite de escoamento, etc.). Observa-se, então, que no caso de estruturas com trincas, tal comparação não pode ser feita, pois a tensão máxima é um valor indeterminado. Assim, para analisar materiais contendo trincas, foi necessário introduzir-se um método que levasse em consideração o estado singular de tensões na ponta da trinca. A Mecânica de Fratura, desenvolvida por Irwin a partir de trabalhos de Inglis, Griffith e Westergaard, trata campos de tensões singulares na ponta da trinca, introduzindo um

parâmetro, denominado fator de intensidade de tensão  $K$ , que é função linear da carga aplicada ao material e depende da forma e dimensões da trinca<sup>(8)</sup>.

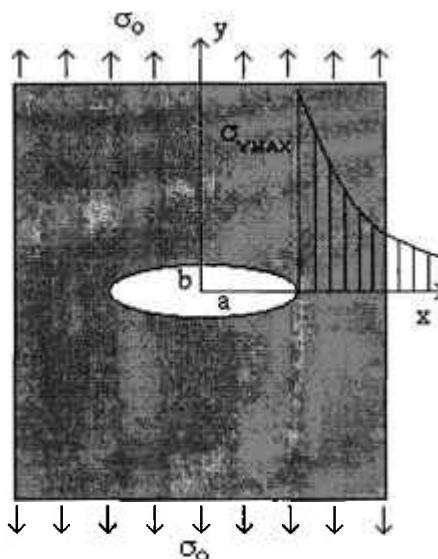


Figura 18 - Tensão máxima na borda de um furo elíptico de uma placa infinita.

### 3.3 Modos de carregamento de uma trinca e fator de intensidade de tensões

Uma trinca pode estar sujeita a três tipos de carregamentos, sendo esses tipos identificados na literatura através das denominações de modos de carregamento por abertura, por cisalhamento e por rasgamento. Os respectivos fatores de intensidade de tensões são denominados  $K_I$ ,  $K_{II}$  e  $K_{III}$ . Em geral, na prática, do ponto de vista da Mecânica de Fratura, o modo de abertura é o mais crítico. Na Figura 19, são ilustrados esses três tipos de modos isolados de carregamento de uma trinca.

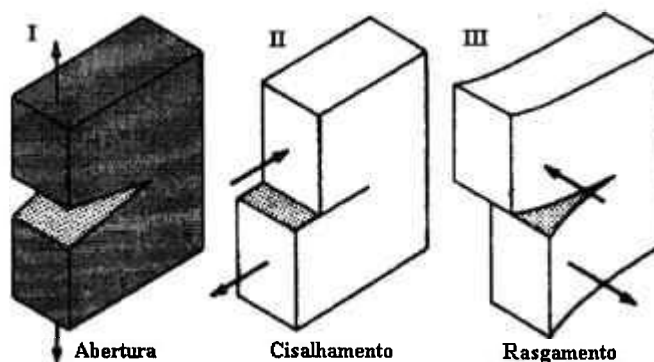


Figura 19 - Modos de carregamentos de uma trinca com base nos quais são definidos os fatores  $K_I$ ,  $K_{II}$  e  $K_{III}$ <sup>(27)</sup>.

Quando pode ser admitido um comportamento elástico-linear para o material (efeitos de plasticidade confinados à vizinhança imediata da ponta da trinca), pode-se usar o fator de intensidade de tensão  $K$ , fornecido pela Mecânica Elástica Linear de Fratura, para garantir a segurança contra fratura para estruturas contendo trincas.

Na Figura 20, são mostrados os sistemas de coordenadas cartesianas e cilíndricas, localizados na ponta da trinca e que são usados nos desenvolvimentos teóricos. Tendo por base o sistema cartesiano, define-se a seguir os modos de carregamento em função da existência ou não de tensões nas faces dos elementos de tensões.

$$\sigma_x = 0, \quad \sigma_y \neq 0, \quad \sigma_z \neq 0, \quad \tau_{xy} = 0 \quad (\text{modo I}) \quad (11)$$

$$\sigma_y = 0, \quad \tau_{xy} \neq 0 \quad (\text{modo II}) \quad (12)$$

$$\sigma_y = 0, \quad \tau_{yz} \neq 0, \quad \tau_{xy} \neq 0 \quad (\text{modo III}) \quad (13)$$

O campo de tensões na ponta de uma trinca pode ser tratado como uma combinação dos três tipos básicos de campos de tensões definidos (modos I, II e III). Dá-se, entretanto, nesta tese, um enfoque principal, em termos de implementação por meio de computador, ao cálculo do fator de intensidade relativo ao modo de carregamento por abertura (modo I).

Tendo por base o sistema de coordenadas mostrado na Figura 20, define-se  $K_I$  pela expressão (14)

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \sigma_y [2\pi r]^{1/2} \quad (14)$$

na condição de  $\theta$  igual a zero<sup>(25)</sup>.

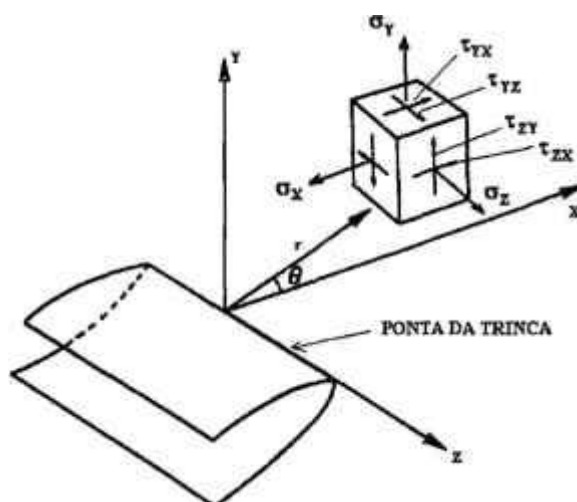


Figura 20 - Sistema de coordenadas cartesianas e cilíndricas na ponta de uma trinca<sup>(27)</sup>.

Para uma placa infinita com um furo elíptico e carregamento como indicado na Figura 21, demonstra-se<sup>(8)</sup> que o fator de intensidade de tensões  $K_I$  é dado por

$$K_I = \sigma_0 (\pi a)^{1/2} \quad (15)$$

onde “a” é a dimensão mostrada na Figura 21 e  $\sigma_0$  é a tensão aplicada nas bordas da placa. Observa-se, assim, que o parâmetro  $K_I$  engloba o carregamento aplicado na estrutura e a geometria do defeito, no caso a dimensão “a” da trinca. Da equação (15), conclui-se que o fator de intensidade de tensões  $K_I$  varia linearmente com a tensão aplicada  $\sigma_0$  e com a raiz quadrada do tamanho de trinca. Na Figura 22, para uma mesma situação de carregamento e de posição da trinca, são ilustrados os valores de  $K_I$  em função de  $\sigma_0$  para diferentes tamanhos de trinca ( $a_i$ ). Como unidades típicas de  $K_I$  têm-se  $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  e  $\text{psi}\cdot\text{in}^{1/2}$ .

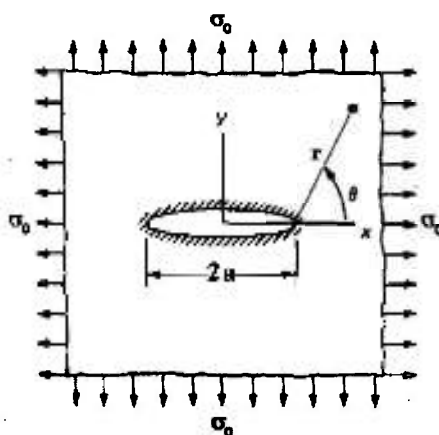


Figura 21 - Placa infinita com carregamento nas direções x e y e sistema de coordenadas<sup>(8)</sup>.

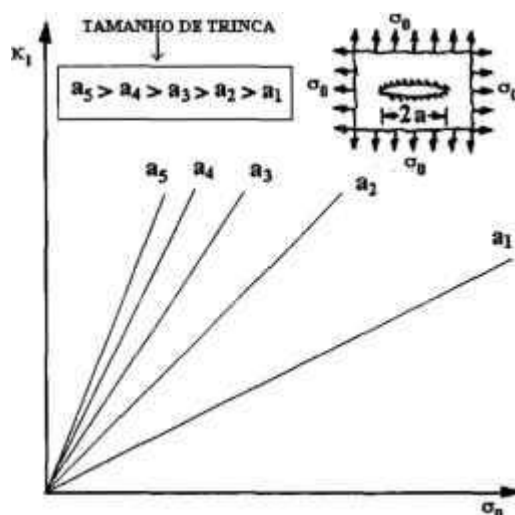


Figura 22 - Variação de  $K_I$  em função de  $\sigma_0$ , para diferentes tamanhos de trinca.



### 3.4 Equações para o campo de tensões nas vizinhanças da ponta da trinca

Em muitos casos práticos, é possível determinar-se o fator de intensidade de tensões, seja analiticamente ou por meio de métodos numéricos. Entretanto, em alguns casos, é necessário determinar-se  $K_I$  e  $K_{II}$  por meio de experimentos cuidadosamente controlados. Qualquer método experimental para a determinação do fator de intensidade de tensões depende do conhecimento completo das equações de campo de tensões e de deformações que sejam válidas na região da ponta da trinca. Neste trabalho, a região vizinha à ponta da trinca é dividida em três zonas, delimitadas por setores circulares, como mostrado na Figura 23. As zonas 1, 2 e 3 correspondem, respectivamente, às regiões  *muito próxima*,  *próxima* e  *distante* da ponta da trinca. Na zona 1, não está incluída a região circular, marcada com uma cor mais escura na Figura 23. Nesta região escura ocorre o estado tridimensional de tensões. A quantificação destas zonas, para efeito de determinação do fator de intensidade de tensões, é feita no Capítulo 4. Conforme será visto posteriormente, as equações do campo de tensões podem ser representadas como uma série de polinômios, sendo que o número mínimo de termos necessários para representar o campo de tensões reinantes em cada zona é variável.

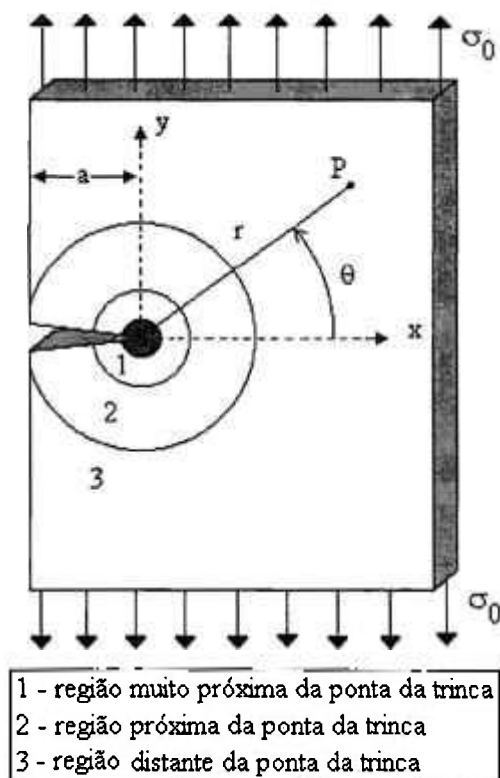


Figura 23 - Zonas 1, 2 e 3 nas vizinhanças da ponta da trinca.

As equações de campo de tensões podem ser representadas por uma série do tipo indicado em (16)

$$\sigma_{II} = \sum_{n=0}^N A_n r^{(n-1/2)} f_n(\theta) \sum_{m=0}^M B_m r^m g_m(\theta) \quad (16)$$

onde  $A_n$  e  $B_m$  são coeficientes a serem determinados,  $f_n(\theta)$  e  $g_m(\theta)$  são funções trigonométricas a serem determinadas; “ $r$ ” e “ $\theta$ ” são os componentes cilíndricos do sistema de coordenadas mostrado na Figura 23.

Na equação (16), para pequenos valores de “ $r$ ”, somente o primeiro termo da série contribui significativamente para  $\sigma_{II}$ ; isto ocorre para  $N=0$ , sendo que todos os outros termos se anulam<sup>(8)</sup>. A zona 1 é a região em que esta representação da série com um único termo é suficiente para determinar o campo de tensões.

À medida em que se afasta da ponta da trinca, os termos não singulares se tornam significativos e a representação do campo de tensões por meio de um único termo não é mais válida. Neste caso, termos adicionais têm que ser considerados na série de modo a aumentar-se a precisão na determinação do campo de tensões. A zona 2 é a região onde o campo de tensões pode ser representado, com precisão, considerando-se apenas alguns termos da série<sup>(8)</sup>.

Para valores maiores de “ $r$ ” (zona 3), é necessária a consideração de um grande número de termos da série, de modo a descrever com precisão o campo de tensões. Nesta zona, para determinação do fator de intensidade de tensões, como se trabalha com um grande número de coeficientes desconhecidos, faz-se necessária a utilização de um grande número de dados<sup>(6)</sup>.

Nos itens seguintes, são apresentadas as equações do campo de tensões para as zonas 1 e 2, para os modos de carregamento por abertura e por cisalhamento, considerando-se o sistema de coordenadas cilíndricas  $r, \theta, z$ , com origem na ponta da trinca, como mostrado na Figura 23. Essas equações se aplicam à análise de tensões, no domínio elástico linear, para um sólido isotrópico<sup>(27,28)</sup>.

### 3.4.1 Campo de tensões na região muito próxima da ponta da trinca

Neste caso, é utilizado um único coeficiente na representação do campo de tensões por meio de séries do tipo indicado na equação (16).

### 3.4.1.1 Modo I - carregamento por abertura

O coeficiente  $A_0$  da série da equação (16) é dado por (17) e os componentes  $\sigma_X$ ,  $\sigma_Y$ ,  $\tau_{XY}$  e  $\sigma_Z$  são dados, respectivamente, por (18), (19), (20) e (21)

$$A_0 = K_I / (2 \pi r)^{1/2} \quad (17)$$

$$\sigma_X = [ K_I / (2 \pi r)^{1/2} ] \cos(\theta/2) [ 1 + \sin(\theta/2) \sin(3 \theta/2) ] \quad (18)$$

$$\sigma_Y = [ K_I / (2 \pi r)^{1/2} ] \cos(\theta/2) [ 1 - \sin(\theta/2) \sin(3 \theta/2) ] \quad (19)$$

$$\tau_{XY} = [ K_I / (2 \pi r)^{1/2} ] \cos(\theta/2) \sin(\theta/2) \cos(3 \theta/2) \quad (20)$$

$$\sigma_Z = 0 \quad [ \text{estado plano de tensões} ]$$

$$\sigma_Z = \nu (\sigma_X + \sigma_Y) \quad [ \text{estado plano de deformações} ] \quad (21)$$

sendo  $\nu$  é o coeficiente de *Poisson*.

Segundo DALLY<sup>(8)</sup>, Chona mostrou que a zona 1 é muito pequena e está delimitada por um raio igual 2% do tamanho de trinca “a”, marcado a partir da ponta da trinca. Uma vez que a distribuição de tensões nesta região é tridimensional, as hipóteses de estado plano de tensões e estado plano de deformações não são válidas. Deste modo, os valores de  $A_0$  e  $K_I$ , calculados com base nas equações da zona 1, devem ser usados somente para se ter uma ordem de grandeza<sup>(8)</sup>.

### 3.4.1.2 Modo II - carregamento por cisalhamento

Para o modo II, na zona 1, o campo de tensões na condição de carregamento por cisalhamento<sup>(8)</sup> é dado por

$$\sigma_X = [ K_{II} / (2 \pi r)^{1/2} ] \sin(\theta/2) [ 2 + \cos(\theta/2) \cos(3 \theta/2) ] \quad (22)$$

$$\sigma_{XY} = [ K_{II} / (2 \pi r)^{1/2} ] \sin(\theta/2) \cos(\theta/2) \cos(3 \theta/2) \quad (23)$$

$$\tau_{XY} = [ K_{II} / (2 \pi r)^{1/2} ] \cos(\theta/2) [ 1 - \sin(\theta/2) \sin(3 \theta/2) ] \quad (24)$$

$$\sigma_Z = 0 \quad [ \text{estado plano de tensões} ]$$

$$\sigma_Z = \nu (\sigma_X + \sigma_Y) \quad [ \text{estado plano de deformações} ] \quad (25)$$

### 3.4.2 Campo de tensões região próxima da ponta da trinca

Na zona 2, uma região um pouco mais afastada da ponta da trinca, não se tem mais a influência do estado tridimensional de tensões. Nesta zona, o raio “r” é limitado a valores

tais que o campo de tensão possa ser representado, com precisão razoável (2 a 5%), utilizando-se um pequeno número de termos da série<sup>(8)</sup>.

### 3.4.2.1 Modo I - carregamento por abertura

Utilizando-se a representação da série com 6 coeficientes desconhecidos, têm-se<sup>(8)</sup> :

$$\begin{aligned}\sigma_X = & A_0 r^{-1/2} \cos(\theta/2) [ 1 - \text{sen}(\theta/2) \text{sen}(3 \theta/2) ] + 2 B_0 + \\ & A_1 r^{1/2} \cos(\theta/2) [ 1 + \text{sen}^2(\theta/2) ] + 2 B_1 r \cos(\theta) + \\ & A_2 r^{3/2} [ \cos(3 \theta/2) - (3/2) \text{sen}(\theta) \text{sen}(\theta/2) ] + 2 B_2 r^2 [ -\text{sen}^2(\theta) + 2 \cos(2 \theta) ]\end{aligned}\quad (26)$$

$$\begin{aligned}\sigma_Y = & A_0 r^{-1/2} \cos(\theta/2) [ 1 + \text{sen}(\theta/2) \text{sen}(3 \theta/2) ] + \\ & A_1 r^{1/2} \cos(\theta/2) [ 1 - \text{sen}^2(\theta/2) ] + \\ & A_2 r^{3/2} [ \cos(3 \theta/2) + (3/2) \text{sen}(\theta) \text{sen}(\theta/2) ] + 2 B_2 r^2 \text{sen}^2(\theta)\end{aligned}\quad (27)$$

$$\begin{aligned}\tau_{XY} = & A_0 r^{-1/2} \cos(\theta/2) \text{sen}(\theta/2) \cos(3 \theta/2) + \\ & - A_1 r^{1/2} \text{sen}(\theta/2) \cos^2(\theta/2) - 2 B_1 r \text{sen}(\theta) + \\ & - 3 A_2 r^{3/2} \text{sen}(\theta/2) \cos^2(\theta/2) - 2 B_2 r^2 \text{sen}(2 \theta)\end{aligned}\quad (28)$$

### 3.4.2.2 Modo II - carregamento por cisalhamento

O campo de tensões para o modo de cisalhamento na zona 2, segundo DALLY<sup>(8)</sup> é dado pelas equações (29), (30) e (31).

$$\begin{aligned}\sigma_X = & \sum_{n=0}^N C_n r^{(n-1/2)} [ (n-1/2) \text{sen}(\theta) \cos((n-3/2) \theta) + 2 \text{sen}((n-1/2) \theta) ] + \\ & \sum_{m=0}^M D_m r^m [ \text{sen}(m \theta) + m \text{sen}(\theta) \cos((m-1) \theta) ]\end{aligned}\quad (29)$$

$$\begin{aligned}\sigma_Y = & \sum_{n=0}^N C_n r^{(n-1/2)} [ -(n-1/2) \text{sen}(\theta) \cos((n-3/2) \theta) ] + \\ & \sum_{m=0}^M D_m r^m [ \text{sen}(m \theta) - m \text{sen}(\theta) \cos((m-1) \theta) ]\end{aligned}\quad (30)$$

$$\tau_{XY} = \sum_{n=0}^N C_n r^{(n-1/2)} [ \cos((n-1/2)\theta) - (n-1/2) \sin(\theta) \sin((n-3/2)\theta) ] + \sum_{m=0}^M D_m r^m [ -m \sin(\theta) \sin((m-1)\theta) ] \quad (31)$$

### 3.5 Tenacidade à Fratura

A tenacidade à fratura de um material é uma medida da energia que ela absorve antes e durante o processo de fratura. Trata-se de um parâmetro muito importante para caracterização do material, uma vez que ele está associado à resistência à fratura do material<sup>(23)</sup>.

A tenacidade de um material representa a sua capacidade inerente de resistir a uma dada intensidade de tensão na ponta da trinca presente neste material, evitando a sua fratura<sup>(23)</sup>. Para materiais com comportamento elástico-linear, a tenacidade pode ser descrita em termos do fator de intensidade  $K$ . Na condição de carregamento estático, tem-se a quantificação da tenacidade em termos de

- a)  $K_C$  - condição de estado plano de tensões e
- b)  $K_{IC}$  - condição de estado plano de deformações.

Para exemplificar a diferença entre  $K_C$  e  $K_{IC}$ , considere uma chapa com um furo elíptico, tendo, entretanto, espessura variável. Suponha que, para cada novo valor de espessura, se determine experimentalmente o valor de  $K_I$  crítico, mantendo-se constante as condições de temperatura. Este valor corresponderia à combinação da tensão aplicada com o tamanho da trinca e com a espessura da chapa, para a qual haveria o início de propagação de trinca. Colocando-se estes valores críticos num gráfico cartesiano em função da espessura da chapa, obtém-se um aspecto de comportamento semelhante ao indicado na Figura 24. Observa-se que, para pequenas espessuras, que correspondem ao estado plano de tensões, o valor de  $K_I$  crítico ( $K_C$ ) varia com a espessura da chapa. A partir de uma determinada espessura (região de estado plano de deformações), o valor de  $K_I$  crítico passa a independer da espessura da chapa, assumindo um valor constante, o qual é denominado de  $K_{IC}$ , tenacidade à fratura na condição de estado plano de deformações.

O parâmetro  $K_{IC}$  é relevante na avaliação de propriedades de materiais, porque é uma constante que independe das dimensões do corpo-de-prova. Em termos de segurança à

fratura, a decisão em termos de fator de intensidade de tensões é feita com base na seguinte desigualdade :

$$K_I < K_{IC} \quad (35)$$

Como  $K_{IC}$  é um limite inferior na curva mostrada na Figura 24, ele se presta bem a esta função, uma vez que irá garantir a segurança contra fratura nas condições de estado plano de tensões ou de deformações. Os testes para determinação de  $K_{IC}$  são normalizados<sup>(29)</sup>, sendo as dimensões do corpo de prova, entalhes e formas de carregamento padronizados.

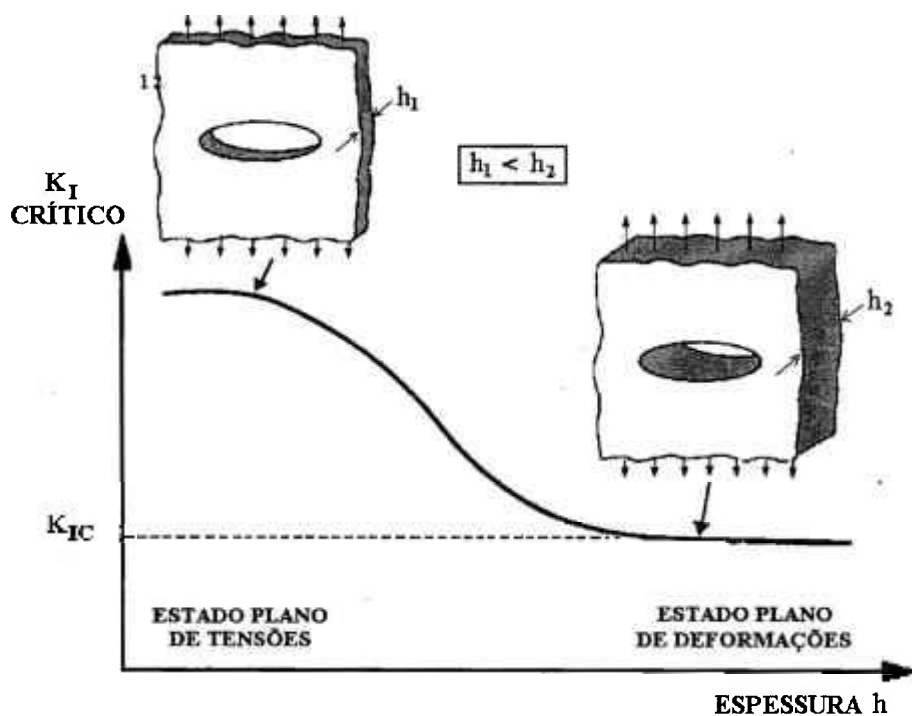


Figura 24 - Relação entre  $K_I$  crítico e espessura  $h$  de uma chapa.

## 4 FOTOELASTICIDADE APLICADA À MECÂNICA DE FRATURA

### 4.1 Introdução

Os métodos ópticos de análise de tensões têm exercido um papel importante na Mecânica de Fratura experimental. Estes métodos são particularmente adequados para determinar o fator de intensidade de tensões para configurações específicas de geometria e carregamento em situações onde os métodos numéricos ou analíticos não conseguem fornecer respostas satisfatórias. Além disso, as técnicas de análise experimental de tensões podem ser usadas para verificar soluções obtidas por outros métodos. Dentre os métodos ópticos, a fotoelasticidade é uma das técnicas utilizadas na determinação experimental de fatores de intensidade de tensões.

As investigações pioneiras do uso da fotoelasticidade no estudo dos campos de tensões na região da ponta de trincas são devidas a POST<sup>(30)</sup> *apud* Dally e WELLS & POST<sup>(31)</sup>. SANFORD<sup>(32)</sup> comenta que o artigo de Wells & Post focaliza somente aspectos qualitativos do padrão de franjas nas vizinhanças da ponta de uma trinca. Segundo DALLY<sup>(8)</sup>, Irwin, ao comentar o artigo citado, introduziu uma análise quantitativa ao padrão de franjas, possibilitando o cálculo do fator de intensidade de tensões. Irwin observou que as franjas isocromáticas formavam laços fechados na região próxima a ponta da trinca. A partir desta observação, desenvolveu as equações necessárias para calcular o fator de intensidade de tensões, com base em informações geométricas do ponto sobre o laço mais distante da ponta da trinca. Observou, ainda, que a inclinação destes laços era devida a uma tensão constante  $\sigma_{0x}$ , aplicada na direção paralela ao plano da trinca. Demonstrou, ainda, que este termo tinha de ser incluído na formulação das equações do campo de tensões próximo da ponta da trinca, de modo a se obter uma correta interpretação da distribuição das franjas isocromáticas. Segundo SANFORD<sup>(32)</sup>, justificativas analíticas para este termo adicional nas equações da Mecânica de Fratura de campo próximo foram apresentadas posteriormente por vários pesquisadores. Como resultado da aplicação do método de

Irwin, consegue-se quantificar dois parâmetros: o fator de intensidade de tensões  $K_I$  e a tensão constante  $\sigma_{0x}$ . É, então, conhecido como um método de dois parâmetros.

Outros pesquisadores trabalharam em cima do método de Irwin com o objetivo de melhorar a precisão do método, dando origem a outros métodos derivados, mas também, com base em dois parâmetros. BRADLEY & KOBAYASHI<sup>(33)</sup> modificaram o método de Irwin de modo a incluir, no cálculo de  $K_I$ , a contribuição de duas franjas. Esta formulação inclui hipótese simplificada e ainda não justificada<sup>(8)</sup>. SCHROEDL & SMITH<sup>(34)</sup> *apud* Dally desenvolveram um método com base nos estudos de Irwin, Bradley & Kobayashi, onde os dados coletados restringem-se a pontos do laço das franjas que tem interseção com uma reta perpendicular ao plano médio da trinca. ETHERIDGE & DALLY<sup>(35)</sup> fazem uma revisão sobre os métodos de dois parâmetros.

DALLY & RILEY<sup>(8)</sup> apresentam um método para calcular o fator de intensidade de tensões a partir de padrões fotoelásticos. Neste método, um conjunto de dados, selecionados na zona 2 (região *próxima* da ponta da trinca), é ajustado pelo método dos mínimos quadrados a uma expressão de tensões de cisalhamento máximas, com base nas equações de campo próximo modificadas. Este procedimento é denominado de método superdeterminístico (*overdeterministic*). Neste método, estão envolvidos seis parâmetros. Existem outros métodos, desta mesma natureza, que podem utilizar dados de franjas isocromáticas fora da zona 2. Entretanto, eles envolvem um número maior de parâmetros.

Nos itens seguintes, são apresentados os métodos para cálculo de parâmetros da Mecânica de Fratura, divididos nas categorias de dois parâmetros e de vários parâmetros. Nesta última categoria, é abordado somente o método apresentado por DALLY<sup>(8)</sup>. O método de BRADLEY & KOBAYASHI<sup>(33)</sup> não foi incluído uma vez que não é geral, em virtude da hipótese simplificada em que se apoia.

#### 4.2 Determinação de $K_I$ por métodos de dois parâmetros

Nesta categoria, são apresentados os métodos desenvolvidos por Irwin e o método de Smith & Schroedl. Ressalta-se que estes métodos são restritos à zona 1 (região *muito próxima* da ponta da trinca).



### 4.2.1 Método de Irwin

Na Figura 25, ilustra-se uma imagem isocromática gerada por computador<sup>(19)</sup> com base nas equações dos campos tensões de Westergaard, (18) a (20), referentes à zona 1, na condição de estado plano de tensões. Observa-se que as franjas isocromáticas formam circuitos fechados em torno da ponta da trinca. Nota-se que estes circuitos são simétricos em relação a uma linha vertical passando pela ponta da trinca. Nos estudos experimentais, entretanto, estes circuitos não são simétricos e apresentam inclinações em relação à direção vertical, como ilustrado na Figura 26.

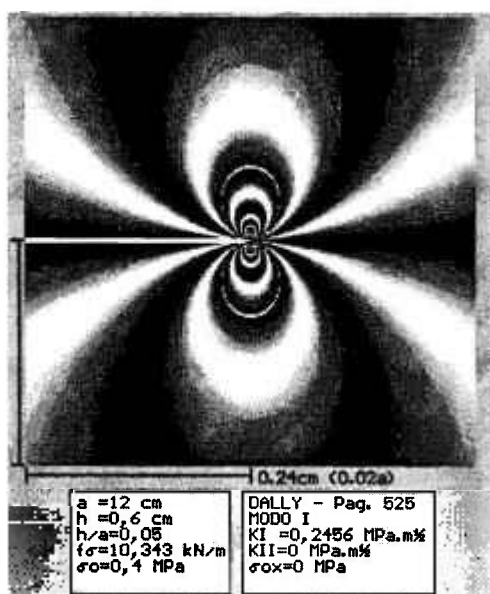


Figura 25 - Isocromática, na ponta de uma trinca, gerada por computador com base nas equações de tensões de Westergaard.

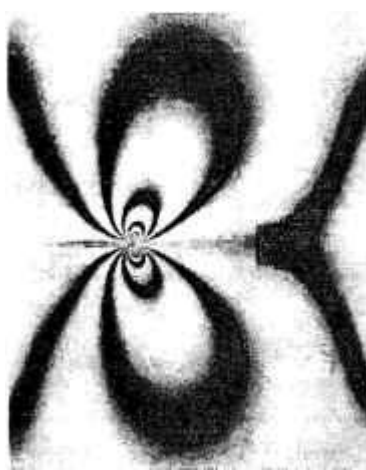


Figura 26 - Isocromática, na ponta de uma trinca, obtida experimentalmente<sup>(8)</sup>.

Com base nas observações experimentais, Irwin propôs a introdução de uma constante de tensão  $\sigma_{0x}$  nas equações de Westergaard. Assim, o campo de tensões na zona 1, passaria a ser expresso pelas equações (33) a (36)

$$\sigma_X = [ K_I / (2\pi r)^{1/2} ] \cos(\theta/2) [ 1 + \sin(\theta/2) \sin(3\theta/2) ] - \sigma_{0x} \quad (33)$$

$$\sigma_Y = [ K_I / (2\pi r)^{1/2} ] \cos(\theta/2) [ 1 - \sin(\theta/2) \sin(3\theta/2) ] \quad (34)$$

$$\tau_{XY} = [ K_I / (2\pi r)^{1/2} ] \cos(\theta/2) \sin(\theta/2) \cos(3\theta/2) \quad (35)$$

$$\sigma_{0x} = \sigma_{y_\infty} - \sigma_{x_\infty} \quad (36)$$

sendo  $\sigma_{y_\infty}$  a tensão remota aplicada na direção do eixo y e  $\sigma_{x_\infty}$  a tensão remota aplicada na direção do eixo x. Estas tensões remotas, bem como os dados geométricos utilizados por Irwin, são ilustrados na Figura 27.

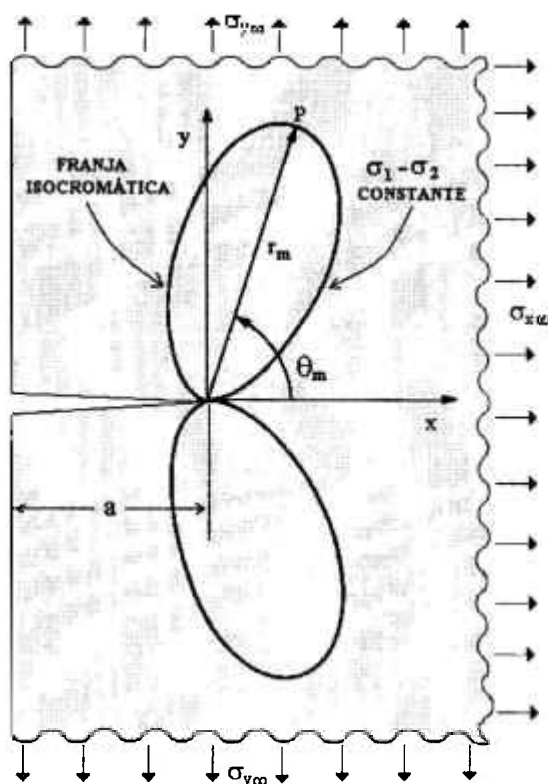


Figura 27 - Informações geométricas ( $r_m$  e  $\theta_m$ ) referentes ao método de Irwin.

Na Figura 28, é mostrada uma isocromática gerada por computador, tendo por base as equações (33) a (36), utilizando-se, entretanto, os mesmos dados de geometria, carregamento e material birrefringente referentes à isocromática da Figura 25. Na Figura 28, é ilustrada também, em cor branca, a franja de ordem  $N = 2$ .

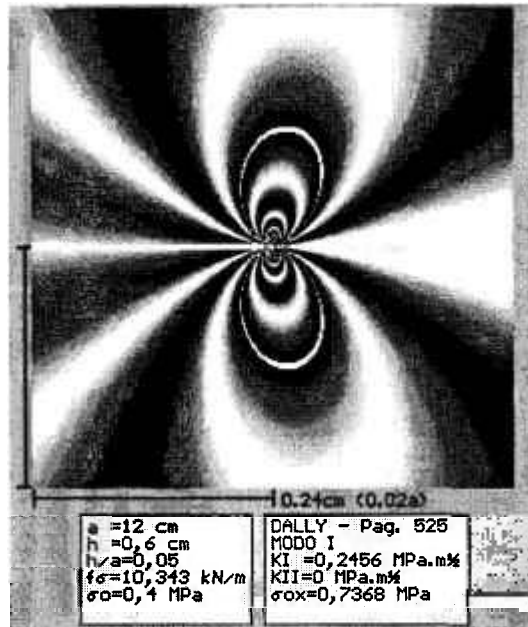


Figura 28 - Isocromática na ponta de uma trinca, gerada por computador com base nas equações de Westergaard e modificadas pelo fator de tensão  $\sigma_{0x}$  de Irwin.

No caso do estado plano de tensões, a tensão máxima de cisalhamento<sup>(8)</sup>  $\tau_m$  é dada pela equação (37).

$$\tau_m = [\sigma_1 - \sigma_2] / 2 \quad (37)$$

Combinando-se as equações (4) e (37), obtém-se a equação (38) para a tensão de cisalhamento máxima, mostrando que ela é função da constante fotoelástica de tensão  $f_\sigma$ , da espessura “h” do material birrefringente e da ordem de franja “N”. Com base na equação (38), conclui-se que, ao longo de uma franja isocromática de mesma ordem, a tensão de cisalhamento máxima é uma constante.

$$\tau_m = N f_\sigma / (2 h) \quad (38)$$

A equação (38) pode ainda ser reescrita, em função dos componentes cartesianos de tensão, como sendo igual a

$$\tau_m = (1/2) [ (\sigma_Y - \sigma_X)^2 + (2 \tau_X)^2 ]^{1/2}. \quad (39)$$

Elevando-se a equação (39) ao quadrado, chega-se à seguinte expressão:

$$(2 \tau_m)^2 = (\sigma_Y - \sigma_X)^2 + (2 \tau_X)^2 \quad (40)$$

Substituindo-se as equações (33) a (35) em (40), obtém-se a equação a (41), a partir da qual são extraídos os valores de  $\sigma_{0x}$  e de  $K_I$ .

$$(2 \tau_m)^2 = [ K_I^2 / (2 \pi r) ] \text{sen}^2(\theta) + [ 2 K_I \sigma_{0x} / (2 \pi r)^{1/2} ] \text{sen}(\theta) \cdot \text{sen}(3 \theta/2) + (\sigma_{0x})^2 \quad (41)$$

A partir de (41), o valor de  $\tau_m$ , é dado por

$$\tau_m = (1/2) \{ [K_I^2 / (2 \pi r) ] \text{sen}^2(\theta) + [ 2 K_I \sigma_{0x} / (2 \pi r)^{1/2} ] \text{sen}(\theta) \text{sen}(3 \theta/2) + (\sigma_{0x})^2 \}^{1/2} \quad (42)$$

Como a tensão  $\tau_m$  é uma constante ao longo de cada franja isocromática de mesma ordem, então ela não varia com o ângulo  $\theta$ , ou seja a derivada parcial de  $\tau_m$  em relação a  $\theta$  é zero ( $\partial \tau_m / \partial \theta = 0$ ). Para efeito de simplificação, o termo do lado direito, entre parêntesis, na equação (42), é chamado de  $A(r, \theta)$ . Assim, a equação (42) pode ser reescrita como :

$$\tau_m = (1/2) [A(r, \theta)]^{1/2} \quad (43)$$

Derivando-se (43) em relação a  $\theta$ , obtém-se

$$\partial \tau_m / \partial \theta = (1/4) [\partial A(r, \theta) / \partial \theta] / [A(r, \theta)]^{1/2} \quad (44)$$

Para que a derivada parcial da tensão de cisalhamento máxima  $\tau_m$  em relação a  $\theta$  seja nula, é necessário que se faça  $[\partial A(r, \theta) / \partial \theta] = 0$ . Com base nesta condição, obtém-se o seguinte valor para  $\sigma_{0x}$  :

$$\sigma_{0x} = - K_I (2 \pi r)^{-1/2} \{ \text{sen}(\theta) \cos(\theta) / [\cos(\theta) \text{sen}(3 \theta / 2) + (3/2) \text{sen}(\theta) \cos(3 \theta / 2)] \} \quad (45)$$

A equação (45) é válida para qualquer combinação de valores de raio “r” e ângulo  $\theta$  desde que estejam sobre uma mesma franja. Em DALLY & RILEY<sup>(8)</sup>, a impressão que se tem ao se ler o texto relativo a este assunto, nas página 509 e 510, é que a equação (45) só é válida para o ponto mais distante da franja. Irwin, ao implementar o seu método, adotou o ponto mais distante da franja em relação à ponta da trinca. Assim, a equação (45) assume a seguinte forma:

$$\sigma_{0x} = - K_I (2 \pi r_m)^{-1/2} \{ \text{sen}(\theta_m) \cos(\theta_m) / [\cos(\theta_m) \text{sen}(3 \theta_m / 2) + (3/2) \text{sen}(\theta_m) \cos(3 \theta_m / 2)] \} \quad (46)$$

Com a equação (46), consegue-se estabelecer uma relação entre  $K_I$  e  $\sigma_{0x}$ . Combinando-se, então (46) com (41), consegue-se obter-se o valor de  $\sigma_{0x}$  em função dos parâmetros geométricos da franja e da tensão de cisalhamento máxima  $\tau_m$ , que é calculada em função das propriedades de birrefringência e espessura do material e em função da ordem da franja que está sendo analisada. Assim, a nova expressão para  $\sigma_{0x}$  é dada por :

$$\sigma_{0x} = - 2 \tau_m \cos(\theta_m) / \{ \cos(3 \theta_m / 2) [\cos^2(\theta_m) + (9/4) \sin^2(\theta_m)]^{1/2} \} . \quad (47)$$

Substituindo-se, então, (47) em (41), obtém-se a equação para o fator de intensidade de tensões  $K_I$ .

$$K_I = 2 \tau_m (2 \pi r_m)^{1/2} / \sin(\theta_m) \left[ 1 + \left[ \frac{2}{(3 \tan \theta_m)^2} \right]^{-1/2} \left[ 1 + 2 \tan(3 \theta_m / 2) / (3 \tan(\theta_m)) \right] \right] \quad (48)$$

Tendo em vista que  $\tau_m$  é um valor conhecido, o fator de intensidade  $K_I$  em (48) só depende do raio máximo  $r_m$  e do ângulo  $\theta_m$ , ilustrados na Figura 27.

Na Figura 29, mostra-se a variação da função  $K_I$  com  $\theta$ , normalizada em relação a  $2 \tau_m (2 \pi r_m)^{1/2}$ . Observa-se, do ponto de vista matemático, que a equação (48) não pode representar o valor de  $K_I$  ao longo de toda a faixa de valores de 0 a 180 graus, uma vez que, nesta faixa, a equação apresenta singularidades e valores negativos. Assim, de modo que a equação (48) possa representar o fator de intensidade de tensões, tem-se de limitar a faixa angular.

Na Figura 30, mostra-se a variação de  $K_I / [2 \tau_m (2 \pi r_m)^{1/2}]$ , na faixa de interesse para cálculo de  $K_I$  (63 a 180 graus). ETHERIDGE & DALLY<sup>(35)</sup> mostraram que este método fornece o valor de  $K_I$  com erro de 5% em relação ao valor de  $K_I$  para o problema da trinca central, desde que o ângulo  $\theta_m$  esteja na faixa de 73 a 139 graus. Fora desta faixa, os erros crescem rapidamente e o método de Irwin não mais se aplica porque a equação (4) não mais representa o campo de tensões.

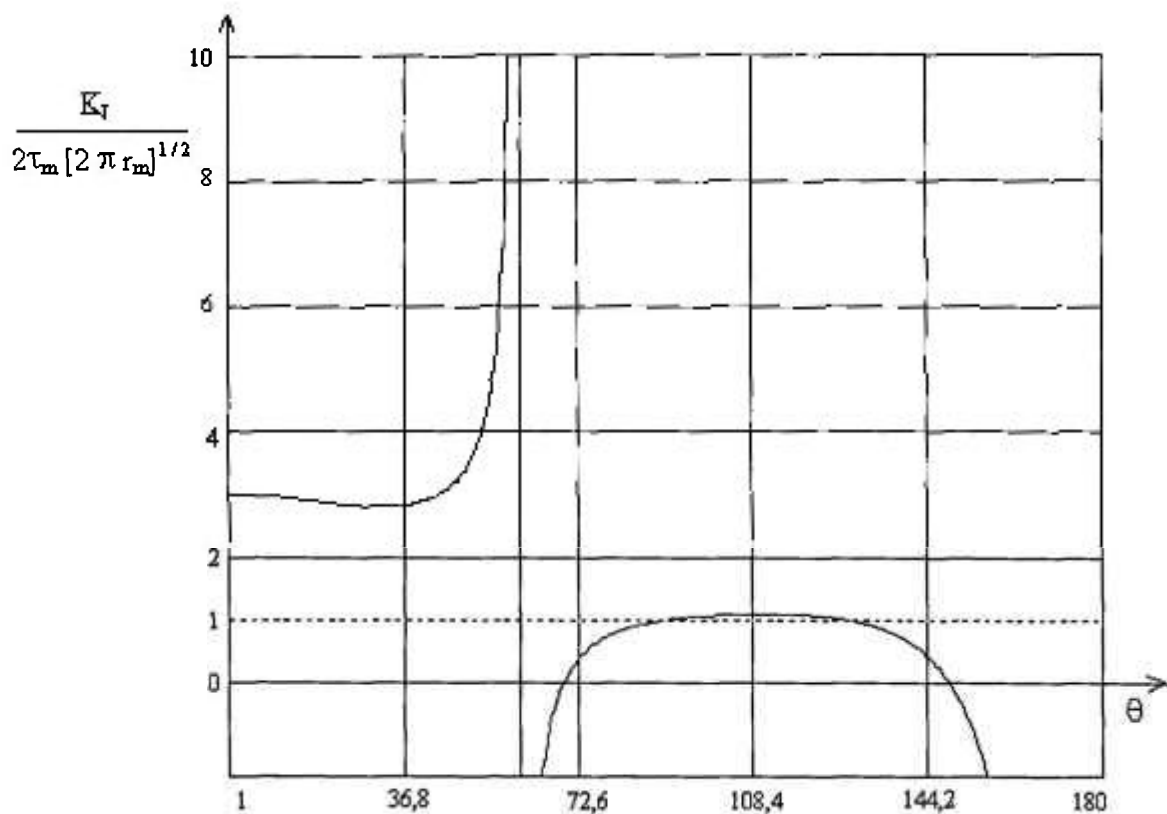


Figura 29 - Variação de  $K_I / [2\tau_m (2\pi r_m)^{1/2}]$  em função do ângulo  $\theta$  (0 a 180 graus).

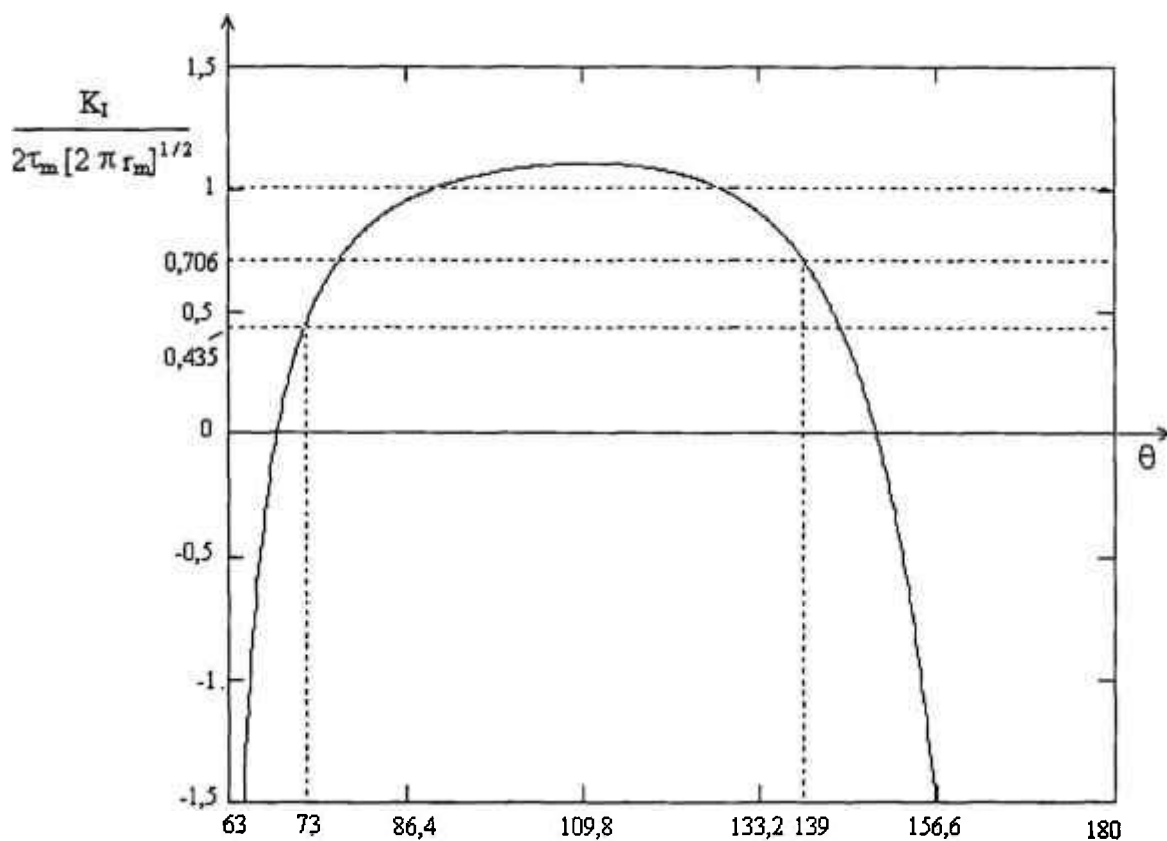


Figura 30 - Variação de  $K_I / [2\tau_m (2\pi r_m)^{1/2}]$  em função de  $\theta$  (63 a 180 graus).

O método de Irwin é também conhecido como *método do apogeu* e envolve a obtenção de dois parâmetros, o fator  $K_I$  e a tensão  $\sigma_{0x}$ . Este método requer a determinação de dados de um único ponto da franja isocromática, sendo “N” (ordem da franja),  $r_m$  (raio máximo) e  $\theta_m$  (ângulo de raio máximo) os dados a serem coletados. Infelizmente, é difícil medir-se  $r_m$  e  $\theta_m$  com precisão. Pequenos erros na medição destes parâmetros levam a grandes erros na determinação de  $K_I$  <sup>(8)</sup>.

#### 4.2.2 Método de Smith & Schroedl

No método de Smith & Schroedl, a coleta de dados é restringida a pontos de interseção de um linha perpendicular ao plano médio da trinca, passando pela ponta da trinca, com os laços das franjas isocromáticas. Com base nestes dados, o ângulo  $\theta$  para todos os dados assim coletados é igual a 90 graus. Assim, a equação (42) assume a forma de uma equação do segundo grau em  $K_I$  indicada em (49).

$$(2 \tau_m)^2 = K_I^2 / (2 \pi r) + 2 K_I \sigma_{0x} / (2 \pi r)^{1/2} + \sigma_{0x}^2 \quad (49)$$

A raiz positiva da equação (49) fornece o valor de  $K_I$ .

$$K_I = (\pi r)^{1/2} \{ [ 8 \tau_m^2 - \sigma_{0x}^2 ]^{1/2} - \sigma_{0x} \} \quad (50)$$

Desprezando-se o termo  $(\sigma_{0x})^2$  em comparação ao termo  $8 \tau_m^2$ , obtém-se a nova equação para  $K_I$  dada por (51).

$$K_I = (\pi r)^{1/2} [ 2^{1/2} (2 \tau_m) - \sigma_{0x} ] \quad (51)$$

A equação (51) permite que se calcule  $\sigma_{0x}$  em função de  $K_I$  e vice-versa. Coletando-se dados de dois pares distintos de franjas isocromáticas, identificadas através de suas ordens de franjas  $N_i$  e  $N_j$ , e respectivos raios  $r_i$  e  $r_j$ , e aplicando-se a equação (49) a estes dados, é possível calcular-se  $K_I$ , com base na equação (52).

$$K_I = \{ f_{\sigma} (2 \pi r_i)^{1/2} [ (N_i - N_j) ] / h \} [ 1 - (r_i / r_j)^{1/2} ] \quad (52)$$

Smith & Schroedl calculam  $K_I$  a partir da equação (52) para todas as permutações possíveis de pares de dados  $(N_i, r_i)$ ,  $(N_j, r_j)$ . Com base neste conjunto de valores de  $K_I$  obtidos, eles determinam a média  $(K_I)_{\text{MÉDIO}}$  e o desvio padrão  $(K_I)_\sigma$ . Os valores de  $K_I$  fora da faixa  $[(K_I)_{\text{MÉDIO}} - (K_I)_\sigma, (K_I)_{\text{MÉDIO}} + (K_I)_\sigma]$  são eliminados. O valor de  $K_I$  final é calculado como o valor médio dos  $K_I$  dentro da citada faixa.

### 4.2.3 Comentários sobre a precisão dos métodos de dois parâmetros

De acordo com DALLY & RILEY<sup>(8)</sup>, os dois métodos apresentados nos itens 4.2.1 e 4.2.2, são válidos na faixa angular variando de 73 a 139 graus, desde que  $(r_m / a) < 0,03$ . Se os erros cometidos na medição dos raios e ângulos de referência forem pequenos, então os métodos de dois parâmetros fornecem valores de  $K_I$  com uma exatidão de aproximadamente 5%. Quando o erro na determinação da localização da ponta da trinca e na medição do raio máximo for superior a 2%, o método de Irwin fornece resultados com melhor exatidão<sup>(8)</sup>. Entretanto, o método de Irwin é sensível a erros na medição do ângulo  $\theta$ . Quando se dispuser de somente uma franja, então, dos métodos citados, só há chance de se utilizar o método de Irwin.

### 4.3 Determinação de $K_I$ por métodos de vários parâmetros

Para utilização dos métodos de dois parâmetros, é necessário que os dados sejam coletados bem próximos da ponta da trinca e limitados pela relação  $(r_m / a) < 0,03$ . Somente nestas condições é que as equações (33) a (35) são válidas. Há, entretanto, duas dificuldades associadas com esta restrição. Uma delas, diz respeito a região limitada pela condição  $r / h < 0,5$ . Nesta região, ocorre o estado tridimensional de tensões e a hipótese de estado plano, utilizada nas deduções das equações (33) a (35), (37) a (40), não é válida. De modo a evitar erros devidos ao estado tridimensional de tensões na ponta da trinca, a seguinte desigualdade tem de ser satisfeita:

$$0,03 a > r_m > h/2. \quad (53)$$



Da desigualdade em (53), obtém-se o seguinte requisito para a espessura do modelo de material birrefringente de modo a restringir o tamanho da área em que ocorre o estado tridimensional de tensões :

$$h < 0,06 a. \quad (54)$$

Uma outra dificuldade está associada com a medição das coordenadas de posição,  $r_i$  e  $\theta_i$ , relativas a cada ponto sobre a franja isocromática. Tanto a largura da franja como uma definição pouco precisa da origem, em relação à qual, as coordenadas são medidas, acarretam erros em  $r_i$  e  $\theta_i$ . Para franjas muito próximas da ponta da trinca, com pequenos valores de  $r_i$ , os erros relativos  $\Delta r / r_i$  e  $\Delta \theta / \theta_i$  podem ser grandes. Com base nas Figuras 26 e 31, pode-se ter uma noção sobre a dificuldade de localização da ponta da trinca. Na Figura 31, por exemplo, não se consegue precisar exatamente onde é a ponta da trinca.



Figura 31 - Franjas isocromáticas obtidas experimentalmente.

De modo a contornar as dificuldades levantadas, utiliza-se então uma representação do campo de tensões com um número maior de termos. Em vez das equações (33) a (38) utilizam-se as equações (26) a (28) do Capítulo 3, aplicáveis à zona 2 (Figura 23), cujas incógnitas são os coeficientes  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B_0$ ,  $B_1$ ,  $B_2$ . Com outros termos adicionais, é possível utilizar-se dados de franjas situadas em regiões mais distantes da ponta da trinca.

Com as equações (26) a (28), é possível utilizar-se somente os dados de franjas contidos na zona 2.

Os coeficientes  $A_0, A_1, A_2, B_0, B_1, B_2$  são valores desconhecidos e tem que ser determinados. O fator de intensidade de tensões  $K_I$  pode ser obtido a partir do valor do coeficiente  $A_0$  e  $\sigma_{0x}$  a partir de  $B_0$ .

$$K_I = (2 \pi)^{1/2} A_0 \quad (55)$$

$$\sigma_{0x} = - 2 B_0 \quad (56)$$

Os coeficientes  $A_1, A_2, B_1$  e  $B_2$  são incluídos somente para aumentar a precisão na determinação de  $K_I$ <sup>(8)</sup>. Substituindo-se as equações (26) a (28) em (39) obtém-se a equação

$$[ N_k f_\theta / (2 h) ]^2 = [ (\sigma_Y - \sigma_X) / 2 ]^2 + \tau_{XY}^2 = D_k^2 + T_k^2 \quad (57)$$

onde  $D_k$  e  $T_k$  são dados pelas equações (58) e (59).

$$D_k = (\sigma_Y - \sigma_X) / 2 = \sum_{n=0}^2 (n-1/2) A_n r^{(n-1/2)} \text{sen}[(n-3/2)\theta] + \sum_{m=0}^2 B_m r^m [m \text{sen}(\theta) \text{sen}(m\theta) + \cos(m\theta)] \quad (58)$$

$$T_k = \tau_{XY} = - \sum_{n=0}^2 (n-1/2) A_n r^{(n-1/2)} \text{sen}(\theta) \cos[(n-3/2)\theta] - \sum_{m=0}^2 B_m r^m [-m \text{sen}(\theta) \cos(m\theta) + \text{sen}(m\theta)] \quad (59)$$

Quando as equações (58) e (59) são substituídas na equação (57), obtém-se uma equação de maior ordem equivalente à equação (41), a qual tem de ser resolvida de modo a que os coeficientes incógnitos sejam determinados. Infelizmente a equação (57) não é linear com os coeficientes incógnitos e os métodos matriciais associados com a álgebra linear não podem ser aplicados. São utilizados, então, métodos iterativos para solucionar o problema. Um desses métodos, descrito no item seguinte, é denominado de método superdeterminístico.

O uso de métodos superdeterminísticos é importante nesta aplicação porque se constitui numa ferramenta que possibilita que se faça uma média dos resultados de vários

pontos de dados coletados<sup>(8)</sup>. Este processo de média aumenta a precisão de  $K_I$  pelo fato de acomodar erros nas medições de  $r_i$  e  $\theta_i$ .

#### 4.3.1 Método superdeterminístico de Dally

Os coeficientes incógnitos  $A_n$  e  $B_m$ , ao substituir-se (58) e (59) em (57), aparecem como termos não-lineares, ou seja  $(A_0)^2$ ,  $A_0 \cdot B_0$ , etc. Esta não linearidade dificulta a solução dessa equação. Além disto, deseja-se utilizar muitos dados de franjas isocromáticas dentro da zona 2, de modo a obter-se  $K_I$  através de uma média estatística. O uso de um número de dados maior do que o número de incógnitas leva a um conjunto de relações superdeterminísticas, tendo cada relação a forma da equação (39). Uma das alternativas para resolver-se este problema é utilizar uma solução com base no método dos mínimos quadrados.

A solução é obtida definindo-se uma função  $g_k$ , expressa pela equação (60).

$$g_k = D_k^2 + T_k^2 - [ N_k f_\sigma / (2 h) ]^2. \quad (60)$$

Em (60), o subscrito  $k$  indica que o valor de  $g$  é avaliado no ponto de coordenadas  $(r_k, \theta_k)$  na franja isocromática de ordem  $N_k$ , situada na zona 2. Uma vez que  $D_k$  e  $T_k$  dependem de  $A_n$  e  $B_m$ , ao se introduzir em (60) os valores corretos destas constantes o valor de  $g_k$  será igual a zero para todos valores de  $k$ . O processo se dá, então, de forma iterativa. Atribuem-se valores iniciais para os coeficientes e calcula-se  $g_k$ , o qual será diferente de zero, pois ainda não se tem os valores corretos dos coeficientes. Os valores iniciais dos coeficientes têm, então, de serem corrigidos posteriormente. A correção dos coeficientes envolve um processo iterativo, baseado na expansão de  $g_k$  em séries de Taylor. Uma adequação do processo, na forma matricial, permite a obtenção dos incrementos a serem dados aos coeficientes em cada etapa seguinte do processo iterativo. O processo iterativo é interrompido quando os valores desses incrementos se tornam pequenos<sup>(8)</sup>. A matriz dos novos incrementos  $[\Delta]$  nos coeficientes é apresentada em (61) e (62), sendo função das matrizes  $[g]$  e  $[c]$  definidas, respectivamente, por (63) e (64) de acordo com a metodologia proposta por DALLY & RILEY<sup>(8)</sup>.

$$[\Delta] = [a]^{-1} [c] [g] \quad (61)$$

$$[\Delta] = \{ \Delta A_0, \Delta A_1, \dots, \Delta A_N, \Delta B_0, \Delta B_1, \dots, \Delta B_M \}^T \quad (62)$$

$$[g] = \begin{bmatrix} -g_1 \\ -g_2 \\ \vdots \\ -g_L \end{bmatrix} \quad (63)$$

$$[c] = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial A_0} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial A_N} & \frac{\partial g_1}{\partial B_0} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial B_M} \\ \vdots & & & & & \vdots \\ \frac{\partial g_L}{\partial A_0} & \dots & \frac{\partial g_L}{\partial A_N} & \frac{\partial g_L}{\partial B_0} & \dots & \frac{\partial g_L}{\partial B_M} \end{bmatrix} \quad (64)$$

$$[a] = [c]^T [c] \quad (65)$$

Nestas equações, o superescrito  $T$ , significa a transposta da matriz. O procedimento iterativo para obtenção dos coeficientes  $A_n$  e  $B_m$  é descrito a seguir :

- a) a partir das franjas isocromáticas, na zona 2, seleciona-se “L” pontos de dados significativos para representação destas franjas. Registra-se, então, o conjunto de dados  $(r_k, \theta_k, N_k)$  para cada um dos L pontos;
- b) assumem-se valores iniciais para os coeficientes incógnitos  $A_0, \dots, A_N, B_0, \dots, B_M$ . O algoritmo não é sensível aos valores iniciais adotados. Isto significa que quaisquer que sejam os valores iniciais adotados, haverá convergência do método<sup>(8)</sup>;
- c) calculam-se os elementos constituintes das matrizes  $[c]$ ,  $[g]$ ,  $[c]^T$ ,  $[a]$  e  $[a]^{-1}$ ;
- d) calculam-se os valores dos novos incrementos dos coeficientes com base na equação (61);
- e) calculam-se os novos valores dos coeficientes  $A_i$  e  $B_j$ , como indicado em (66);

$$\begin{aligned} A_0^{L+1} &= A_0^L + \Delta A_0 \\ &\vdots \\ A_N^{i+1} &= A_N^i + \Delta A_N \\ B_0^{L+1} &= B_0^L + \Delta B_0 \\ &\vdots \\ B_M^{i+1} &= B_M^i + \Delta B_M \end{aligned} \quad (66)$$

- f) repetem-se as etapas c) a e) até que os valores dos incrementos  $\Delta A_i$  e  $\Delta B_j$  sejam suficientemente pequenos. A convergência é rápida e bons resultados são normalmente obtidos com poucas iterações (menor do que 10 iterações) <sup>(8)</sup>;
- g) determina-se  $K_I$ , com base na equação (55).

#### 4.4 Trabalhos sobre uso da fotoelasticidade na obtenção de parâmetros Mecânica de Fratura.

O método de vários parâmetros, apresentado nesta tese, é específico para obtenção do fator de intensidade de tensões  $K_I$  e da tensão  $\sigma_{0x}$ . Entretanto, a mesmo procedimento pode ser usado para calcular outros parâmetros, como a localização da ponta da trinca,  $K_I$  e  $\sigma_{0x}$  (SANFORD<sup>(36)</sup>) ou mesmo  $K_I$ ,  $K_{II}$  e  $\sigma_{0x}$  (SANFORD & DALLY<sup>(37)</sup>).

São relacionados, a seguir, vários trabalhos relativos à obtenção de parâmetros da Mecânica de Fratura com base na análise fotoelástica: BARKER et al<sup>(38)</sup>, MARLOFF<sup>(39)</sup>, BRADLEY & KOBAYASHI<sup>(40)</sup>, SCHROEDL et al<sup>(41)</sup>, SMITH & SMITH<sup>(42)</sup>, THEOCARIS & GDOUTOS<sup>(43)</sup>, DALLY & SANFORD<sup>(44)</sup>, GDOUTOS & THEOCARIS<sup>(51)</sup>, ETHERIDGE & DALLY<sup>(46)</sup>, DURELLI<sup>(47)</sup>, SMITH<sup>(48)</sup>, OLADIMEJI<sup>(49)</sup>, SMITH<sup>(50)</sup>, MORTON & RUIZ<sup>(51)</sup> e DOYLE et al<sup>(52)</sup>.

Vários trabalhos envolvendo a aplicação da fotoelasticidade na determinação de parâmetros da Mecânica de Fratura vem sendo desenvolvidos na PUC/RIO, sendo alguns deles citados a seguir: ARAI<sup>(53)</sup>, COSTA<sup>(54)</sup>, REBELLO<sup>(55)</sup>, CAVACO & FREIRE<sup>(56)</sup>, FREIRE & CAVACO<sup>(57)</sup> e TIAGO & FREIRE<sup>(58)</sup>.

Alguns desses trabalhos citados permitem a incorporação de dados situados na zona 3, denominada neste trabalho de zona *distante* da ponta da trinca. Neste caso, é utilizado um número maior de coeficientes.

## 5 PROCESSAMENTO DE IMAGENS DIGITAIS

Como mostrado no Capítulo 2, as imagens geradas num experimento fotoelástico podem ser coloridas, ao se utilizar luz branca no polariscópio, ou em matizes de uma mesma cor, no caso de polariscópio alimentado com luz monocromática. Este segundo tipo de imagem pode ser também gerado com luz branca, desde que se utilize um filtro monocromático apropriado. Neste caso, as matizes da imagem correspondem à cor do filtro usado. As imagens em matizes de uma mesma cor podem ser manipuladas, dentro do Processamento de Imagens Digitais (PID), por meio dos algoritmos disponíveis para imagens em níveis de cinza.

A disponibilização de recursos computacionais e de equipamentos de aquisição e digitalização de imagens tem gerado trabalhos interessantes, unindo a área de Mecânica de Fratura, Fotoelasticidade e Processamento de Imagens Digitais. As referências<sup>(59-68)</sup> são exemplos típicos destes trabalhos.

Neste Capítulo, procura-se dar os conceitos básicos de processamento de imagens digitais utilizados no desenvolvimento do trabalho. Juntamente com o conceito de filtros pontuais e espaciais e com operações de esqueletonização e de afinamento, são apresentados resultados de aplicação destas operações sobre imagens típicas. Os tópicos abordados neste Capítulo tem como base as referências<sup>(69-81)</sup>.

### 5.1 Conceitos básicos de processamento de imagens digitais

#### 5.1.1 Imagem digital e *pixel*

A imagem fotoelástica gerada no campo de visão de um polariscópio é uma função contínua de cores, de duas variáveis espaciais. Esta imagem pode ser registrada pela visão do observador, por máquina fotográfica ou por câmara de vídeo. A imagem analógica de

uma câmara de vídeo não pode ser diretamente processada por computador. Para que se possa realizar operações computacionais sobre tal imagem, é necessário que a mesma seja convertida para a forma digital. Colocada nesta forma, a imagem espacial contínua é substituída por um arranjo matricial, onde os elementos desta matriz são denominados *pixels*.

O *pixel*, a unidade fundamental de uma imagem, possui informações sobre as cores ou níveis de cinza da imagem. A unidade computacional básica é o *bit*. Dependendo do número de *bits* que se utiliza para armazenar as informações contidas num *pixel*, as imagens podem ser classificadas como sendo de 1, 8 ou 24 *bits*.

### 5.1.2 Paleta de cores e escala de cinza

Numa imagem de 8 *bits*, o valor de cada *pixel* é um índice numa tabela de cores. Através do índice fornecido, é feito um acesso à paleta, a qual identifica as intensidades relativas de azul, verde e vermelho que compõem a cor do *pixel* mostrado na tela do monitor. Este índice varia de 0 a 255. Combinações adequadas dessas intensidades geram imagens em níveis de cinza.

Na Figura 32, ilustra-se uma escala de 256 níveis cinzas, variando do preto ao branco. No eixo horizontal, representa-se o índice através do qual o *pixel* é identificado e no eixo vertical mostra-se o nível de cinza com o qual este *pixel* é representado, por exemplo, na tela do monitor de vídeo de um microcomputador.

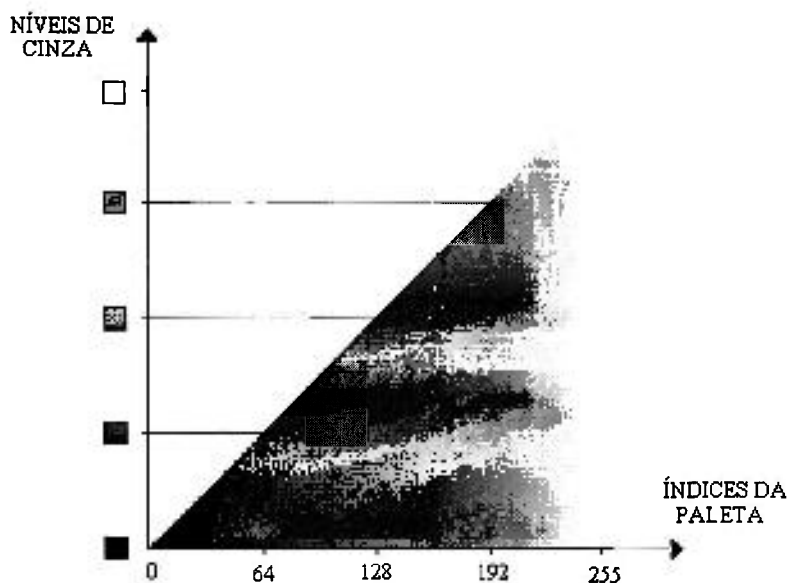


Figura 32 - Escala de 256 níveis de cinzas.

Nos algoritmos computacionais com imagens de 8 *bits*, em níveis de cinza, os cálculos são feitos com os índices da paleta de cores. Neste trabalho, um *pixel* será referenciado, genericamente, por  $P_i$ , o qual, em termos de operações matemáticas, representa um valor entre 0 e 255.

### 5.1.3 Tipos de imagens

#### a) imagem de 1 *bit* ou imagem monocromática

Este tipo de imagem contém duas cores, normalmente preta e branca. Cada *pixel* é representado por 1 *bit* e cada *byte* representa 8 *bits*. O *bit* mais à esquerda é o *bit* mais significativo do primeiro *byte*. O *bit* 0 representa uma cor de *pixel* dada pela primeira entrada na paleta e o *bit* 1 representa a cor do *pixel* dada pela segunda entrada.

#### b) imagem de 8 *bits* (em níveis de cinza com paleta de cores)

Este tipo de imagem contém até 256 cores ou níveis de cinza. Cada *pixel* é representado por um único *byte* e pode variar de 0 a 255. O valor do *pixel* é um índice nas 256 entradas da paleta de cores.

#### c) imagem de 24 *bits* (RGB)

Este tipo pode conter até 16 milhões de cores. Cada *pixel* é representado por 3 *bytes* contendo as intensidades relativas de azul, verde e vermelho para cada *pixel*. A ordem do *byte* num *pixel* RGB é azul (*Blue*), verde (*Green*) e vermelho (*Red*). Uma imagem de 24 *bits* não tem paleta. Neste caso, os *pixels* não são manipulados através de índices. Entretanto, uma imagem de 24 *bits* pode ser convertida numa imagem de 8 *bits*, a qual pode então ser processada por meio de algoritmos de processamento de imagens digitais de 8 *bits*. Ao ser convertida para 8 *bits*, a imagem de 24 *bits* passa a ter uma paleta de cores correspondente. Neste processo, há, na realidade, perda de informações de cores da imagem original. Os algoritmos procuram, entretanto, fazer com que a imagem de 256 cores seja a mais próxima possível da imagem de 16 milhões de cores.

### 5.1.4 Histograma de uma imagem

O histograma de uma imagem é uma ferramenta de quantificação do número de cada uma das cores presentes na imagem. No caso de imagens de 8 *bits*, em níveis de cinza,



tem-se um único histograma. Já para as imagens de 8 *bits* coloridas, tem-se três histogramas, cada um quantificando os componentes de cores vermelho, verde e azul. Na Figura 33, ilustra-se uma imagem em níveis de cinza e o respectivo histograma.

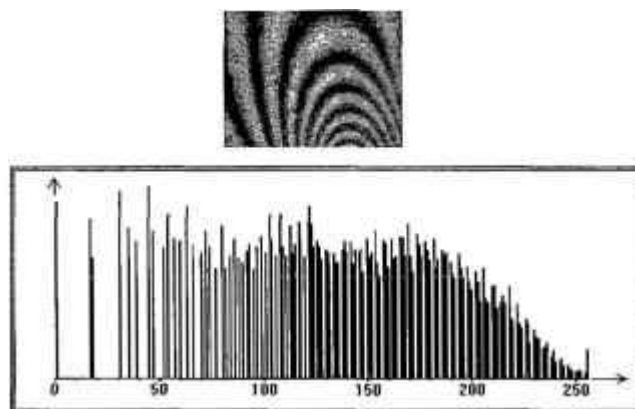


Figura 33 - Ilustração de uma imagem em níveis de cinza e respectivo histograma.

### 5.1.5 Digitalização de imagens

No processo de digitalização, uma imagem é varrida, ao longo de linhas horizontais, de cima para baixo, e registrados os pontos da imagem em função da resolução espacial adotada. A resolução espacial é o número de pontos por unidade de comprimento adotada. Assim, na literatura inglesa, a resolução espacial é dada em *dpi* (*dots per inch*). Na literatura portuguesa, costuma-se encontrar, também, a abreviatura *ppp*, significando pontos por polegada. Quanto maior a resolução espacial, melhor a visualização de detalhes da imagem original, como mostrado na Figura 34. Entretanto, quanto maior a resolução, maior é o número de pontos da matriz que compõe a imagem digitalizada. A resolução da imagem pode ser definida também em termos do número de cores. Assim, uma imagem com um grande número de cores ao ser digitalizada com um equipamento que só comporta um pequeno número de cores, irá perder qualidade em termos de cores.

O processo de digitalização de fotografias pode ser feito por meio de *scanners*. Já no caso de imagens de câmaras de vídeo analógicas, a digitalização é feita por meio placas digitalizadoras de vídeo (*frame grabbers*), a partir das quais pode-se ver no monitor de um computador a imagem vista pela câmara. Na Figura 35, ilustra-se o processo de digitalização de imagens a partir de *scanner* e de câmara de vídeo. Em geral, essas placas possuem um sistema gerenciador de imagens que permite que uma determinada imagem presente na

tela do monitor de um computador seja capturada e convertida em arquivo de imagem do tipo BMP, PCX. Estes arquivos é que são submetidos a operações de Processamento de Imagens Digitais (PID). O formato PCX é padrão do *software Paintbrush*. O formato BMP é um formato padrão de imagens do *Windows*.

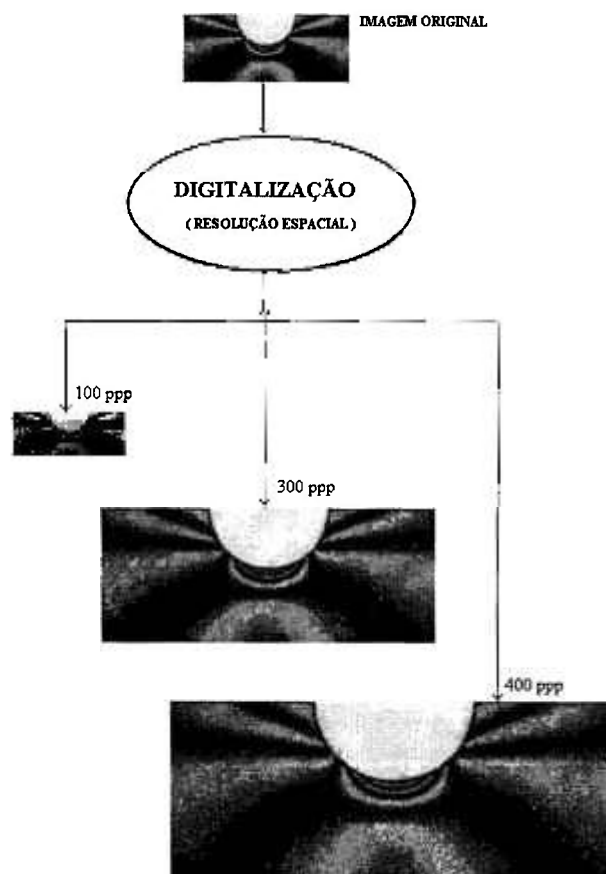


Figura 34 - Exemplo de uma imagem digitalizada com várias resoluções espaciais.

## 5.2 Operações de processamento de imagens digitais

Nem sempre a imagem obtida a partir do experimento fotoelástico está na forma adequada para imediato processamento. Ruídos de digitalização, bem como partes não envolvidas diretamente com o fenômeno fotoelástico podem estar presentes com a informação principal que a imagem traz. Além disto, outras vezes a imagem tem que ser colocada numa posição adequada onde se possa tirar as informações geométricas necessárias. Assim, antes de serem submetidas às operações principais de PID, a imagem tem que passar por um pré-processamento. A utilização de filtros é uma operação típica de pré-processamento

de imagens. Tais filtros podem atuar em um único *pixel* (filtros pontuais) ou num grupo de *pixels* (filtros espaciais).

A obtenção dos pontos de extinção da luz numa franja isocromática em níveis de cinza pode ser feita em termos da procura da menor intensidade luminosa. Isto pode ser feito, por meio de operações de PID, conhecidas como afinamento (*thinning*).

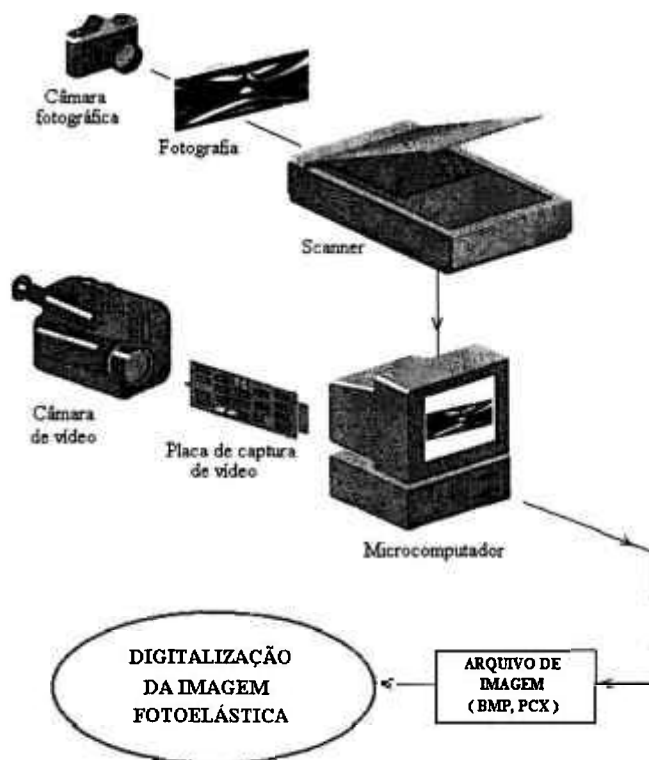


Figura 35 - Esquema do processo de digitalização de imagens.

Nas Figuras mostradas nos itens 5.2.1 e 5.2.2, cada pequeno quadrado, com um número variando de 0 a 255, ou um quadrado com um mesmo nível de cinza, representa um *pixel* da imagem. Nas Figuras referentes a operações de transformações de escala de cinzas, no eixo horizontal tem-se o índice relativo ao nível de cinza da imagem original e no eixo vertical o índice  $P_{MOD}$  relativo ao nível de cinza resultante da operação.

### 5.2.1 Filtros pontuais e exemplos de aplicação a uma imagem isocromática

As definições dadas a seguir referem-se a imagens em níveis de cinza e são operações realizadas *pixel a pixel*.

## Binarização

Na binarização, é utilizado um valor de nível de cinza de referência, identificado pelo índice  $P_{LIM}$ ; com esta operação, os níveis de cinza abaixo dele são modificados para a cor preta (índice 0) e os acima dele são modificados para a cor branca (índice 255), como ilustrado nas Figuras 36 e 37. Esta é uma das operações auxiliares básicas utilizadas no processamento de franjas isocromáticas digitais.

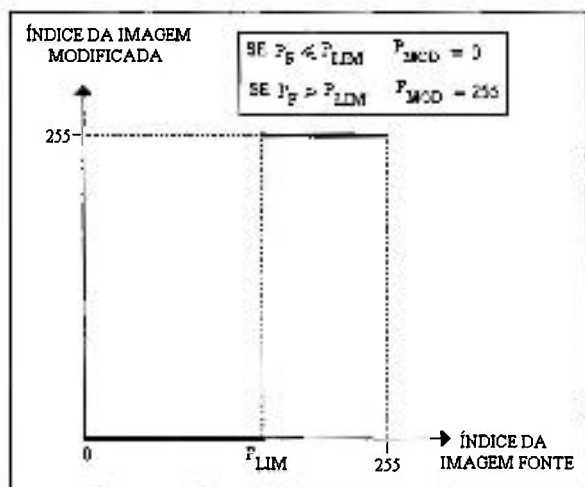


Figura 36 - Transformação de binarização.

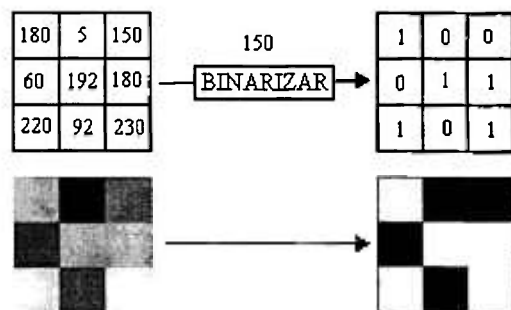


Figura 37 - Ilustração da operação de binarização.

## Negativo

O negativo de uma imagem é feito com base na transformação de escala de níveis de cinza ilustrada na Figura 38. O efeito final sobre os *pixels* é mostrado na Figura 39.

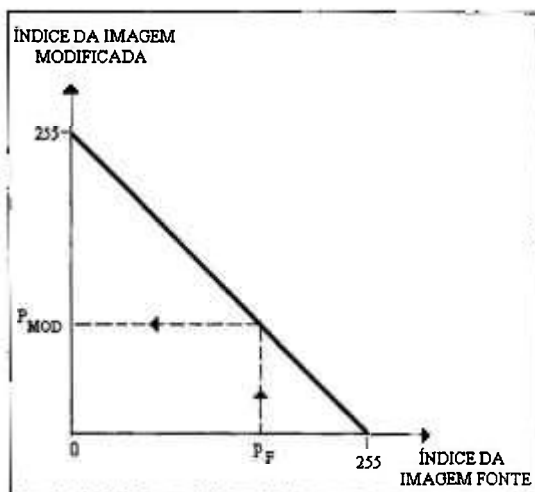


Figura 38 - Transformação negativo.

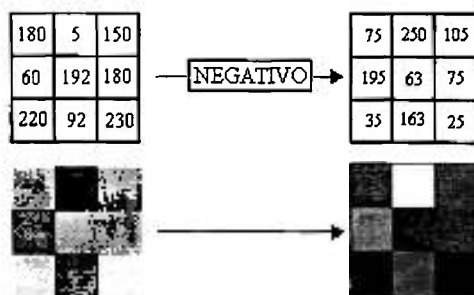


Figura 39 - Ilustração do negativo de uma imagem.

## Brilho

Nesta operação, fornece-se um valor  $\Delta_P$ , mostrado na Figura 40, que pode ser positivo ou negativo, o qual é adicionado ao valor de cada *pixel* presente na imagem, com a seguinte condição : se o valor resultante for negativo, a intensidade do *pixel* é colocada na cor preta. Se o valor de  $\Delta_P$  é positivo, a imagem fica mais clara, se negativa torna-se mais escura. Na Figura 40, ilustra-se esta operação, onde o valor de  $\Delta_P$  é positivo.

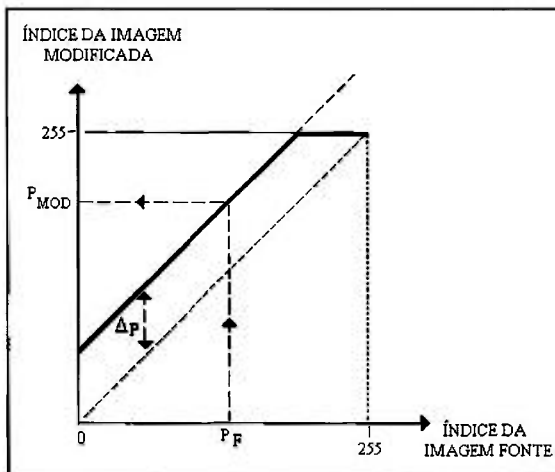


Figura 40 - Transformação de brilho.

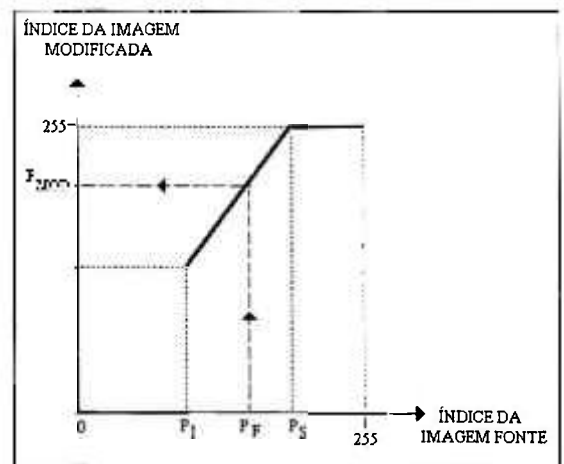


Figura 41 - Transformação de contraste.

## Contraste

Com esta operação, fornece-se uma faixa de valores de níveis de intensidade delimitada por  $P_1$  e  $P_S$ ; se o valor do índice do *pixel* for menor do  $P_1$ , a intensidade do *pixel* é colocada na cor preta; se estiver acima de  $P_S$ , é colocada na cor branca. Caso caia dentro da faixa, a intensidade é identificada pelo índice  $P_{MOD}$ , dado por (67)

$$P_{MOD} = 255 (P_F - P_1) / (P_S - P_1) \quad (67)$$

onde  $P_F$  é o índice do *pixel* da imagem analisada. Estes índices são indicados na Figura 41.

## Limita Max

Nesta operação, é fornecido um índice de referência  $P_{LIM}$ , com base no qual é tomada a seguinte decisão: se o índice do *pixel* for maior do que  $P_{LIM}$ , atribui-se a este *pixel* a intensidade correspondente a  $P_{LIM}$ . Caso contrário, como ilustrado na Figura 42, o *pixel* continua com sua intensidade original.

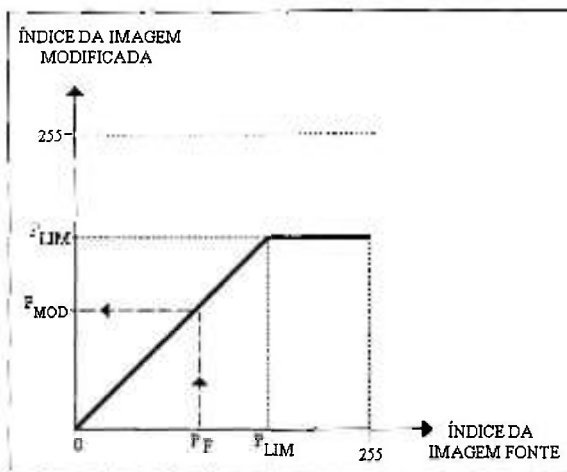


Figura 42 - Transformação de limite de nível de cinza a um valor máximo.

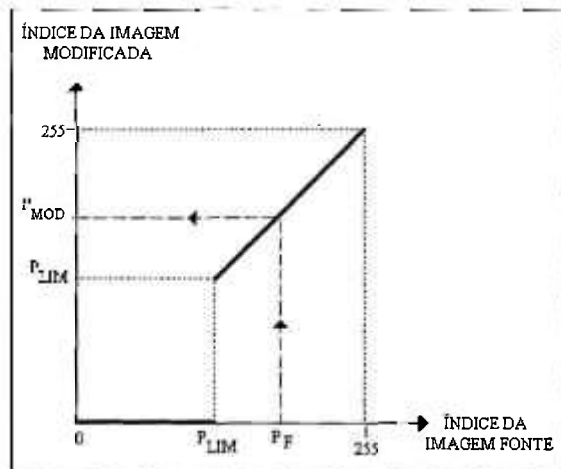


Figura 43 - Transformação de limiar acima.

### Limiar Acima

Um índice de referência  $P_{LIM}$  também é necessário nesta operação, como ilustrado na Figura 43. Se o índice do *pixel* for menor do que  $P_{LIM}$ , a cor do *pixel* passa a ser preta, caso contrário, ela permanece com a intensidade original.

### Multiplicação

Esta operação consiste em se multiplicar o valor do índice do *pixel* da imagem original por uma constante maior do que a unidade, como mostrado na Figura 44.

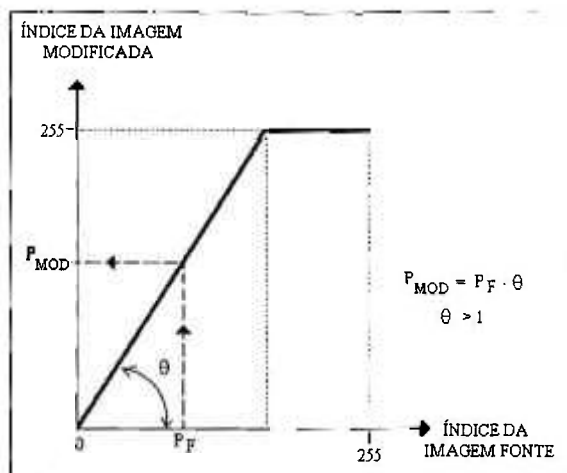


Figura 44 - Transformação de multiplicação.

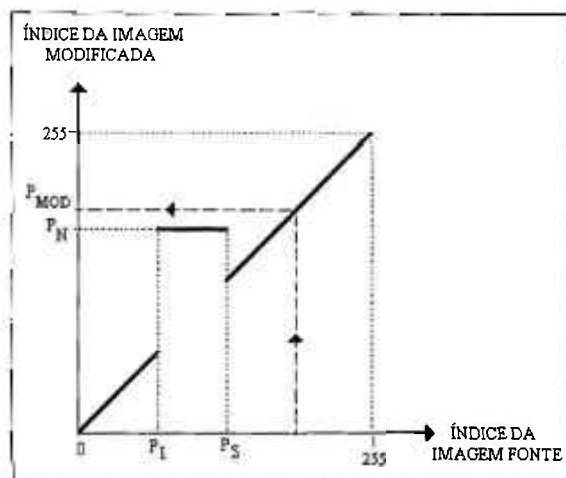


Figura 45 - Transformação de troca de nível de intensidade.

### Troca Nível

A troca de nível consiste em se fazer com que o valor dos níveis de cinza numa faixa delimitada pelos índices  $P_I$  e  $P_S$ , sejam colocados num nível de cinza fornecido e identificado pelo índice  $P_N$ , como mostrado na Figura 45. Caso esteja fora da faixa, o nível de cinza do *pixel* permanece como antes.

### Dente de Serra

A operação dente de serra é ilustrada na Figura 46, onde no caso em questão, os níveis de cinza foram divididos em três faixas. Um número maior de divisões pode ser utilizado.

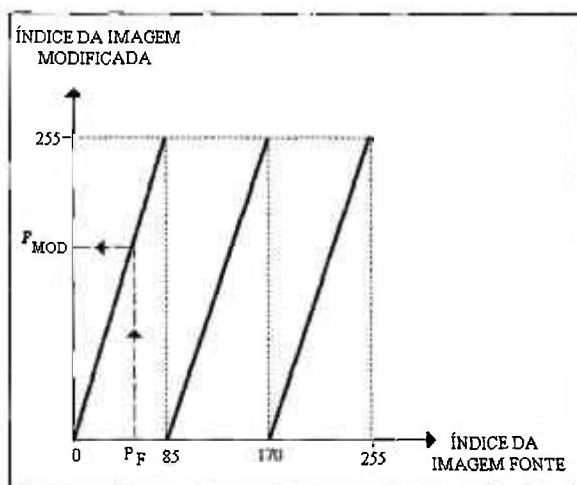


Figura 46 - Transformação tipo dente de serra.

A seguir, são apresentados os resultados de aplicação dos filtros pontuais a parte de uma isocromática típica na ponta de uma trinca, mostrada no canto esquerdo superior da Figura 47. Os resultados de aplicação dos filtros à isocromática original, mostrados na Figura 47, são acompanhados dos respectivos parâmetros usados nos filtros.

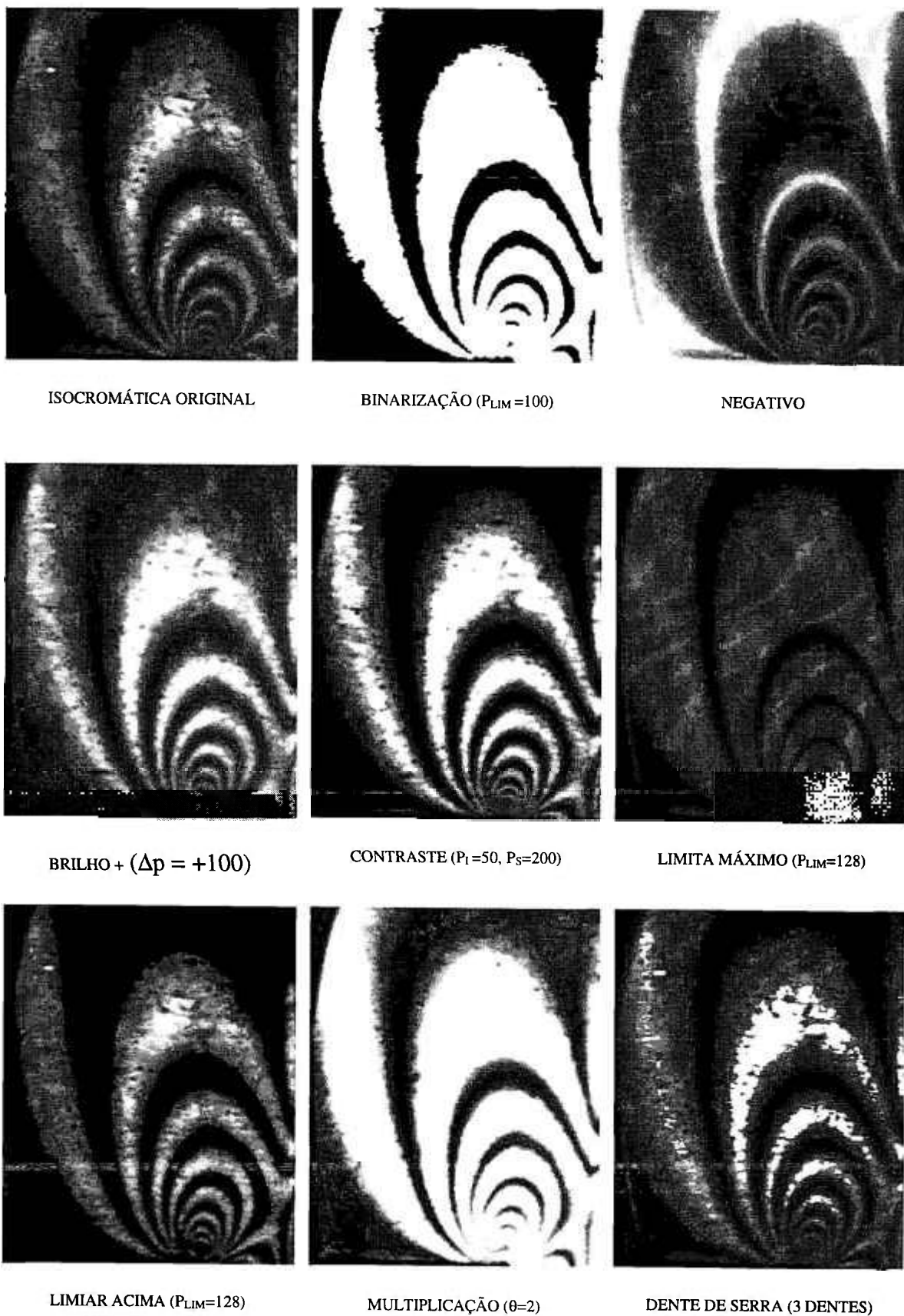


Figura 47 - Visão geral dos resultados de aplicação de filtros pontuais a uma isocromática.



## 5.2.2 Filtros espaciais e exemplos de aplicação

Os filtros espaciais são definidos com base numa máscara (matriz), de dimensões ímpares, a qual é centrada num determinado *pixel* da imagem. Os cálculos são feitos considerando-se os níveis de cinza correspondentes ao *pixel* central e a seus vizinhos contidos dentro da máscara. O valor resultante do cálculo é, então, convertido em um nível de cinza e atribuído ao *pixel* central. Neste tipo de operação, a imagem original não pode ser alterada na medida em que o cálculo é feito, porque cada *pixel* analisado depende do valor do nível de cinza do seu vizinho. Assim, em geral, os valores parciais calculados vão sendo armazenados numa região da memória do computador, ou num arquivo temporário de imagem. Máscaras típicas de 3x3 e 5x5 são ilustradas na Figura 48.

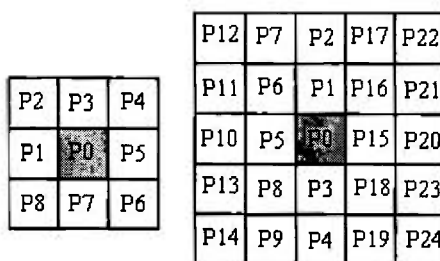


Figura 48 - Máscaras de 3x3 e de 5x5.

### Média 3 x 3

No filtro da média, de 3x3, o nível de cinza do *pixel* central P0 é identificado na paleta de cores através do seguinte índice :

$$P_M = ( P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7 + P_8 ) / 9. \quad (68)$$

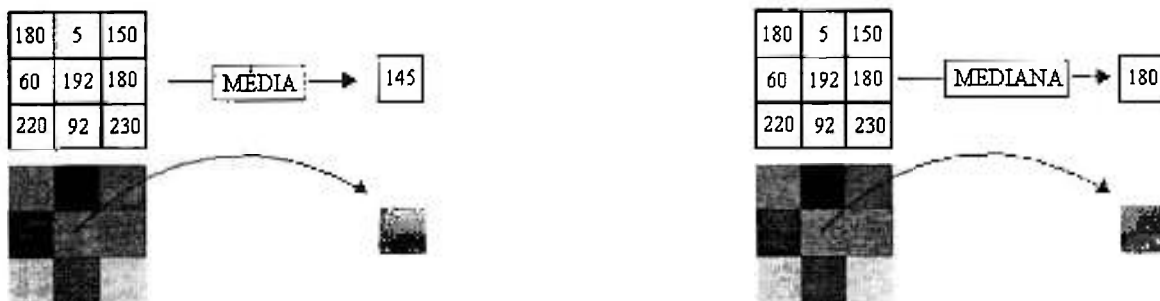


Figura 49 - Ilustração dos filtros de média e de mediana em termos de *pixels*.

### Mediana 3 x 3

No filtro da mediana, os índices de todos os *pixels*, lidos através da máscara, são ordenados em ordem crescente, e selecionado o índice central  $P_{MED}$  nos elementos ordenados. O nível de cinza do nível  $P_0$  é então substituído pelo índice  $P_{MED}$ .

Na Figura 49, são ilustrados os resultados das operações dos filtros da média e da mediana em termos de atuação em termos de *pixels*. O filtro da média tem o efeito de borrar a imagem. Esta propriedade é utilizada para suavizar variações localizadas e bruscas dentro de uma área com níveis de cinza mais uniformes. O filtro da mediana tem o efeito de sumir com ruídos do tipo “sal-pimenta”, enquanto preserva as bordas, como ilustrado na Figura 50. Observa-se que os pequenos pontos no lado esquerdo inferior da imagem original desaparecem após aplicação deste filtro. A média e mediana são os filtros mais utilizados nos trabalhos de processamento de imagens fotoelásticas digitais.

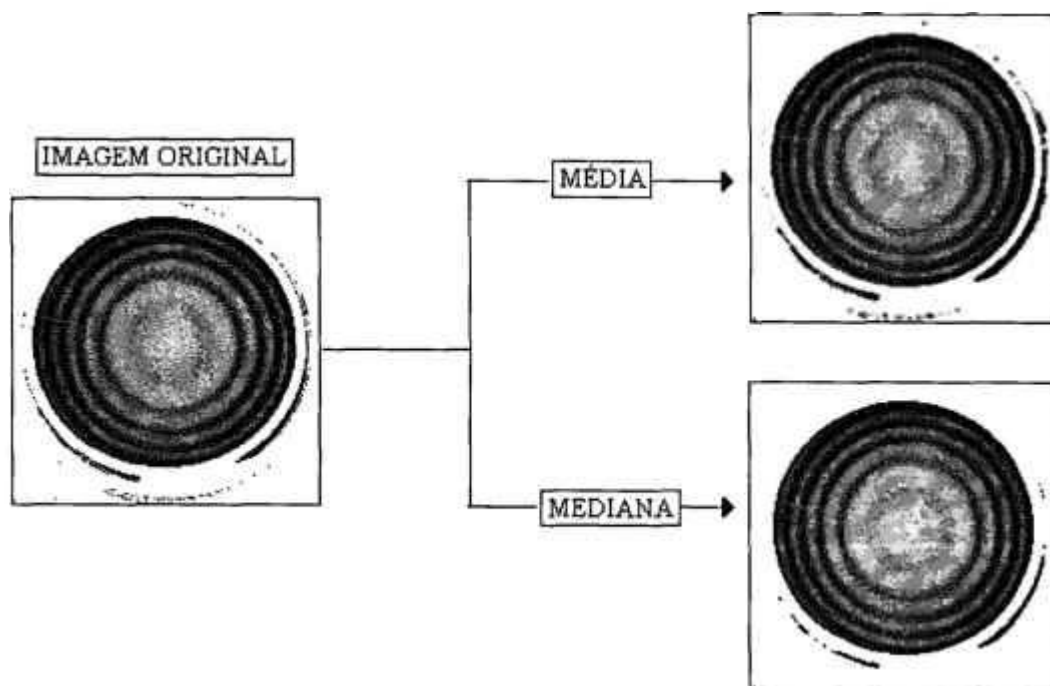


Figura 50 - Aplicação dos filtros de média e mediana sobre uma mesma imagem.

### Equalização histogrâmica

A equalização histogrâmica é feita com base no histograma da imagem. Na Figura 51, ilustra-se o histograma da imagem mostrada no lado esquerdo. Observa-se que, na

imagem analisada, há a predominância de cores mais claras, predominando os níveis na faixa de 200 a 220.

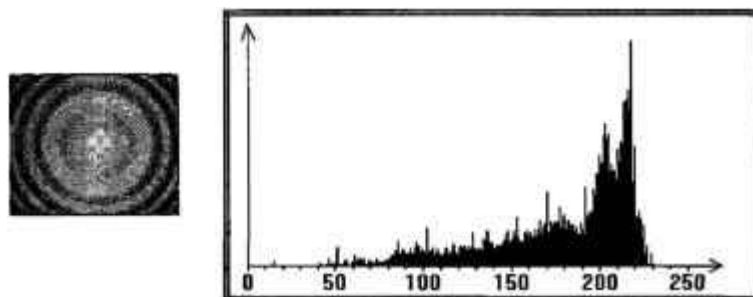


Figura 51 - Exemplo de histograma de uma imagem.

A equalização histográfica é um filtro espacial tendo como base o ajuste do histograma da imagem original a uma forma desejada de histograma, contendo uma distribuição mais ou menos uniforme de todos os níveis de cinza. Na Figura 52, ilustra-se a imagem da Figura 51, após ter sido submetida à equalização histográfica, e o respectivo histograma.

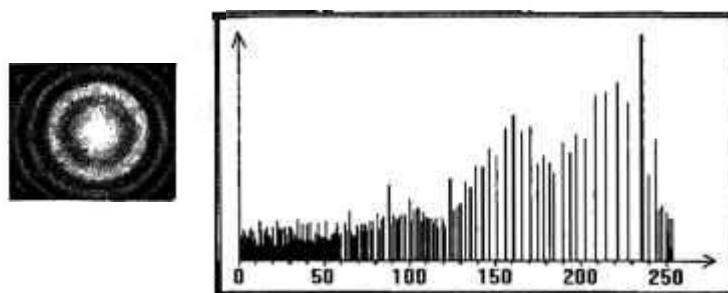


Figura 52 - Imagem submetida à equalização histográfica e respectivo histograma

### Convolução

O filtro de convolução é uma generalização dos filtros espaciais. Uma máscara, de dimensões ímpares, é deslocada ao longo de todos os *pixels* da imagem. Para cada *pixel* onde a máscara é centrada, é realizada uma operação matemática entre os níveis de cinza atribuídos à máscara e os níveis de cinza da imagem na região da máscara. O resultado da operação matemática é atribuído ao *pixel* onde a máscara está centrada. Em geral, a implementação do filtro de convolução é feita de modo que o usuário forneça

individualmente os valores de níveis de cinza de cada posição da máscara. Assim, o filtro da média pode ser feito através da convolução, entrando-se com o valor 1 para cada uma das posições da máscara. Na Figura 53, é ilustrada a operação de convolução de uma imagem com um máscara genérica de (3x3)

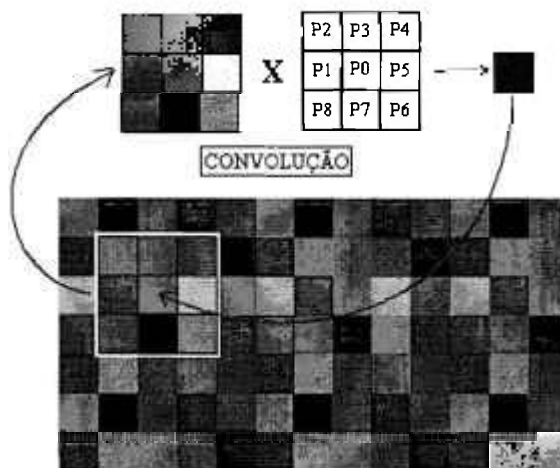


Figura 53 - Convolução da imagem com uma máscara (matriz de 3x3) fornecida.

### 5.2.3 Algoritmos de esqueletonização

Em geral, nas publicações de Processamento de Imagens Digitais, o termo *esqueletonização* é usado como sinônimo de afinamento (*thinning*). Neste trabalho, o termo esqueletonização é empregado para representar as operações de redução de informações da imagem para efeito de aplicação subsequente de algoritmos de *afinamento de imagens binárias* (imagens em preto e branco). Com estes últimos algoritmos, o processamento é feito sobre uma quantidade menor de informações do que se fosse feito sobre a imagem original.

A esqueletonização pode ser feita por meio da simples binarização da imagem com base num nível de cinza selecionado, obtendo-se uma imagem em preto e branco com bordas grossas. Existe um outro algoritmo de esqueletonização, formando um esqueleto mais fino, tendo por base os níveis de cinza presentes na imagem<sup>(62)</sup>. Esta operação é feita com a máscara mostrada na Figura 54, sendo aplicada várias vezes sobre a imagem, numa seqüência da esquerda para a direita e de cima para baixo. O *pixel* P0 é considerado como pertencente ao esqueleto da franja se pelo menos duas das quatro condições (69) a (72)

forem satisfeitas. P0 a P24 são os valores dos *pixels* lidos na imagem , sendo P0 o *pixel* de referência. Em (69) a (72), E representa a operação booleana **AND** e em (73) a (75), **OU** representa a operação booleana **OR**.

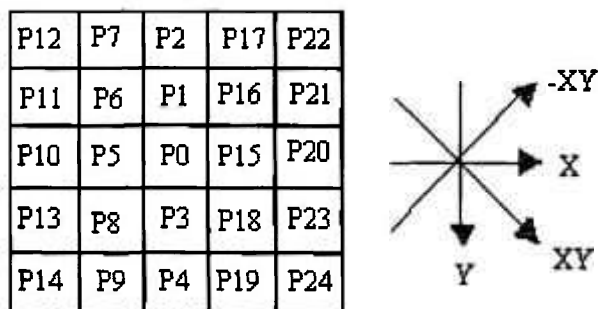


Figura 54 - Máscara para esqueletonização<sup>(22)</sup>.

$$P0 + P3 + P11 > P13 + P10 + P13 \text{ E } P0 + P3 + P1 > P21 + P20 + P23 \text{ (direção X)} \quad (69)$$

$$P0 + P5 + P15 > P9 + P4 + P19 \text{ E } P0 + P5 + P15 > P7 + P2 + P17 \text{ (direção Y)} \quad (70)$$

$$P0 + P8 + P16 > P12 + P11 + P7 \text{ E } P0 + P8 + P16 > P24 + P23 + P19 \text{ (direção XY)} \quad (71)$$

$$P0 + P6 + P18 > P22 + P21 + P17 \text{ E } P0 + P16 + P18 > P14 + P13 + P9 \text{ (dir. -XY)} \quad (72)$$

Ao final deste processamento, pode-se aplicar uma binarização com base em um dos valores de níveis de cinza presentes na imagem e aplicar o algoritmo de afinamento do item 5.2.4.

#### 5.2.4 Algoritmo de afinamento de imagens binárias

A operação de afinamento consiste em se afinar o esqueleto obtido na fase de esqueletonização até reduzi-lo a uma linha com a espessura de um *pixel*. Esta operação é feita com uma máscara de 3x3, ilustrada na Figura 55.

P8	P1	P2
P7	P0	P3
P6	P5	P4

Figura 55 - Máscara para afinamento.

Seja  $NZ(P0)$  o número de vizinhos não nulos de  $P0$ , com base na máscara da Figura 55, ao se ler os valores dos níveis de cinza na imagem. Seja  $Z0(P0)$  o número de transições 0-1 na seqüência ordenada  $P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P1$ . O *pixel*  $P0$  é removido do esqueleto se as condições (73), (74) e (75) forem satisfeitas, sendo as operações repetidas até que não ocorra mais nenhuma mudança na imagem<sup>(71,72)</sup>.

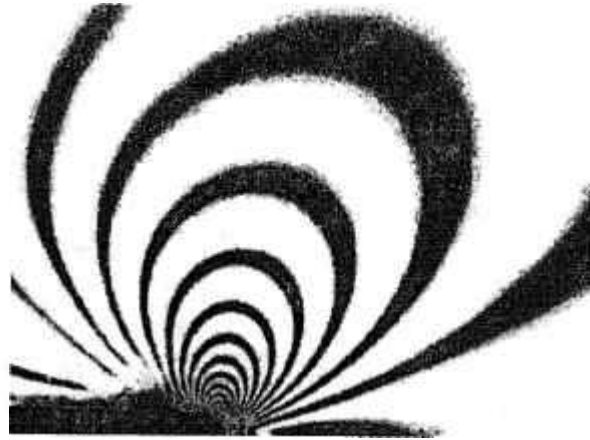
$$2 \leq NZ(P0) \leq 6 \quad \text{E} \quad Z0(P0) = 1 \quad (73)$$

$$P1 \cdot P3 \cdot P7 = 0 \quad \text{OU} \quad Z0(P1) \neq 1 \quad (74)$$

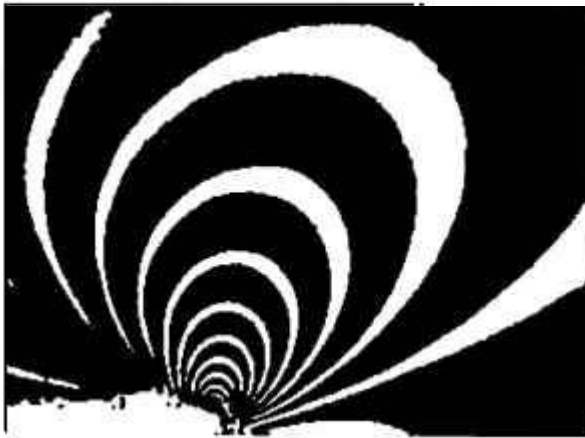
$$P1 \cdot P3 \cdot P5 = 0 \quad \text{OU} \quad Z0(P3) \neq 1 \quad (75)$$

### 5.2.5 Exemplos de aplicação dos algoritmos de PID

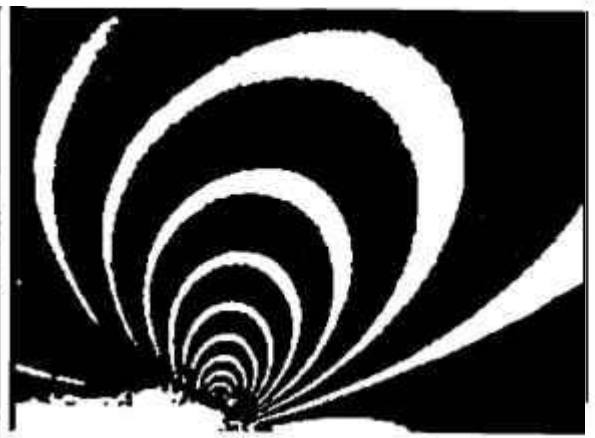
Nas Figuras 56 e 57, são ilustrados exemplos de aplicação de funções de PID sobre um imagem isocromática, onde pode-se comparar os resultados de extração de franjas em função dos tipos de filtros aplicados previamente sobre a imagem original. Na Figura 56, observa-se que as imagens afinadas resultantes são praticamente iguais em relação aos laços das franjas isocromáticas. A importância da utilização conjunta dos filtros de média e mediana está bem nítida no exemplo mostrado na Figura 57. Sem a utilização de tais filtros, a linha média resultante da operação de afinamento fica cheia de ramificações indesejáveis.



(a) original



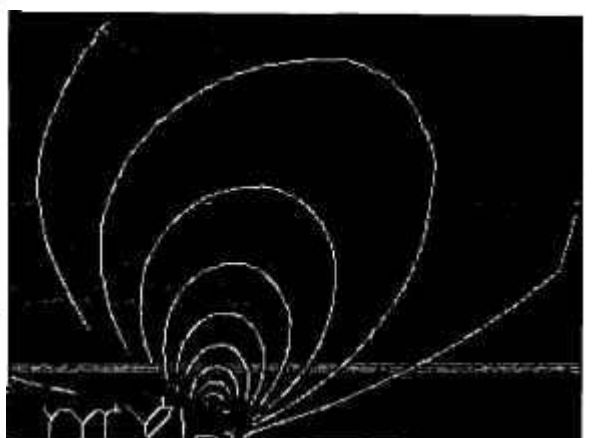
(b) esqueleto após média



(c) esqueleto após mediana

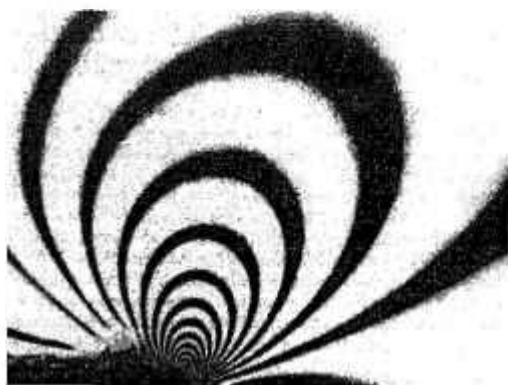


(d) afinamento da imagem em (b)



(e) afinamento da imagem em (c)

Figura 56 - Efeito dos filtros de média e mediana sobre as operações de esqueletonização e de afinamento.



(a) Imagem original

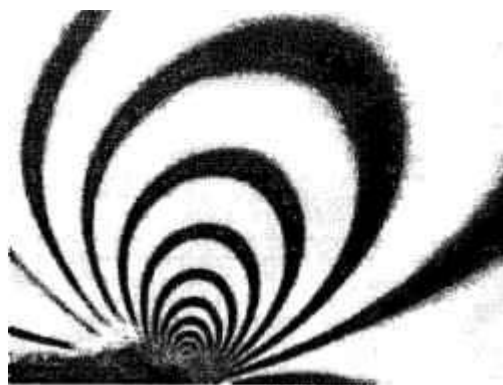
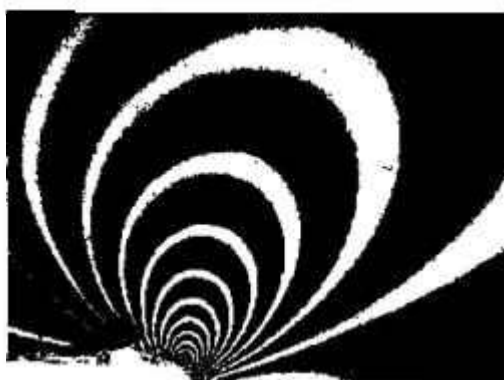


Imagem (a) submetida à média / mediana



Esqueletonização (binarização)

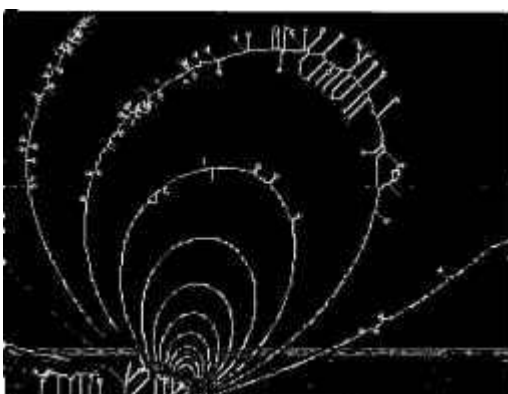


Imagem após afinamento



Esqueletonização (binarização)

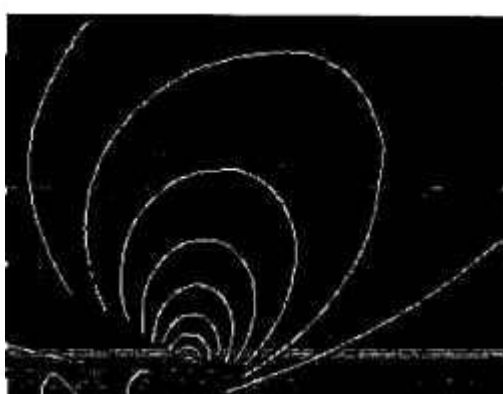


Imagem após afinamento

Figura 57 - Exemplo de aplicação do algoritmo de afinamento, mostrando a importância do pré-processamento.



## 6 IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA FOTOEL

### 6.1 Introdução

FOTOEL é um sistema de processamento de imagens fotoelásticas digitais, em níveis de cinza, cujo objetivo final é a determinação do fator de intensidade de tensões  $K_I$  da Mecânica Elástica Linear de Fratura. Este sistema tem por base dois *softwares* desenvolvidos pelo autor, FOTOFRAN e FOTOVER, cuja idéia global é dada na Figura 58.

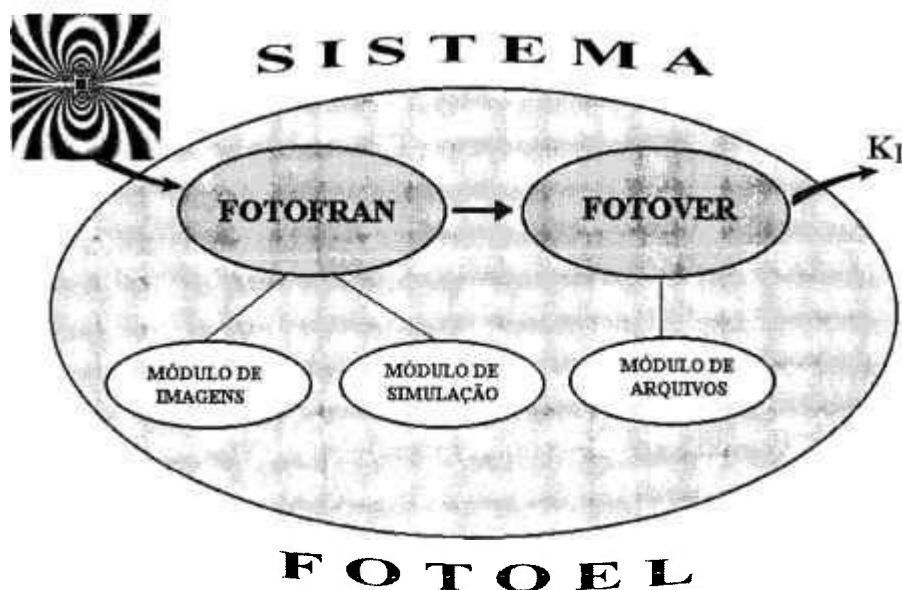


Figura 58 - Ilustração dos *softwares* que compõem o sistema FOTOEL.

O *software* FOTOFRAN é composto basicamente de dois módulos. Um deles executa o processamento das franjas isocromáticas na região da ponta de uma trinca, visando a obtenção de dados geométricos das franjas para cálculo de  $K_I$  (*Módulo de Imagens*). O outro permite simular isocromáticas para um disco de material birrefringente submetido a cargas de compressão (*Módulo de Simulação*). Como saída do *Módulo de Imagens*, têm-se

os valores de  $K_I$  com base nos métodos de dois parâmetros e ainda arquivos-textos com dados das franjas processadas e que permitem que o *software* FOTOVER calcule o valor de  $K_I$  com base no método superdeterminístico. A idéia básica do sistema FOTOEL, para a obtenção de parâmetros da Mecânica de Fratura, é esquematizada na Figura 59.



Figura 59 - Esquema global das etapas relacionadas com a utilização do sistema FOTOEL.

Como ilustrado na Figura 58, o dado de entrada do sistema FOTOEL é a isocromática na ponta da trinca. Para obtenção deste dado, é necessário, portanto, que seja realizado um experimento fotoelástico para obtenção de isocromáticas. A isocromática a ser usada como dado de entrada para processamento pelo sistema FOTOEL, com o objetivo de se obter o fator de intensidade de tensões  $K_I$ , tem de ser em níveis de cinza. Tais imagens podem ser geradas com um modelo plano de material birrefringente, submetido a experimento fotoelástico, com o uso de um polariscópio de transmissão alimentado com luz monocromática. Caso o experimento seja feito com luz branca, é necessário utilizar-se um filtro monocromático. Os assuntos abordados neste parágrafo dizem respeito à etapa de *Geração da Imagem Fotoelástica* mostrada na Figura 59.

A imagem isocromática vista no analisador do polariscópio tem de ser então registrada num meio permanente, que pode ser feito por meio de câmaras fotográficas ou de câmara de vídeo. Esta seria a etapa de *Registro da Imagem*, indicada na Figura 59.

No item 6.2, são abordadas as etapas inseridas no módulo de Imagem. Como o Módulo de Simulação não é fundamental, dentro do objetivo deste trabalho, ele é apresentado, em separado, no Apêndice I.

## **6.2 Descrição dos módulos que compõem o sistema FOTOEL**

### **6.2.1 Descrição do Módulo de Imagens**

#### **6.2.1.1 Digitalização da imagem**

Os resultados da etapa de *Registro da Imagem*, obtidos na forma analógica, não podem ser usados diretamente pelo sistema. Há necessidade, então, da etapa de *Digitalização da Imagem*, que consiste em se transformar a imagem num arranjo matricial adequado ao processamento por meio de computador.

Na Figura 60, são ilustradas algumas das formas em que a imagem isocromática poderia chegar ao sistema FOTOEL. A imagem já poderia estar na forma de um arquivo de imagem, sendo, na Figura mencionada, representada pelo disquete. Uma isocromática,

disponível na forma de fotografia, poderia ser digitalizada por meio de um *scanner*, gerando também um arquivo de imagem. Uma câmara de vídeo, acoplada ao computador através de uma placa digitalizadora, é também uma das maneiras de se conseguir transformar a isocromática, vista num experimento fotoelástico, em um arquivo de imagem.

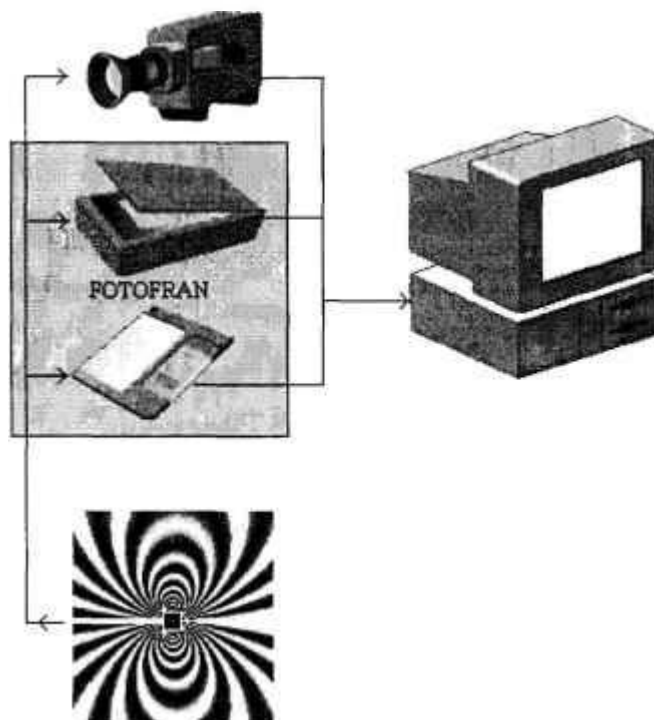


Figura 60 - Digitalização de franjas isocromáticas.

A idéia inicial era dotar-se o sistema FOTOEL de um sistema próprio de gerenciamento de câmara de vídeo. Em virtude das facilidades apresentadas pelas câmaras de vídeo, com relação a esta tarefa, optou-se por usar tais recursos disponíveis. Para digitalização de fotografias de isocromáticas, o sistema FOTOEL conta com recursos para geração de arquivos de imagens através dos *scanners* de mesa, da *Hewlett Packard*, modelos *Scanjet IIc*, *IIIc* e *4c*.

#### 6.2.1.2 Pré-processamento digital

Nem sempre a imagem digitalizada está pronta para ser processada do ponto de vista de extração das franjas. Algumas vezes, é necessária a utilização de algumas operações preliminares de modo a se adequar a posição da imagem em termos de obtenção de propriedades geométricas. Outras vezes, é necessária a aplicação de filtros de modo a retirar

informações indesejáveis ou realçar informações com pouca nitidez. Estas operações são denominadas, neste trabalho, de operações de pré-processamento digital.

A seguir, são dados detalhes sobre cada uma das operações relativas a pré-processamento digital, disponíveis em FOTOEL.

**Operações geométricas** - Para obtenção de dimensões de interesse na imagem, tais como raio máximo da franja, tamanhos de trincas e dimensões de entalhes, dispõe-se, no *software* FOTOFRAN, do recurso de régua eletrônica. A função *zoom* pode ser usada para ampliar pequenos detalhes da imagem, especialmente em regiões próximas da ponta de trincas ou em entalhes de corpos de prova. A opção de rotação de 90 graus permite o posicionamento da imagem isocromática em forma apropriada para extração de parâmetros geométricos das franjas.

**Edição de imagem** - Para edição de imagens, estão implementadas as funções *Lápis-borracha* e *Linha reta*. Dispõe-se, também, da opção de gravar determinada área da imagem.

**Filtros pontuais** - Estão implementados funções de PID relativas a contraste, brilho e outras operações do mesmo gênero.

**Filtros espaciais** - Estão implementados os filtros de média (3x3), mediana (3x3), equalização histogrâmica e convolução de (3x3), onde o usuário pode entrar com a máscara desejada.

**Histogramas parciais ou totais** - Com base numa área da imagem, selecionada com o *mouse* pelo usuário, é mostrado o correspondente histograma, a partir da opção *Histograma / Imagem* numa janela flutuante. Esta função é usada para quantificar os níveis de cinza presentes na imagem. É uma ferramenta auxiliar na definição de limiar de nível de cinza a ser usado no processamento de imagens.

### 6.2.1.3 Processamento digital

As operações de esqueletonização e de afinamento foram implementadas pelo autor, com base nas informações teóricas apresentadas no Capítulo 5.

### 6.2.1.4 Rotulação de franjas

O cálculo de  $K_I$  é feito com base em parâmetros geométricos extraídos da imagem isocromática e ainda no número “N” correspondente à franja que estiver sendo utilizada. Após a obtenção das franjas afinadas, dispõe-se de recursos para anotar com o *mouse*, as coordenadas da ponta da trinca. Ao se fazer isto, os valores de x e y referentes a ponta da trinca são armazenados num arquivo de dados. A partir desta etapa, começa uma fase em que o usuário tem que informar ao programa a ordem de cada franja (0, 1, 2, ... N). Esta fase é chamada de rotulação das franjas. Com base numa tabela de cores na tela do monitor, seleciona-se o número da franja que se deseja rotular. Ao se *cliquear* com o *mouse* sobre a franja escolhida, a mesma é pintada com uma cor correspondente ao número escolhido e então armazenadas as coordenadas x e y de todos os pontos da franja.

### 6.2.1.5 Operações da Mecânica de Fratura

Uma vez obtido o arquivo de dados das franjas rotuladas, pode-se, então, selecionar o método de cálculo desejado (Irwin, Smith & Schroedl, Dally). Com base na resolução espacial da imagem, no fator de ampliação usado e na constante fotoelástica do material birrefringente, obtém-se o fator  $K_I$ . Para os dois primeiros métodos citados, o valor de  $K_I$ , é obtido diretamente no *software* FOTOFAN. Já o valor de  $K_I$ , com base no método superdeterminístico de Dally, é obtido com o *software* FOTOVER, com base num arquivo de dados de franjas rotuladas.

### 6.2.1.6 Emissão de resultados

As imagens de interesse poderão ser armazenadas, nos formatos PCX ou BMP. As imagens originais e as processadas poderão ser reproduzidas em impressora jato de tinta ou

*laser* a partir do *software* FOTOFRAN. O *software* FOTOVER, além da função descrita no parágrafo anterior, é uma ferramenta de gerenciamento de arquivos-textos, tanto os de entrada de dados como os de resultados, permitindo a emissão de relatório de resultados.

### 6.2.2 Descrição do Módulo de Arquivos

Todos os resultados numéricos do processamento das franjas isocromáticas, bem como os dados utilizados no *software* FOTOFRAN, ficam disponíveis na forma de arquivos-textos. Estes arquivos podem ser manipulados por meio de FOTOVER, inclusive com alteração de dados tais como mudança de posição da ponta da trinca, de modo a estudar-se a influência de erros advindos dessas alterações. O método superdeterminístico de Dally é feito com base num determinado número de pontos selecionados sobre as franjas rotuladas. FOTOVER permite que se altere o número desses pontos.

### 6.3 Descrição detalhada das interfaces gráficas

O sistema FOTOEL é um aplicativo em ambiente *Windows* tendo sido desenvolvido com base no compilador *Visual C* da *Microsoft*<sup>(81)</sup>. Algumas das funções de processamento de imagens foram implementadas a partir da versão 1.2 da biblioteca de funções de *PID Victor*<sup>(82)</sup>, da *Catenary System*. Relativamente a esta biblioteca, foram adquiridos também os programas-fontes em linguagem *C*. O *leiaute* da tela foi projetado para operar satisfatoriamente a partir do modo de 800x600x256 cores. Resoluções maiores, em termos de números de *pixels*, podem ser usadas. O sistema permite o carregamento de arquivos de imagens de 24 bits. Entretanto, para efeito de processamento com vista a extração de parâmetros da Mecânica de Fratura, elas tem que ser transformadas em imagens de 8 bits (imagens em níveis de cinza). O sistema foi desenvolvido com o *Windows* 3.11<sup>(83)</sup>, rodando sob o *MS-DOS* 6.22<sup>(84)</sup>. Entretanto, ele roda também sob o *Windows* 95.

Conforme mostrado na Figura 58, o sistema FOTOEL tem por base dois *softwares*: FOTOFRAN e FOTOVER. Neste item, é feita uma descrição detalhada das interfaces gráficas relativas a estes *softwares*.

### 6.3.1 Descrição da interface de FOTOFRAN

Na Figura 61, mostra-se a tela inicial de apresentação de FOTOFRAN. Nas Figuras 62 e 63, são ilustradas as várias opções relativas aos itens de menus desta interface.

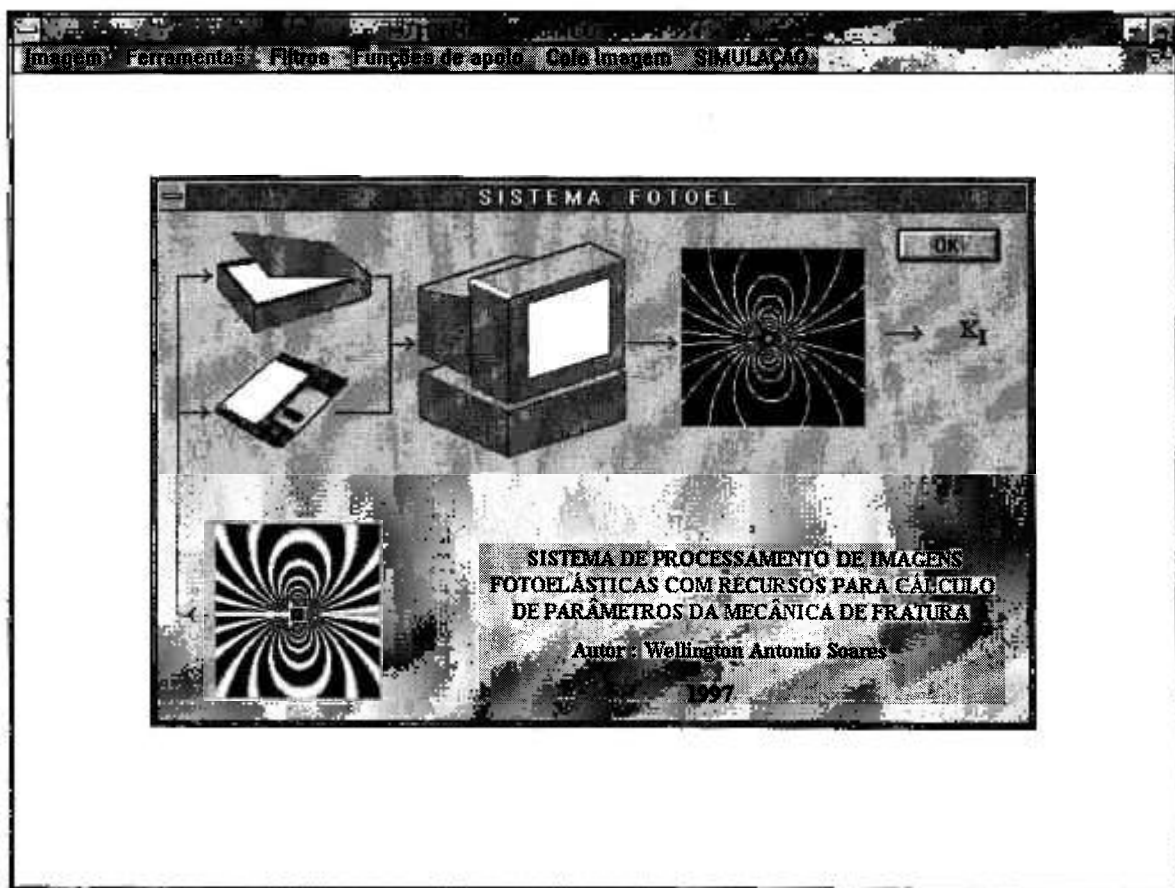


Figura 61 - Tela de apresentação do *software* FOTOFRAN.

No menu horizontal de FOTOFRAN, estão disponíveis as seguintes funções : **Imagem, Ferramentas, Filtros, Funções de apoio, Cola Imagem e SIMULAÇÃO**. No lado direito da Figura 63, mostra-se, na posição vertical, um menu com funções, numa ordem seqüencial, a ser seguida, quando se deseja obter o fator  $K_I$  com base em isocromáticas na ponta de uma trinca. O menu vertical traz os requisitos mínimos a serem seguidos na obtenção do parâmetro  $K_I$ . Assim, em alguns casos, pode ser necessária a utilização de outras funções do menu horizontal.



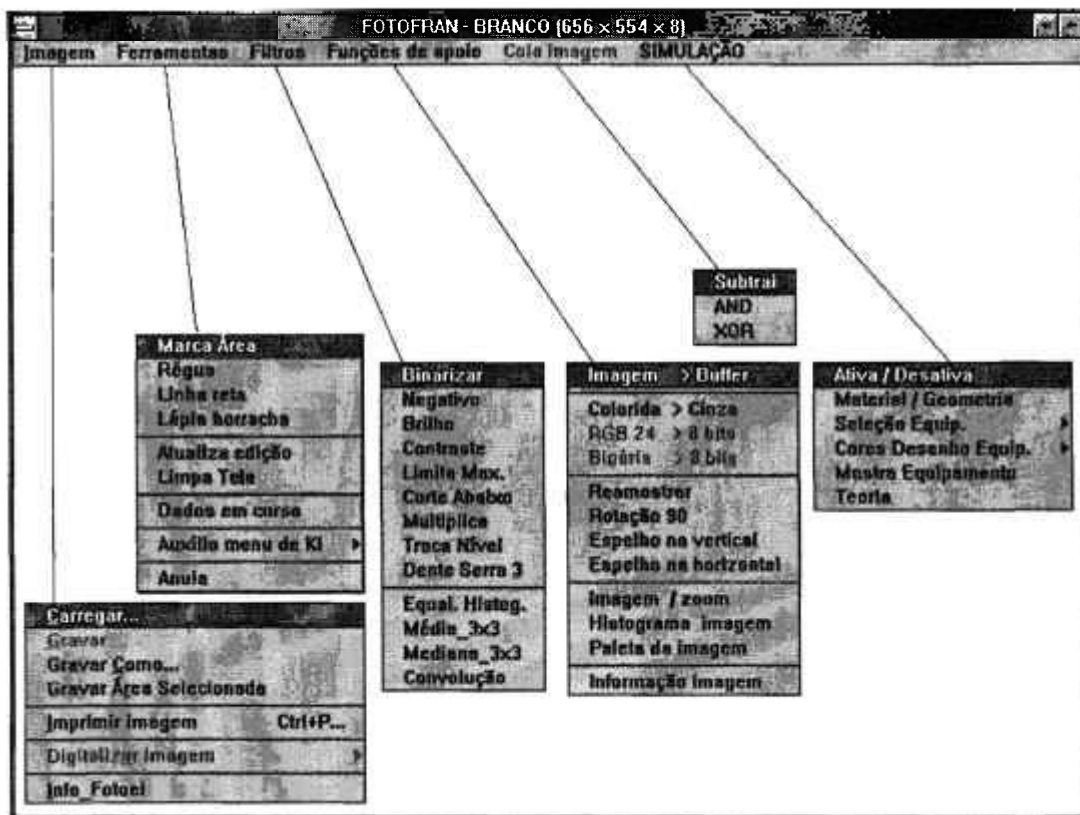


Figura 62 - Visão geral dos itens contidos no menu horizontal de FOTOFNAN.

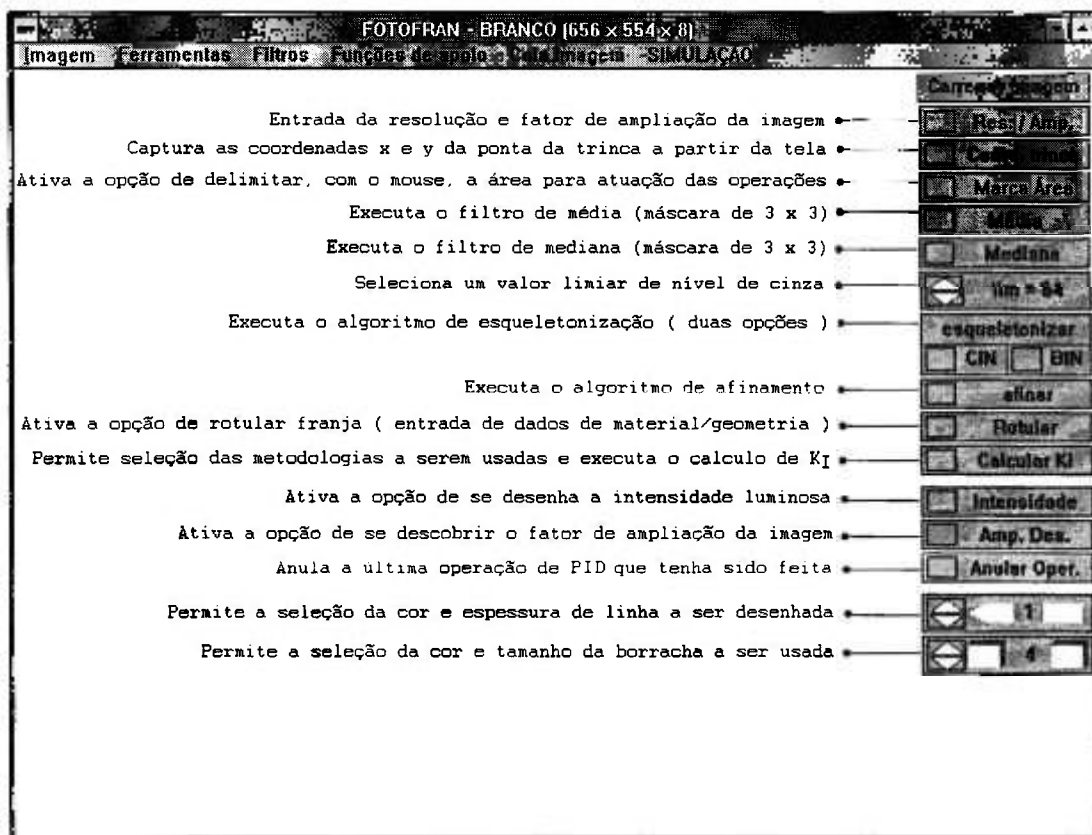


Figura 63 - Visão geral dos itens contidos no menu vertical de FOTOFNAN.

### 6.3.1.1 Descrição das funções do menu horizontal

No Quadro 1, são descritos todos os subitens de cada um dos itens contidos no menu horizontal, bem como a função de cada subitem.

Quadro 1 - Itens contidos no menu horizontal de FOTOFRAN.

<b>Imagem</b>	
<b>Carregar</b>	carrega imagem nos formatos PCX e BMP ( 8 bits e 24 bits )
<b>Gravar</b>	grava a imagem com o nome e formato em curso
<b>Gravar Como</b>	grava imagem com nome e formato fornecidos pelo usuário
<b>Gravar Área Seleccionada</b>	grava área seleccionada com a opção <b>Marca Área</b>
<b>Imprimir imagem</b>	imprime imagem em impressora
<b>Digitalizar imagem</b>	digitaliza imagem a partir de <i>scanner ScanJet</i> da HP
<b>Info Fotoel</b>	fornece informações sobre o sistema FOTOEL
<b>Ferramentas</b>	
<b>Marca Área</b>	delimita a área em que a operação de PID será executada
<b>Régua</b>	fornece o valor da distância real medida, tendo por base a resolução e fatores de ampliação fornecidos
<b>Linha reta</b>	permite o desenho de linhas retas com espessura e cor (preto ou branco) seleccionados a partir do menu vertical
<b>Lápis borracha</b>	permite o retoque de partes indesejáveis da imagem ( dimensão e cor preta ou branca seleccionados a partir do menu vertical )
<b>Atualiza edição</b>	atualiza, no <i>buffer</i> de imagem, alterações feitas na área seleccionada na tela (uso de Linha reta e Lápis borracha)
<b>Limpa Tela</b>	limpa a área gráfica
<b>Dados em curso</b>	fornece os dados <i>default</i> relativos a imagem carregada, propriedades de material fotoelástico e memória disponível.
<b>Auxílio menu de KI</b>	permite a seleção da opção de se fornecer ou não orientações nas etapas de obtenção de $K_1$
<b>Anula</b>	anula a operação imediatamente anterior ( <i>Undo</i> );
<b>Filtros</b>	
<b>Binarizar</b>	transforma imagem em níveis de cinza em imagem em preto e branco com base num limiar fornecido
<b>Negativo</b>	executa o negativo da imagem
<b>Brilho</b>	altera o brilho da imagem
<b>Contraste</b>	altera contraste da imagem
<b>Limiar Max.</b>	abaixo de um valor fornecido, os níveis de cinza permanecem os mesmos; os acima são colocados no nível fornecido.
<b>Limiar Acima</b>	acima de um valor fornecido, os níveis de cinza permanecem os mesmo; os valores abaixo deste valor são colocados na cor preta (nível 0).



Quadro 1 - Itens contidos no menu horizontal de FOTOFran (Continuação).

	<b>Filtros ( Continuação)</b>
<b>Multiplica</b>	multiplica cada valor do píxel da imagem por um valor fornecido
<b>Troca Nível</b>	substitui, numa faixa fornecida, todos os níveis de cinza por um nível de cinza fornecido
<b>Dente Serra 3</b>	executa operação dente de serra (3 dentes)
<b>Equal. Histog.</b>	executa equalização histográfica
<b>Média 3x3</b>	média com base numa máscara de 3 x 3
<b>Mediana 3x3</b>	mediana com base numa máscara de 3 x 3
<b>Convolução</b>	convolução com base numa máscara de 3x3
<b>Funções de apoio</b>	
<b>Tela &gt; Buffer</b>	armazena, no <i>buffer</i> , a imagem selecionada com a opção <b>Marca Área</b>
<b>Colorida &gt; Cinza</b>	transforma imagem colorida em imagem em níveis de cinza
<b>RGB 24 &gt; 8 bits</b>	transforma imagem de 24 bits em imagem de 8 bits
<b>Binária &gt; 8 bits</b>	transforma imagem binária em imagem de 8 bits
<b>Reamostrar</b>	reamostra imagem com base em percentual fornecido
<b>Rotação 90</b>	gira a imagem nas direções horária e anti-horária, em torno de um eixo perpendicular ao plano da imagem
<b>Espelho na vertical</b>	gira a imagem em torno de um eixo vertical
<b>Espelho na horizontal</b>	gira a imagem em torno de um eixo horizontal
<b>Imagem / zoom</b>	executa <i>zoom</i> em área selecionada na imagem e mostra resultado em janela separada
<b>Histograma imagem</b>	mostra histograma de área selecionada na imagem
<b>Paleta da imagem</b>	mostra, na tela, as cores presentes na paleta da imagem
<b>Informação imagem</b>	fornece dimensões, resolução e cores da imagem
<b>Cola imagem</b>	
<b>Subtrai</b>	subtrai a imagem da tela da imagem no <i>buffer</i> de imagem
<b>AND</b>	operação AND entre imagem da tela e imagem do <i>buffer</i>
<b>XOR</b>	operação XOR entre imagem da tela e imagem do <i>buffer</i>

### 6.3.1.2 Descrição das funções do menu vertical

No Quadro 2, são descritos todos os subitens de cada um dos itens contidos no menu vertical, bem como a função de cada subitem. Os itens listados no Quadro 2, estão na seqüência que deve ser seguida para obtenção de  $K_1$  com base num imagem isocromática anteriormente carregada. Para os cálculos de  $K_1$ , é fundamental que sejam fornecidos a resolução espacial e o fator de ampliação da imagem.

Quadro 2 - Itens contidos no menu vertical de FOTOFRRAN.

<b>Res. /Amp.</b>	permite a entrada da resolução e do fator de ampliação da imagem
<b>Coord. trinca</b>	permite que, com o <i>mouse</i> , sejam selecionadas as coordenadas x e y da ponta da trinca, as quais são gravadas em arquivo-texto
<b>Marca Área</b>	permite que, com o <i>mouse</i> , seja selecionada uma área em que as operações de PID serão executadas
<b>Média</b>	executa o filtro de média na área selecionada
<b>Mediana</b>	executa o filtro da mediana na área selecionada
<b>lim</b>	seleciona valor de limiar (valor de nível de cinza)
<b>esqueletonizar</b>	executa a esqueletonização (CIN - considera níveis de cinza; BIN - binariza a imagem com base no limiar em curso)
<b>afinar</b>	executa algoritmos de afinamento das linhas mais espessas obtidas a partir da fase de esqueletonização
<b>Rotular</b>	permite entrada de dados do material fotoelástico e dimensões da trinca. Desenha, a seguir, uma escala de cores e números de ordem de franjas na tela. Com o <i>mouse</i> , atribui-se, à franja, o número selecionado na escala citada. As coordenadas x e y de todos os pontos da franja marcada são gravadas em um arquivo-texto.
<b>Calcular KI</b>	permite a seleção da metodologia de cálculo de $K_I$ . Executa o cálculo de $K_I$ para o métodos de dois parâmetros. Nesta opção é gerado também o arquivo de dados para o método superdeterminístico realizado com o apoio de FOTOVER
<b>Intensidade</b>	desenha a intensidade luminosa da imagem ao longo de uma linha horizontal que passa por um ponto selecionado com o <i>mouse</i>
<b>Amp. Des.</b>	ativa a opção de descobrir o fator de ampliação com base numa dimensão real da imagem que seja conhecida
<b>Anular Oper.</b>	anula a última operação executada
	uma vez ativada a opção Linha reta, permite o controle da espessura da linha e a cor da mesma (branca ou preta)
	uma vez ativada a opção Lápis borracha em Ferramentas, permite o controle do tamanho da borracha e a cor da mesma (preta ou branca)

### 6.3.1.3 Ilustração de algumas funções realizadas com a interface FOTOFRRAN

Neste item, são mostrados quadros de diálogos e imagens resultantes de algumas operações importantes, realizadas com FOTOFRRAN. Nas Figuras 64 e 65 são ilustradas, respectivamente, uma janela de diálogo para controle de *scanner* e uma imagem sendo digitalizada por FOTOFRRAN, a partir do *scanner ScanJet Ilc* da HP. Na Figura 65, a imagem mostrada é trecho de um artigo de BARKER et al.<sup>(38)</sup>, sendo o retângulo mostrado, selecionado com a opção **Marca Área**, a área a ser gravada como um arquivo de imagem. Na Figura 66, mostra-se uma imagem sendo preparada para ser reproduzida numa

impressora. Na Figura 67, ilustra-se a utilização da função *zoom* disponível em FOTOFRAN.

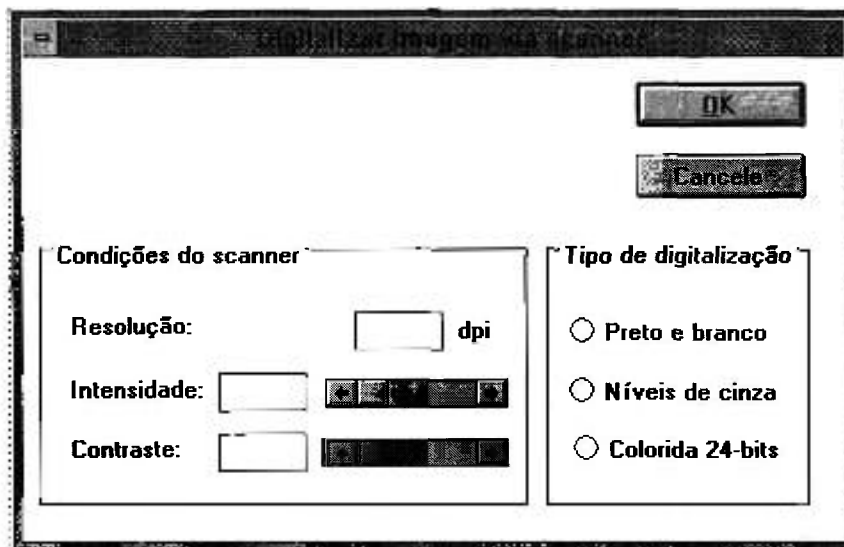


Figura 64 - Janela de diálogo para controle de *scanner*.

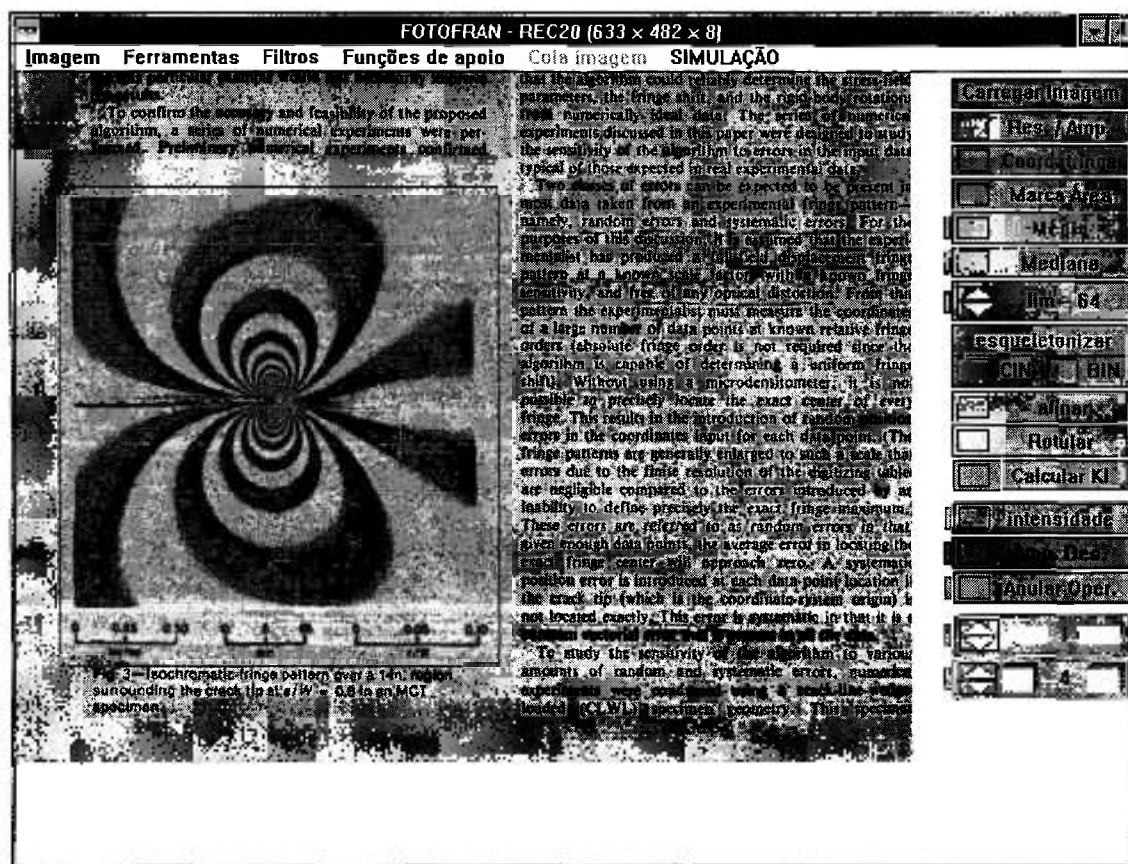


Figura 65 - Digitalização de isocromática com *scanner*, controlado por FOTOFRAN.

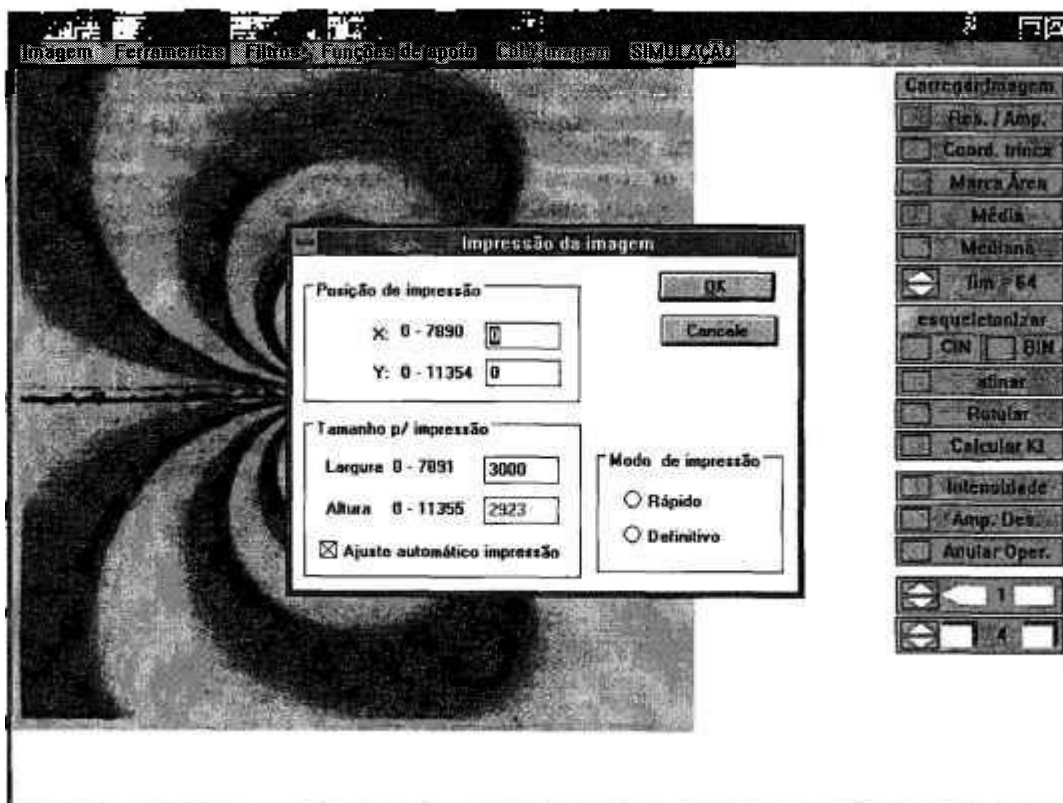


Figura 66 - Janela de diálogo para impressão de imagem.

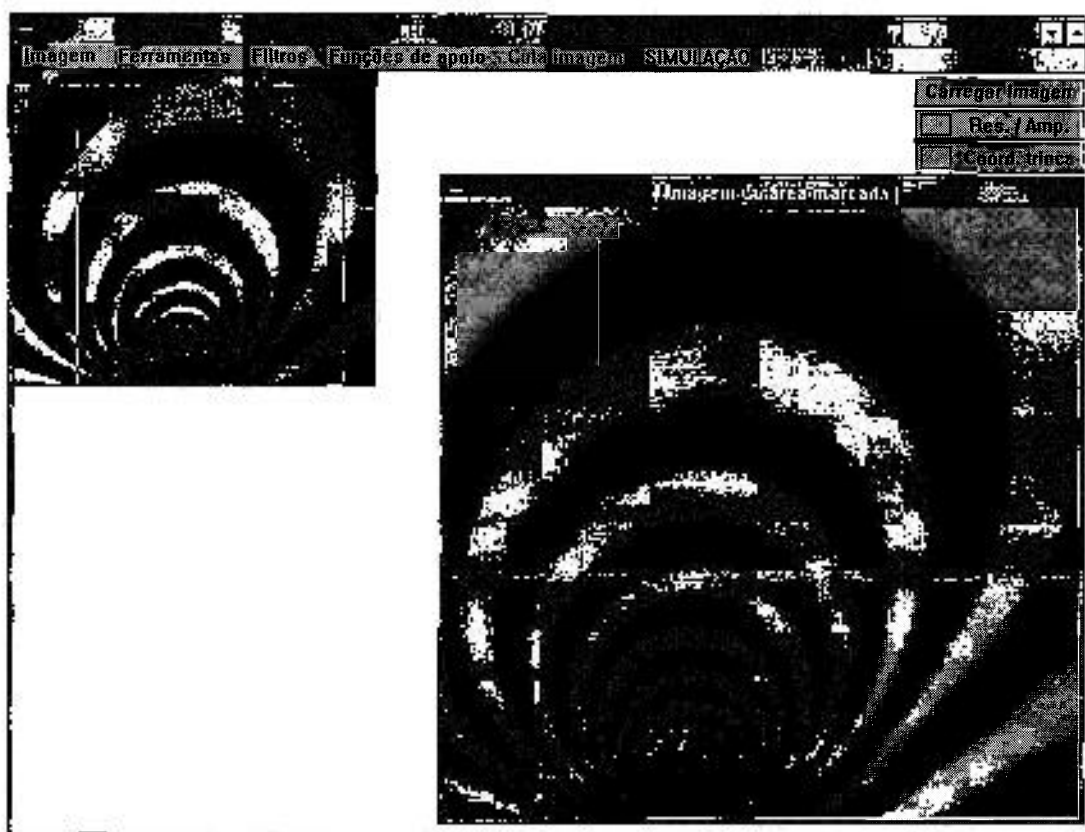


Figura 67 - Ilustração do uso da função *zoom* em FOTOFRAN.

### 6.3.2 Descrição da interface de FOTOVER

O cálculo de  $K_I$ , com base no método superdeterminístico, foi implementado, separadamente, no *software* FOTOVER de modo a evitar problemas de alocação de memória com a utilização linguagem C. A implementação deste método requer a alocação de memória para matrizes de grandes dimensões. O cálculo de  $K_I$  é feito com base em arquivos-textos gerados por FOTOFRAN, em decorrência do processamento de uma imagem isocromática de entrada, como ilustrado na Figura 68.

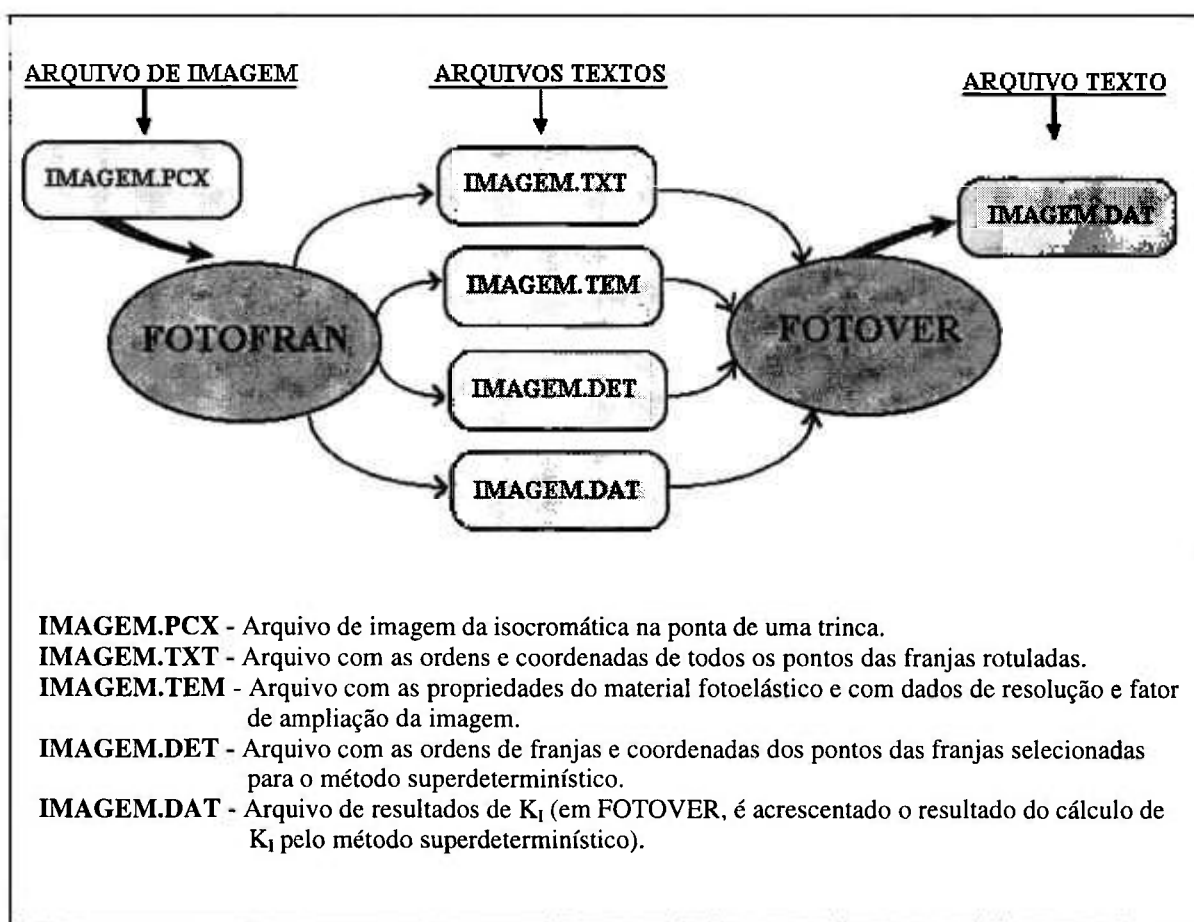


Figura 68 - Ilustração do fluxo de arquivos entre os *softwares* FOTOFRAN e FOTOVER.

No Quadro 3, são indicados, respectivamente, os conteúdos dos arquivos com terminações TXT, TEM, DET, EST e DAT. O arquivo com terminação EST é temporário e é usado para armazenamento de resultados com vista ao cálculo de valores médios e desvios padrões de  $K_I$  e  $\sigma_{0x}$ . No Quadro 4, são explicados alguns itens do menu horizontal de FOTOVER.

Quadro 3 - Conteúdos dos arquivos-textos utilizados em FOTOVER

Arquivo	Conteúdo	Observações
*.TXT	<b>N x y x_ptrin y_ptrin r <math>\theta</math></b>	<b>N</b> - ordem da franja <b>x</b> - abcissa de um ponto da franja <b>y</b> - ordenada de um ponto da franja <b>x_ptrin</b> - abcissa da ponta da trinca <b>y_ptrin</b> - ordenada da ponta da trinca <b>r</b> - raio de um ponto da franja (mm) <b><math>\theta</math></b> - ângulo que localiza o raio “r” (graus)
*.TEM	<b>f<math>\sigma</math> h</b> <b>res amplia tip_amos</b> <b>a tipos_fran</b> <b>x_ptrin, y_ptrin</b> <b>pt_0 pt_1 pt_2 pt_3 pt_4</b> <b>pt_5 pt_6 pt_7 pt_8 pt_9</b> <b>nta0 nta1 nta2 nta3 nta4</b> <b>nta5 nta6 nta7 nta8 nta9</b> <b>nft0 nft1 nft2 nft3 nft4</b> <b>nft5 nft6 nft7 nft8 nft9</b>	<b>f<math>\sigma</math></b> - constante fotoelástica (N/mm/franja) <b>h</b> - espessura do material fotoelástico (mm) <b>res</b> - resolução da imagem (ppp /dpi) <b>amplia</b> - fator de ampliação <b>tip_amos</b> - tipo de amostragem (por faixa angular ou por pontos) <b>a</b> - dimensão da trinca (mm) <b>tipos_fran</b> - tipo de franja (inteira ou fracionária) <b>pt_i</b> - número de pontos ou de setores para amostragem da franja “i” <b>ntai</b> - número total de pontos amostrados na franja “i” <b>nfti</b> - número total de pontos rotulados na franja “i”
*.DET	<b>N r <math>\theta</math></b>	
*.EST	<b>N<sub>A</sub> K<sub>I</sub> <math>\sigma_{0x}</math> A0 A1 A2 B0 B1 B2</b>	<b>N<sub>A</sub></b> - número total de pontos amostrados <b>K<sub>I</sub></b> - fator de intensidade de tensões no modo de abertura (MPa.m <sup>1/2</sup> ) <b><math>\sigma_{0x}</math></b> - Tensão remota (MPa) <b>A0</b> - coeficiente (MPa.m <sup>1/2</sup> ) <b>A1</b> - coeficiente (MPa.m <sup>-1/2</sup> ) <b>A2</b> - coeficiente (MPa.m <sup>-3/2</sup> ) <b>B0</b> - coeficiente (MPa) <b>B1</b> - coeficiente (MPa.m <sup>-1</sup> ) <b>B2</b> - coeficiente (MPa.m <sup>-2</sup> )
*.DAT	Vários dados de entrada e resultados	Exemplos de conteúdo deste arquivo podem ser consultados no Apêndice II



Quadro 4 - Descrição de alguns itens contidos no menu horizontal de FOTOVER

<b>Opção de gravar franjas amostradas</b>	permite que se grave ou não, no arquivo com terminação DAT, as franjas amostradas
<b>Limite inf. amostragem - fração de h</b>	permite a seleção de um raio mínimo de amostragem, dado em função de uma fração da espessura do material fotoelástico
<b>Montagem final tabela em *.DAT</b>	com base num arquivo temporário com terminação EST, é montado, no arquivo com terminação DAT, uma tabela de resultados do processamento em função do número de pontos amostrados

Na Figura 69, é mostrada a tela de apresentação do *software* FOTOVER. Nas Figuras 70 a 73, são ilustradas as funções relativas a opções de menu disponíveis para o gerenciamento de arquivos-textos e cálculo de  $K_I$  com base no método superdeterminístico.

Na Figura 70, são ilustradas as opções do menu horizontal. Em *Editar Arquivos*, estão algumas opções típicas básicas de um editor de textos. Em *Método Superdeterminístico*, estão as funções básicas utilizadas no cálculo de  $K_I$ . Como o cálculo de  $K_I$  é iterativo, dispõe-se de opções para controle dos resultados pela prescrição de um número máximo desejado de iterações ou por um valor de resolução assumido para os coeficientes. O *software* está instruído para gravar, em um arquivo de resultados, todos os dados das franjas usadas no método superdeterminístico. Entretanto, caso o usuário deseje, esta opção pode ser alterada.

Nas Figuras 71 a 73, são ilustradas as janelas de diálogo para entrada de dados em função da opção de menu que tenha sido ativada.

O *software* FOTOVER tem bastante flexibilidade do ponto de vista de se lidar com franjas isocromáticas já rotuladas. Em princípio, não se trabalha com todos os pontos rotulados para as franjas afinadas, ou seja, faz-se uma amostragem das mesmas. FOTOVER permite dois tipos de amostragens de pontos das franjas rotuladas, onde pode-se variar, para cada ordem de franjas, o número de pontos a serem amostrados. Estes tipos são mencionados no item seguinte. Além disto, com base no arquivo com terminação TEM, caso necessário, pode-se alterar as coordenadas da ponta da trinca, caso descubra-se, posteriormente ao processamento em FOTOFAN, que elas estejam erradas. Pode-se, com este recurso, fazer simulações sobre a influência de erros na localização da ponta da trinca sobre o resultado de  $K_I$ .

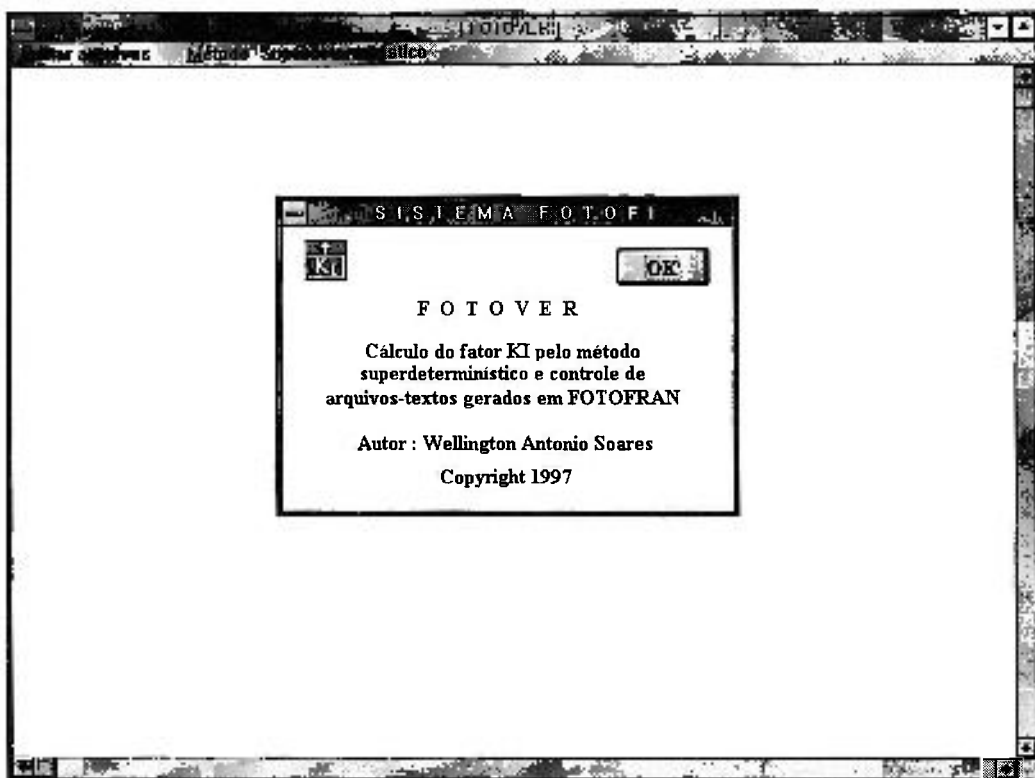


Figura 69 - Tela de apresentação do *software* FOTOVER.

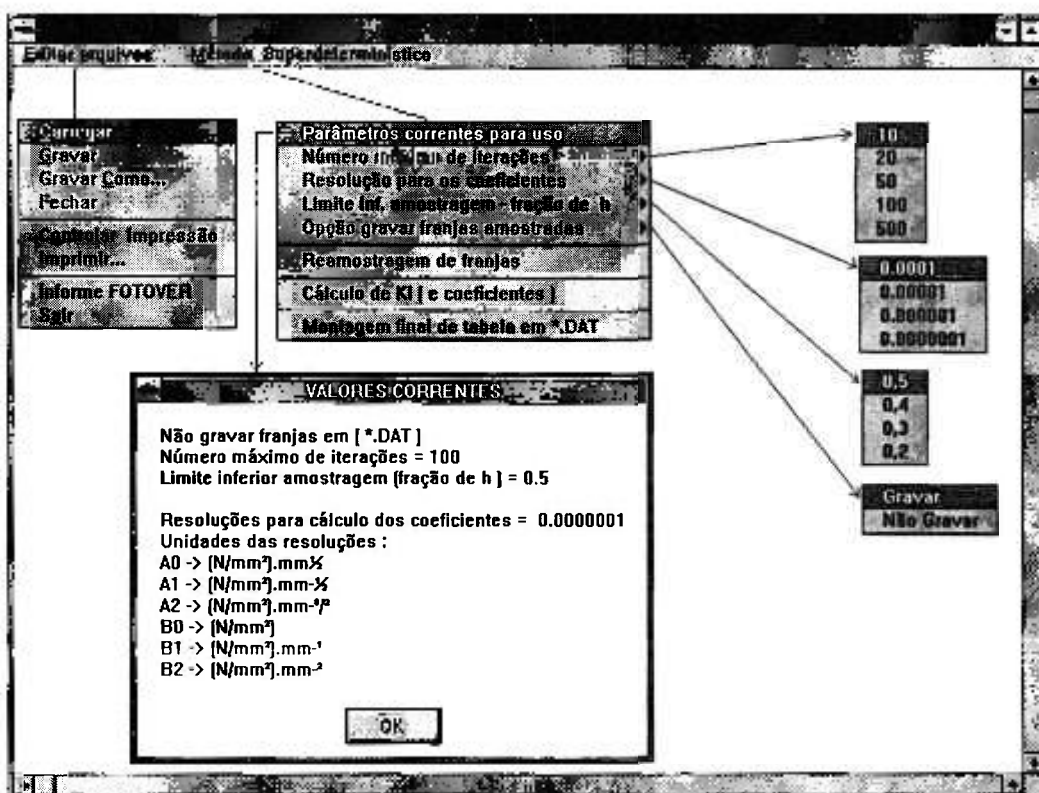


Figura 70 - Ilustração de menu relativo ao item Método Superdeterminístico.

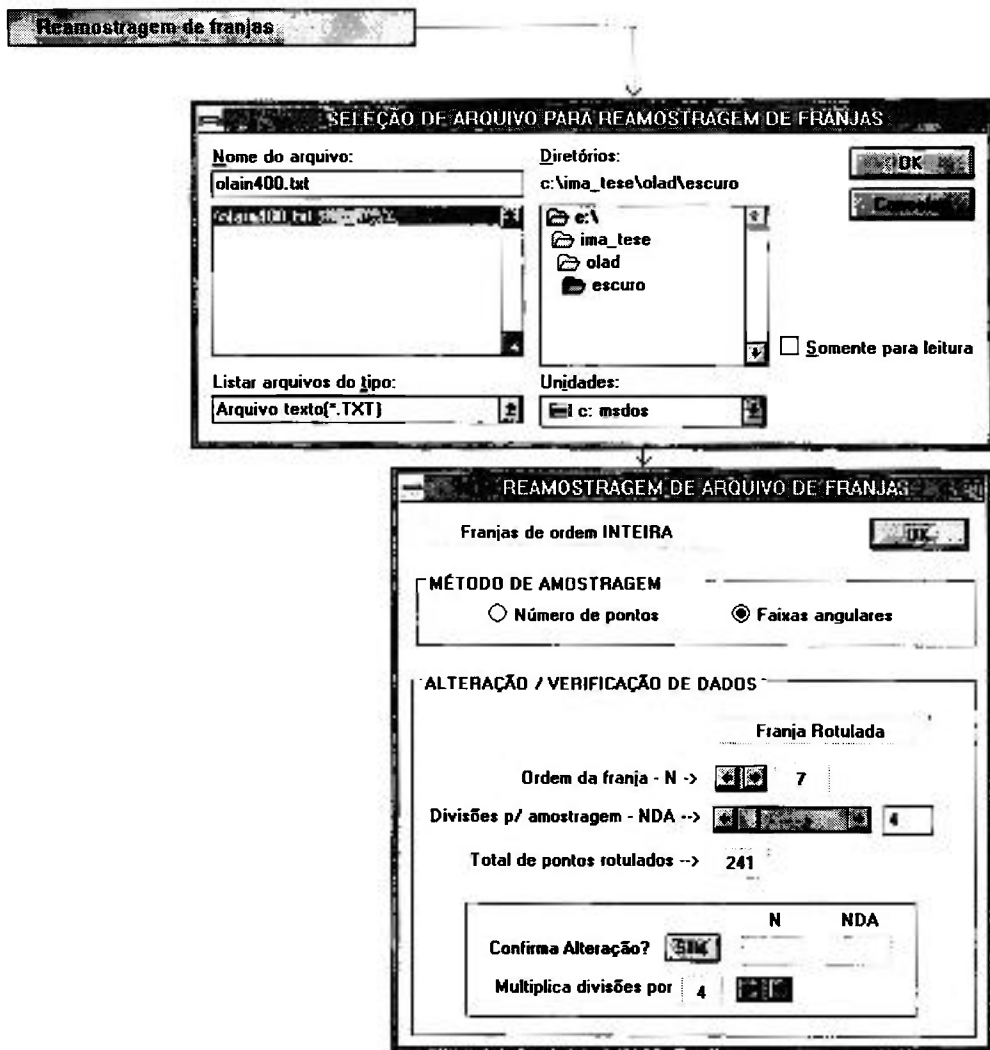


Figura 71 - Ilustração de janelas referentes ao item de reamostragem de franjas.

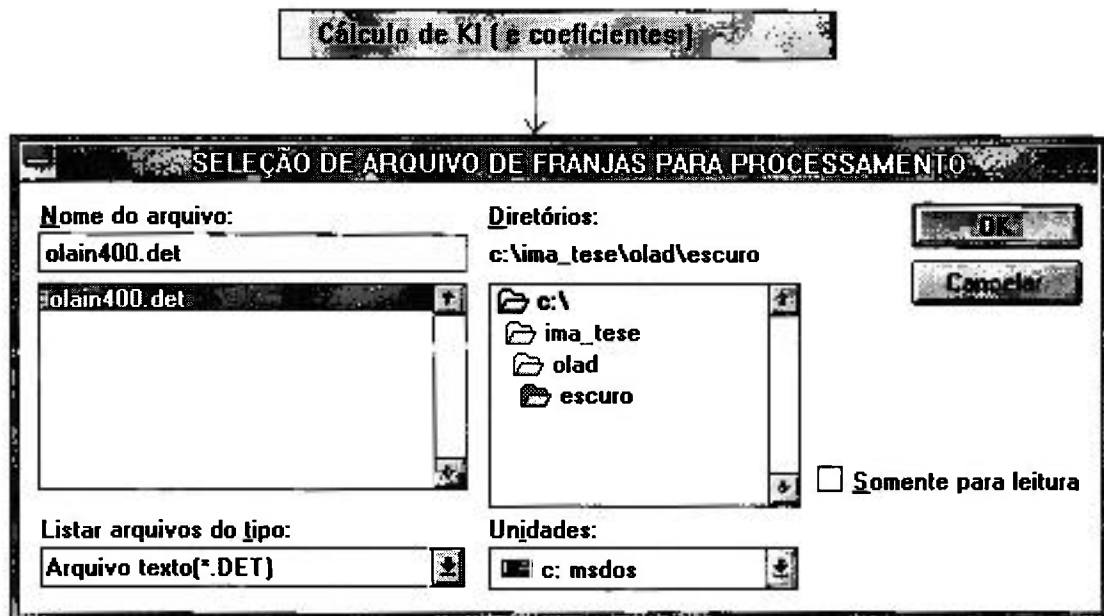


Figura 72 - Ilustração de janela referente ao item de cálculo de  $K_I$ .

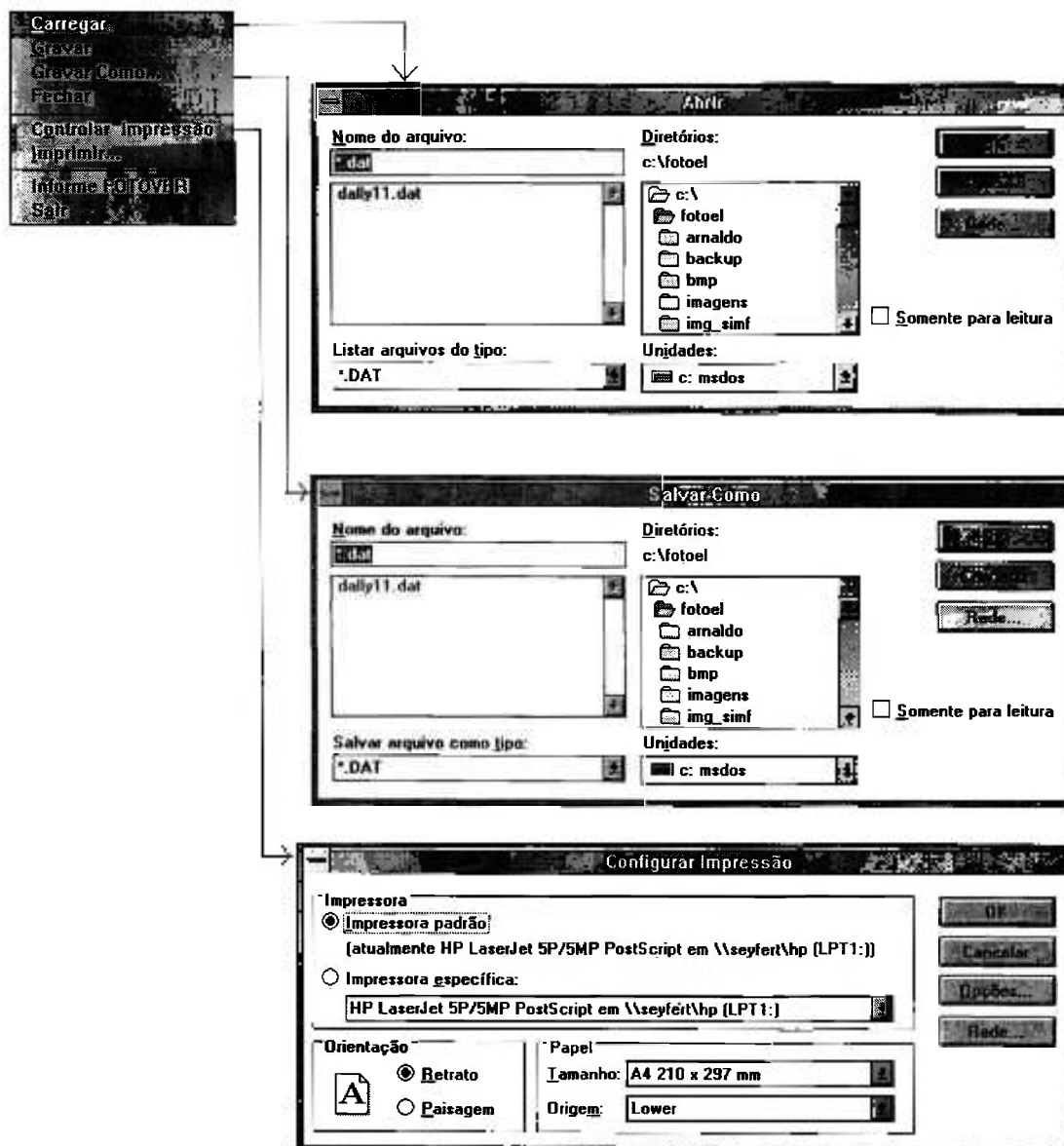


Figura 73 - Ilustração de janelas referentes ao item Editar Arquivos.

#### 6.4 Comentários sobre implementação de algoritmos mais importantes de FOTOEL

Os algoritmos de esqueletonização e de afinamento foram implementados de acordo com bases teóricas apresentadas, respectivamente, nos itens 5.2.3 e 5.2.4. A idéia básica sobre o algoritmo de rotulação de franjas usado é ilustrada no diagrama de blocos da Figura 74. A amostragem de franjas já rotuladas pode ser feita de duas maneiras, por faixas angulares, como ilustrado nas Figuras 75 e 76, ou por número de pontos, como mostrado

nas Figuras 77 e 78. Este último tipo consiste em se ir direto ao arquivo de franjas rotuladas e selecionar pontos das franjas, pulando-se determinado número de pontos previamente estabelecido.

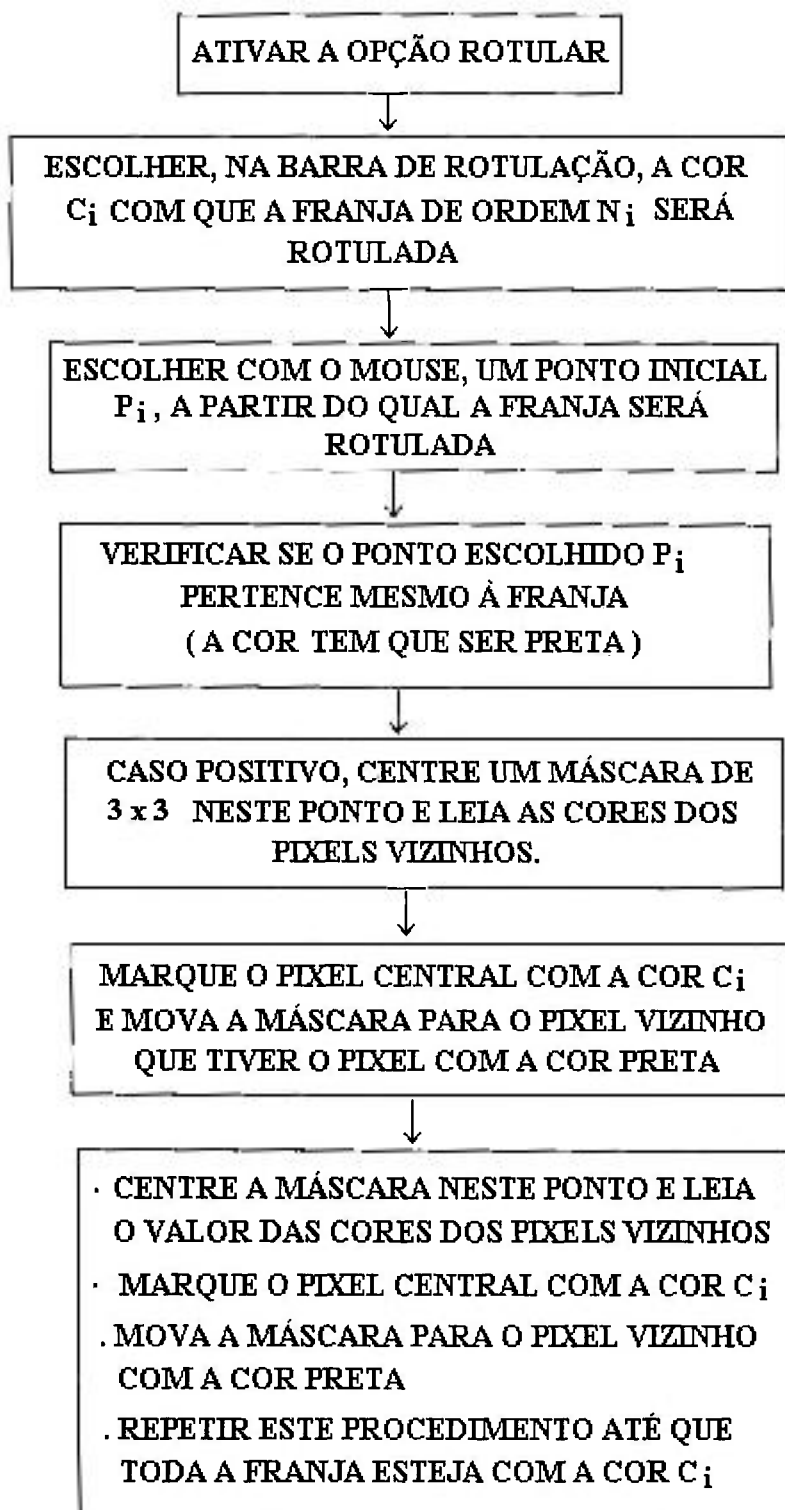


Figura 74 - Diagrama de blocos do algoritmo usado para rotulação de franjas.

Na amostragem por faixas angulares, são consideradas separadamente as faixas de ângulos  $\theta$  positivos (anti-horário) e negativos (horário). Assim, nos arquivos de resultados de processamento de franjas irão aparecer dados relativos a faixas angulares positivas e negativas.

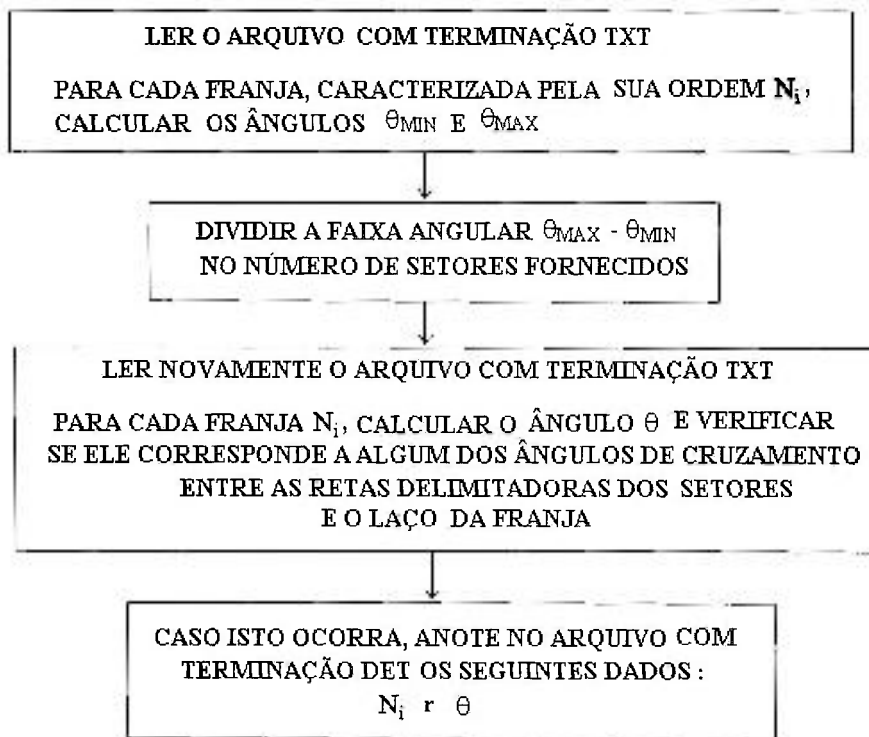


Figura 75 - Diagrama de blocos do algoritmo usado para amostragem de franjas por faixas angulares.

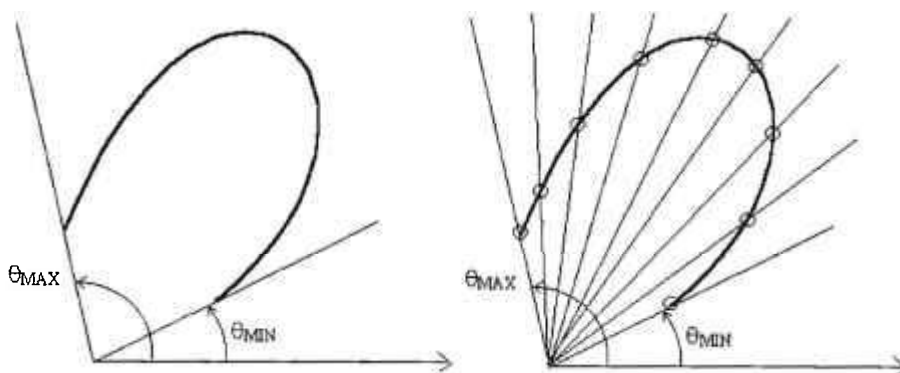


Figura 76 - Esquema da divisão dos setores para amostragem por faixas angulares.

A amostragem por número de pontos é particularmente útil no caso em que as franjas resultantes do afinamento sejam descontínuas, como mostrado na Figura 78. Neste

tipo de franjas, para o processo de amostragem por faixas angulares, haverá pontos sem interseção entre as retas delimitadoras dos setores e o laço da franja que esteja sendo amostrada.

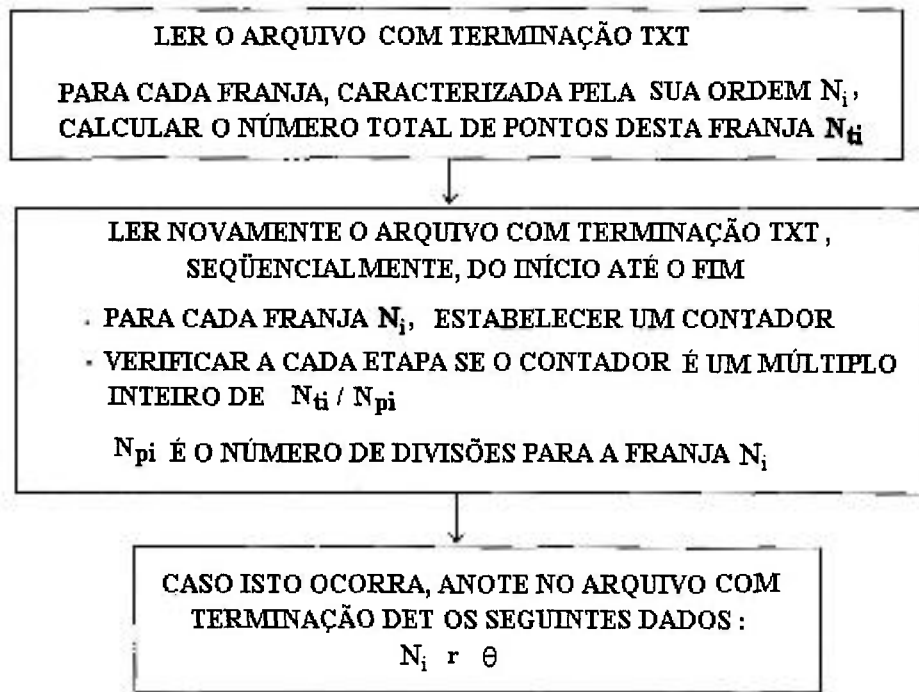


Figura 77 - Diagrama de blocos do algoritmo usado para amostragem de franjas por pontos.

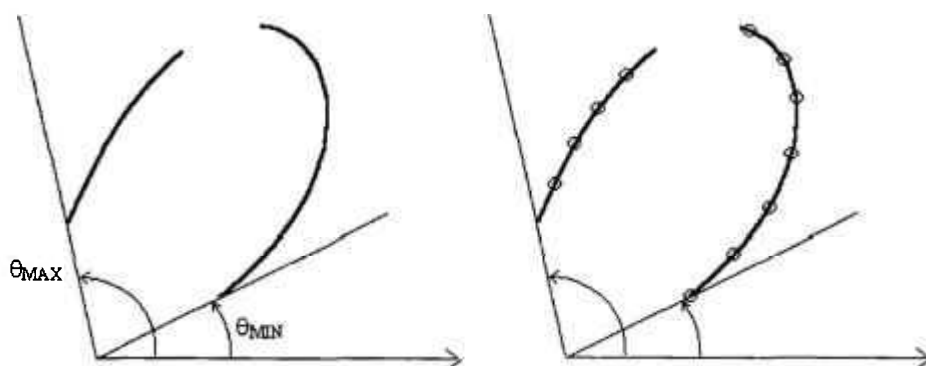


Figura 78 - Esquema da amostragem de laço de franja pela amostragem por pontos.

A implementação do método superdeterminístico de Dally requer a inversão de matrizes. O processo de inversão foi feito com base no algoritmo em linguagem C, disponível na referência<sup>(85)</sup>, tendo por base o método de eliminação Gauss-Jordan.

## 6.5 Exemplos das etapas de processamento de isocromáticas com FOTOFRAN

Neste item, faz-se uma exposição seqüencial das etapas seguidas durante o processamento de uma imagem isocromática, na ponta de uma trinca, visando a obtenção de  $K_I$  no âmbito do *software* FOTOFRAN. O menu vertical, no lado direito da Figura 79, na ordem de cima para baixo, fornece a seqüência a ser seguida para executar tal atividade. Assim, a primeira ação a ser tomada é carregar a imagem a ser processada. A seguir tem de ser fornecida a resolução espacial e o fator de ampliação referentes à imagem carregada. Caso tais valores não sejam conhecidos, mas se conheça uma dimensão marcada sobre a imagem, pode-se fornecer uma resolução fictícia para a imagem e calcular o fator de ampliação com base no item **Amp. Des.** do referido menu vertical. A etapa seguinte é a localização da ponta da trinca, com o uso do *mouse*. Seleciona-se, então, a área a ser processada. A seguir, se necessário, podem ser usados vários filtros para adequar a isocromática ao processo de extração de franjas. Segue-se, então, os outros passos indicados no menu vertical. Nas Figuras 79 a 90, mostra-se, passo-a-passo, o uso das funções mínimas necessárias ao processamento de franjas isocromáticas com o objetivo de calcular-se  $K_I$ .

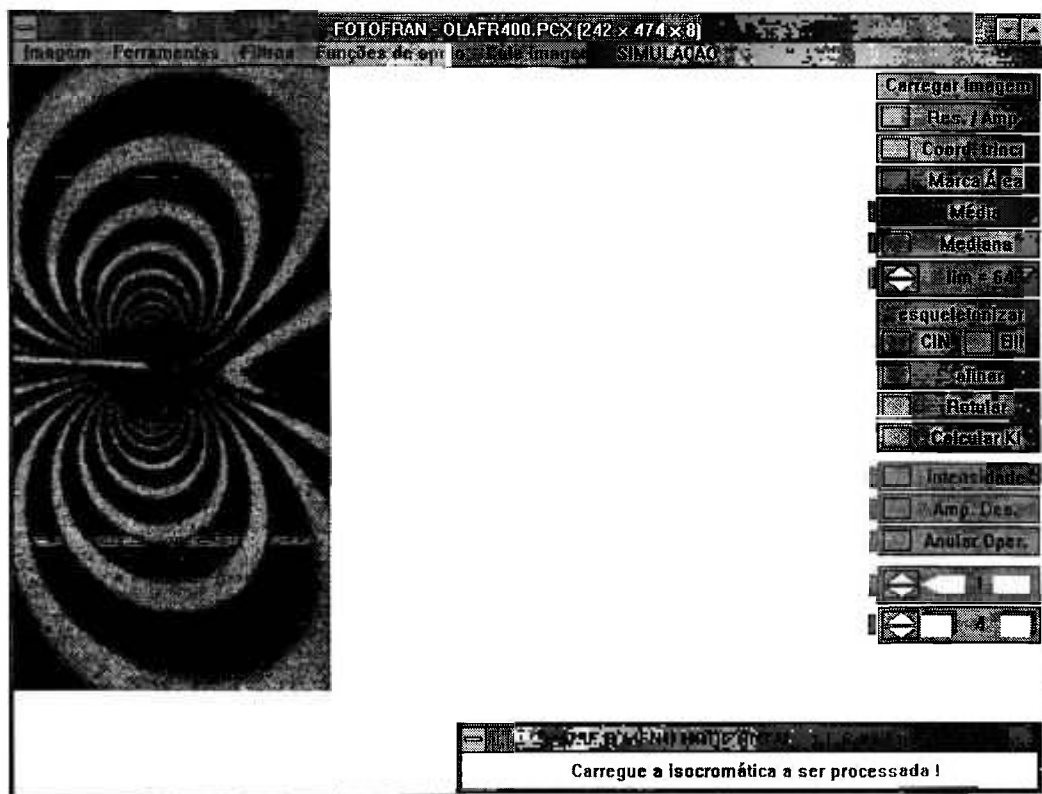


Figura 79 - Carregamento de isocromática em FOTOFRAN.



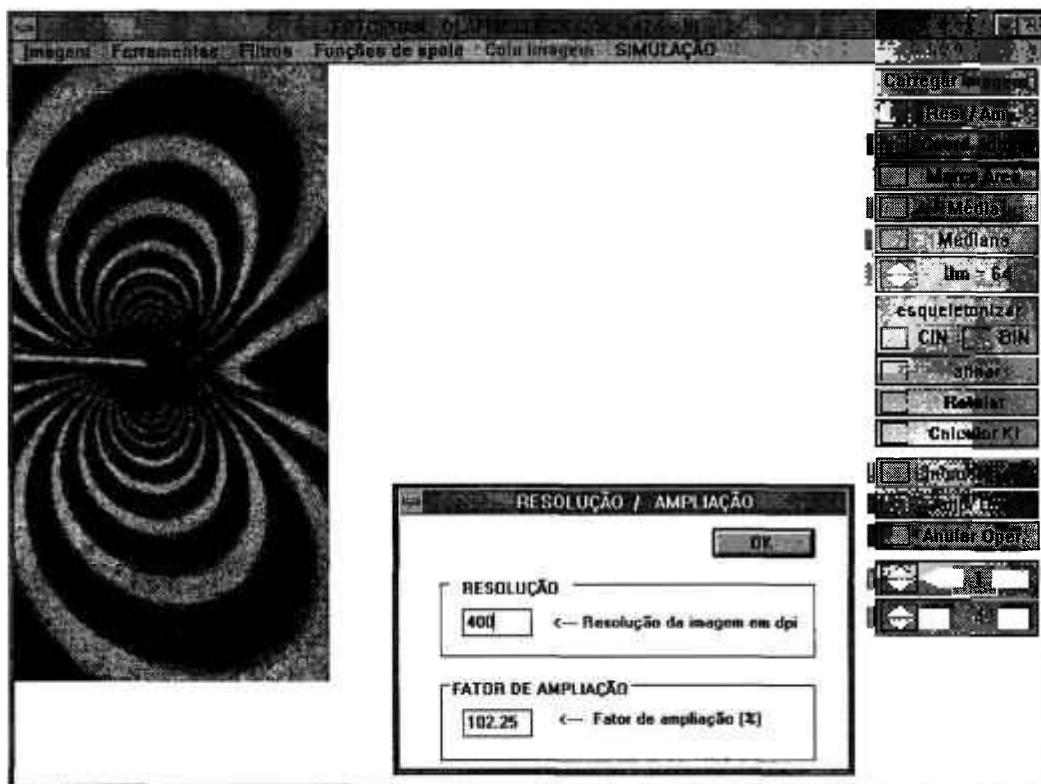


Figura 80 - Seleção da resolução espacial da imagem e do fator de ampliação.

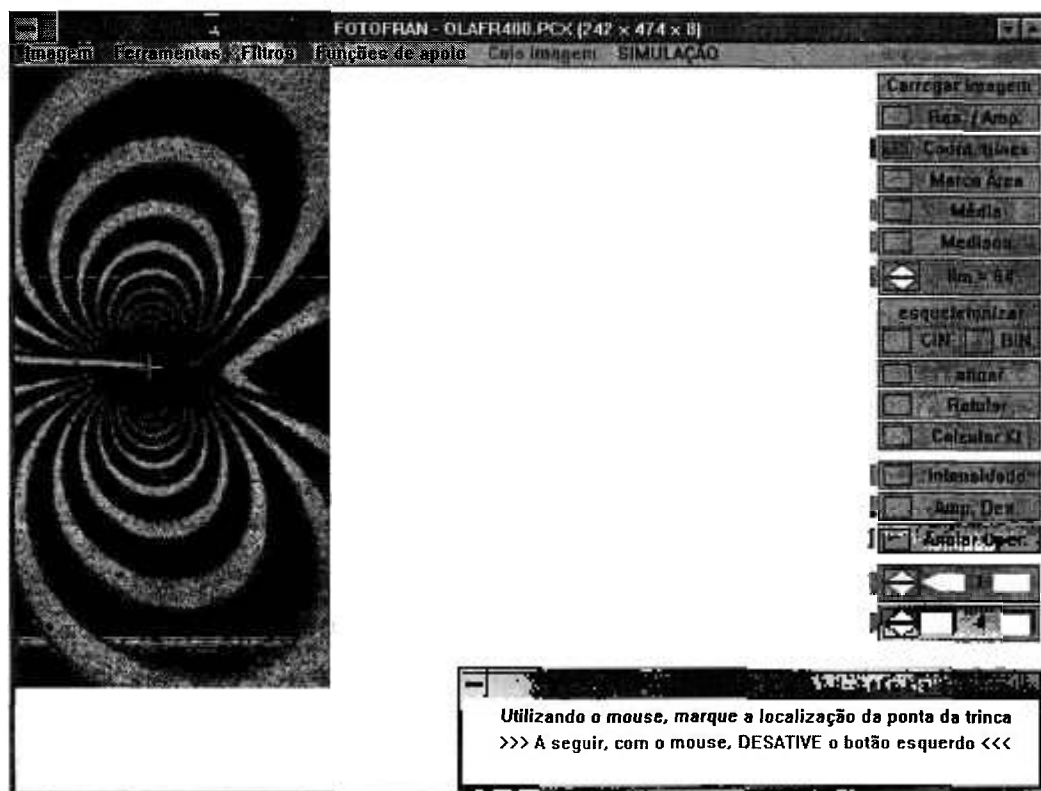


Figura 81 - Localização da ponta da trinca com o *mouse*.

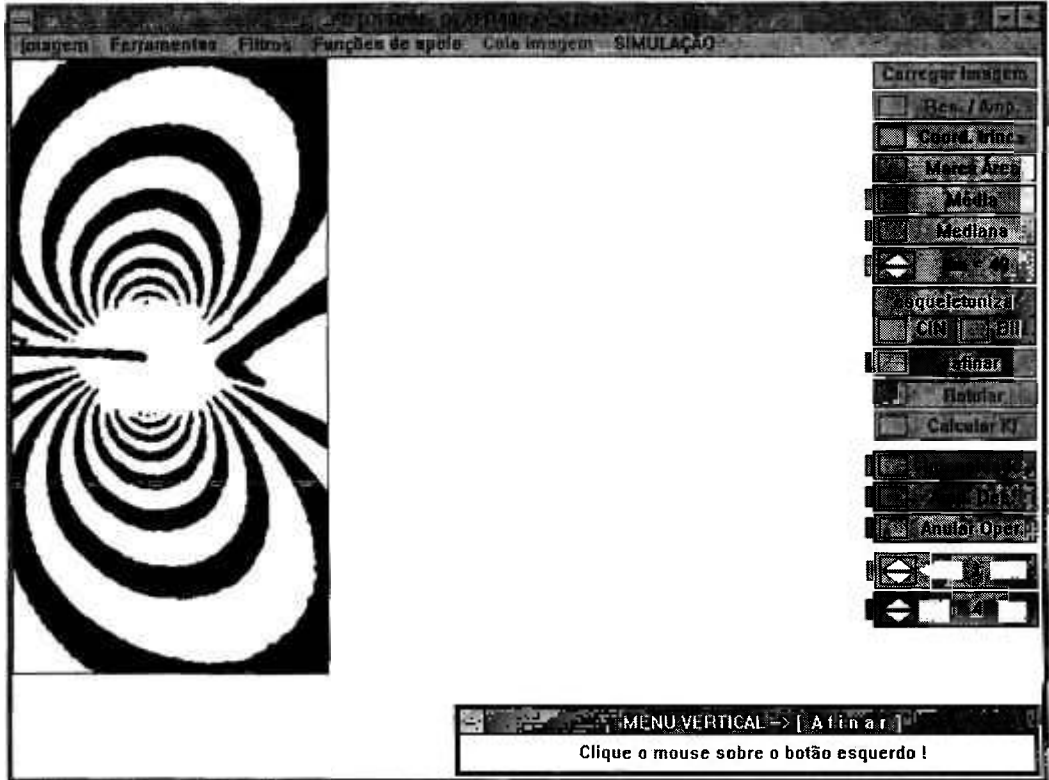


Figura 82 - Resultado da operação de Esqueletização (opção BIN).

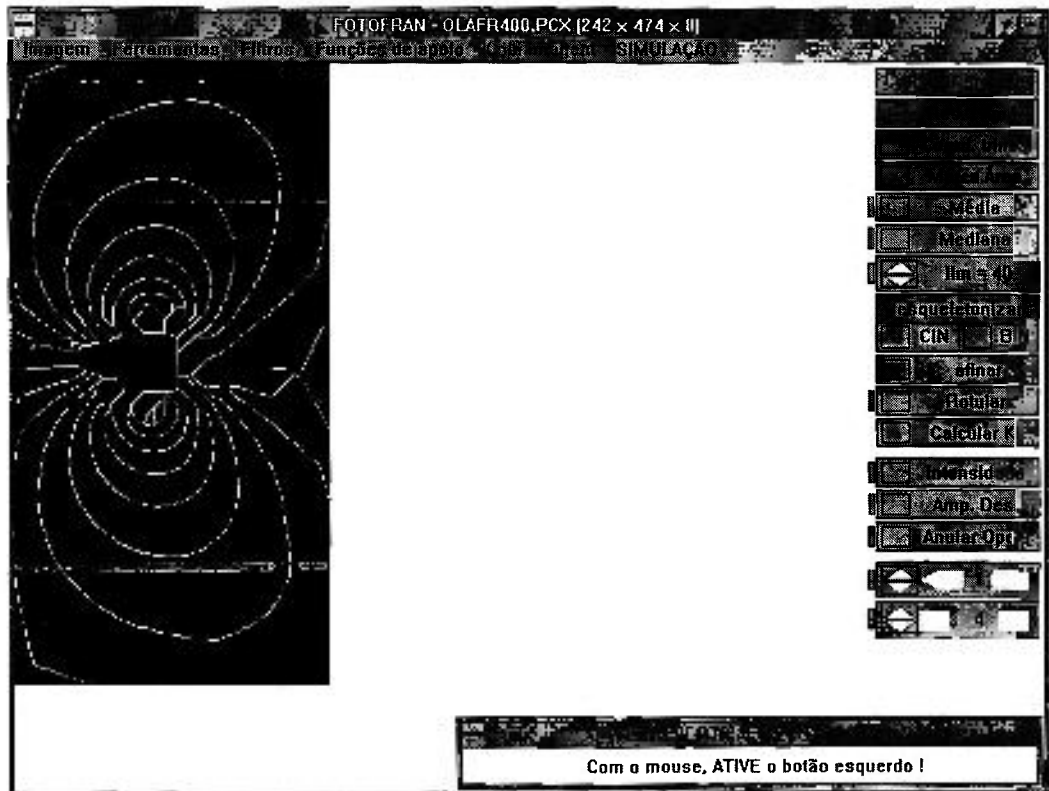


Figura 83 - Resultado da operação de Afinamento.

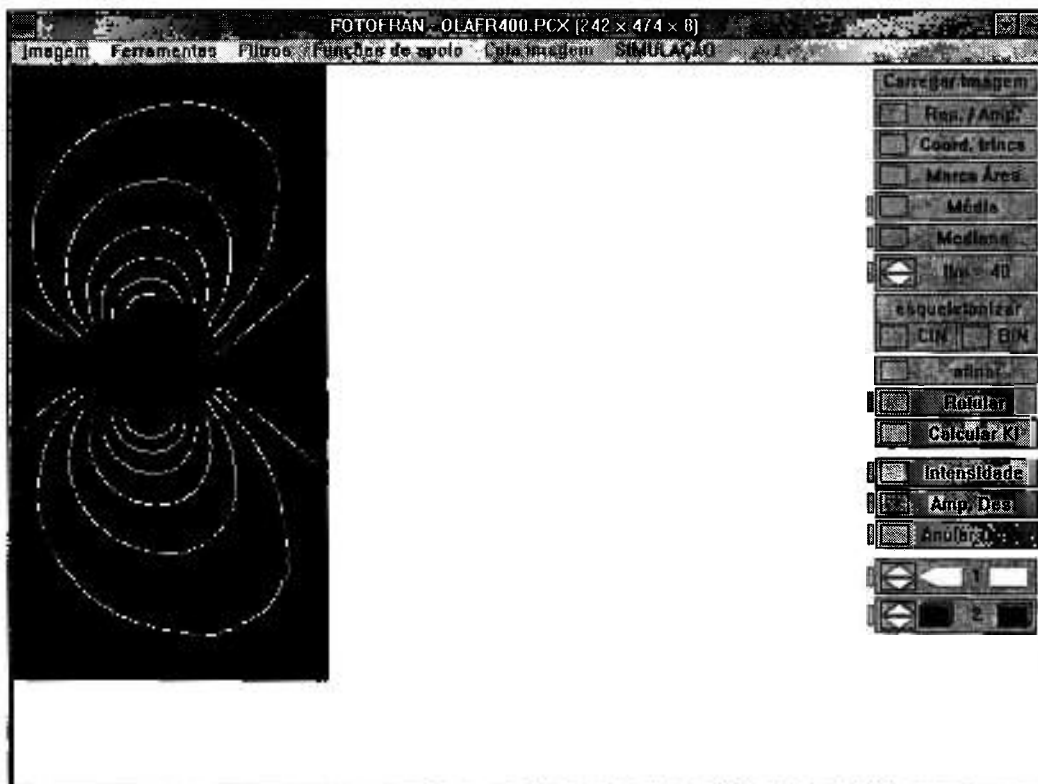


Figura 84 - Resultado da operação de edição com Lápis borracha.

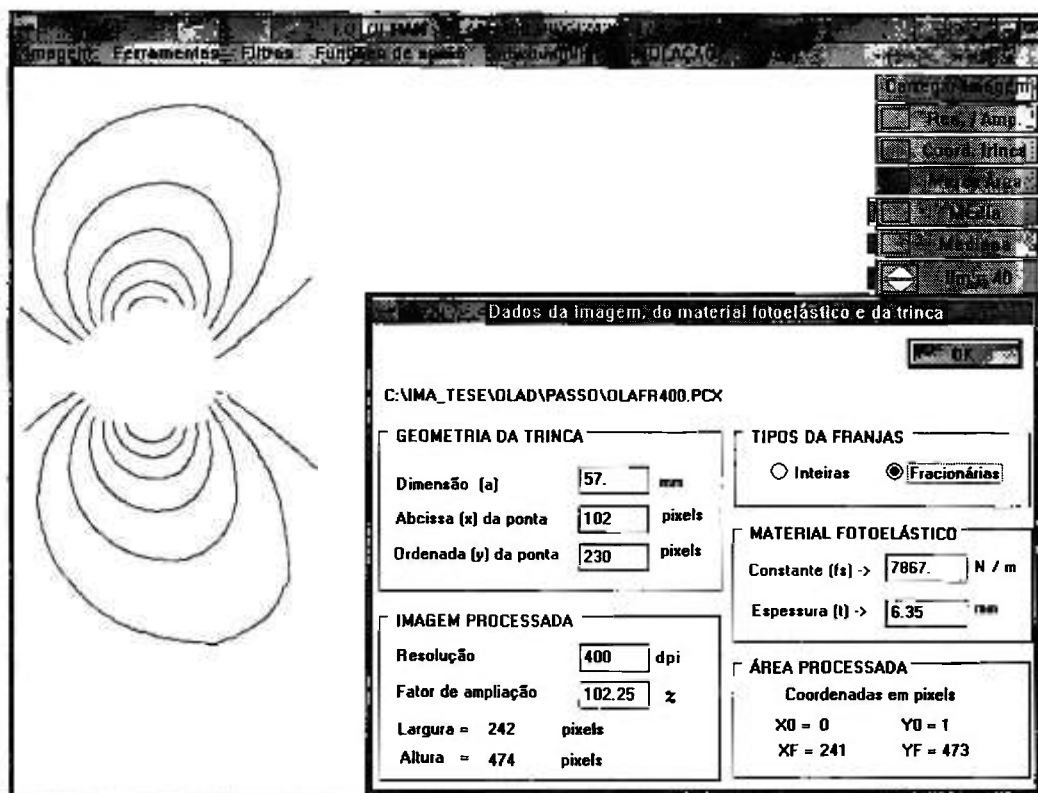


Figura 85 - Entrada de dados precedendo à rotulação de franjas.

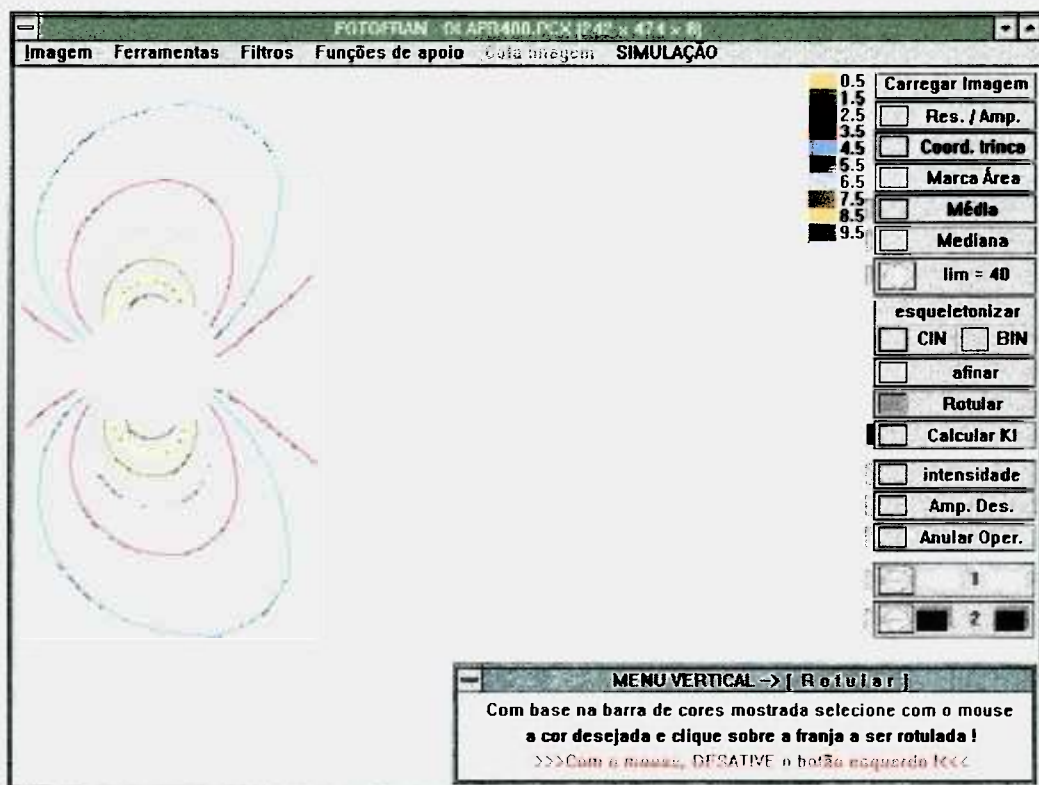


Figura 86 - Resultado da rotulação de franjas.

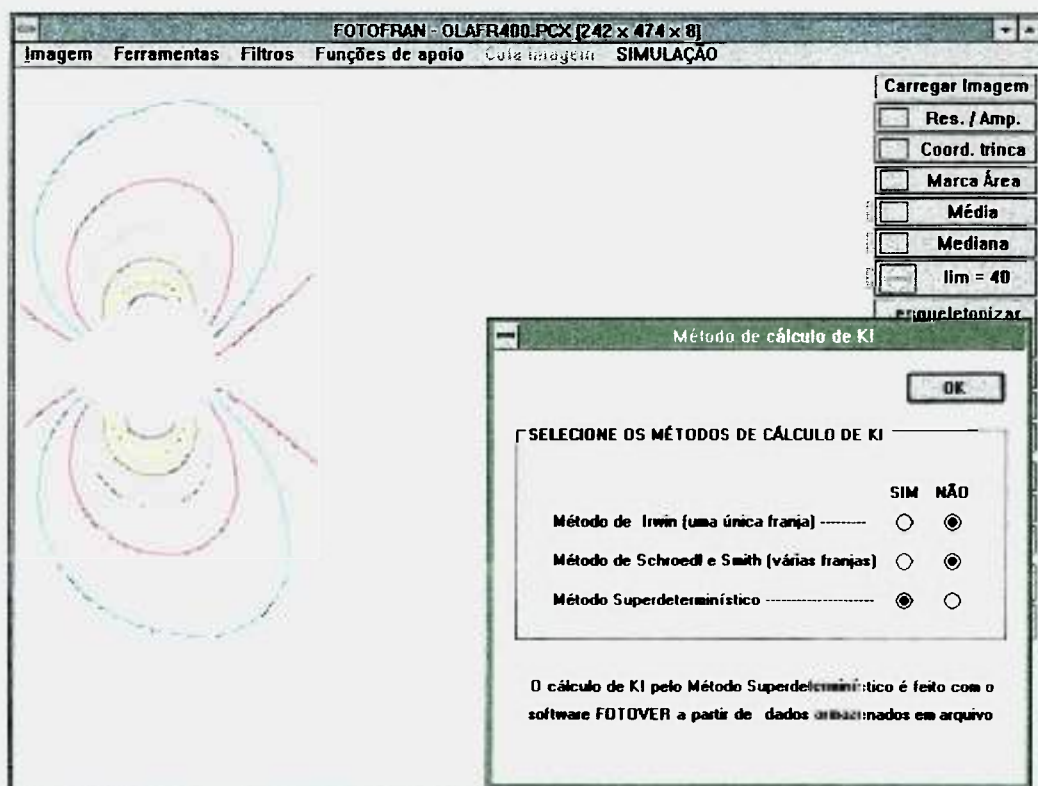


Figura 87 - Seleção dos métodos de cálculo de  $K_I$ .

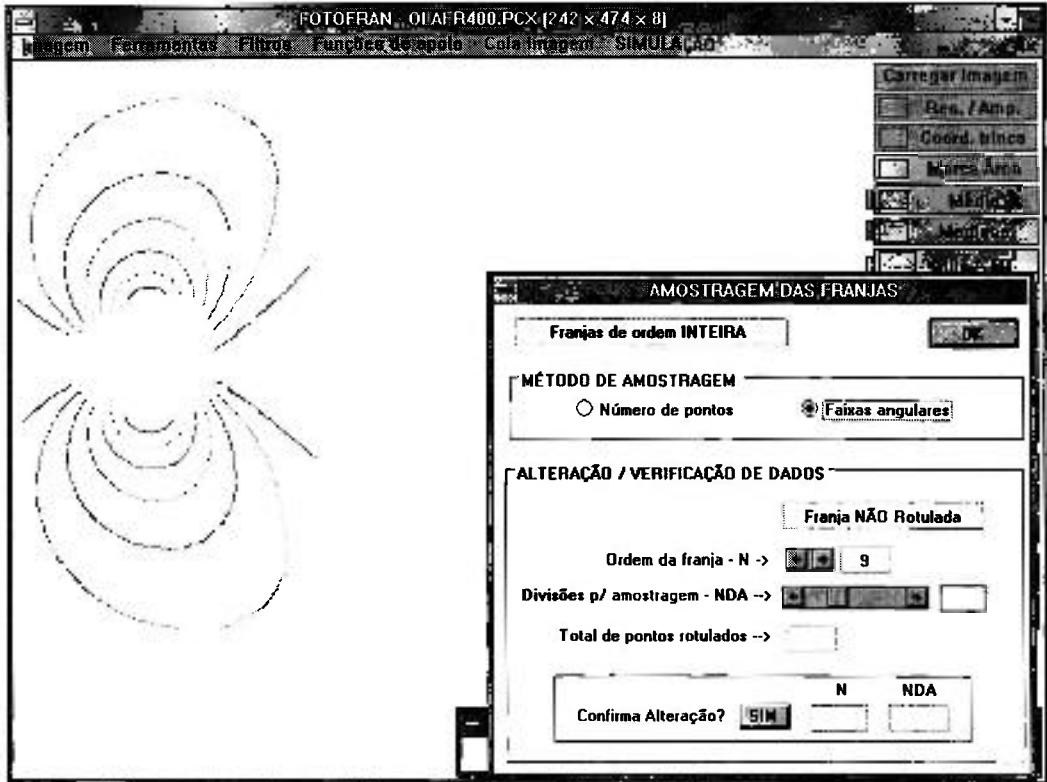


Figura 88 - Seleção do tipo de amostragem para o método superdeterminístico.

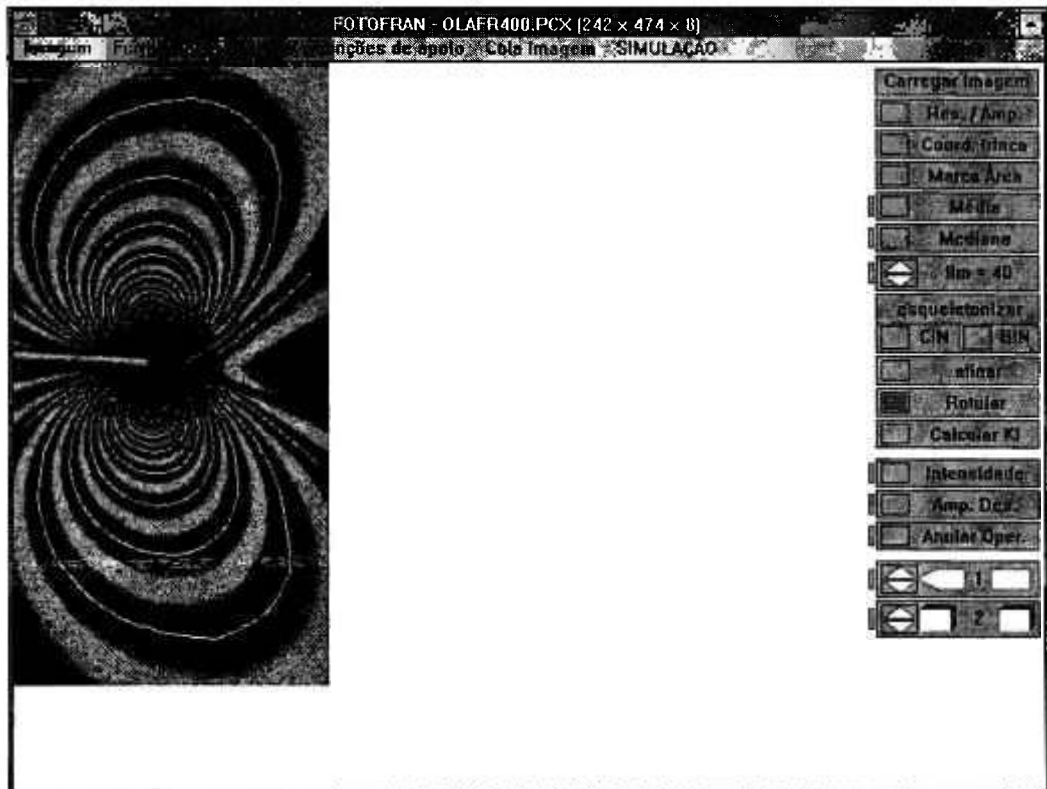


Figura 89 - Operação XOR entre imagem original e as franjas afinadas finais.

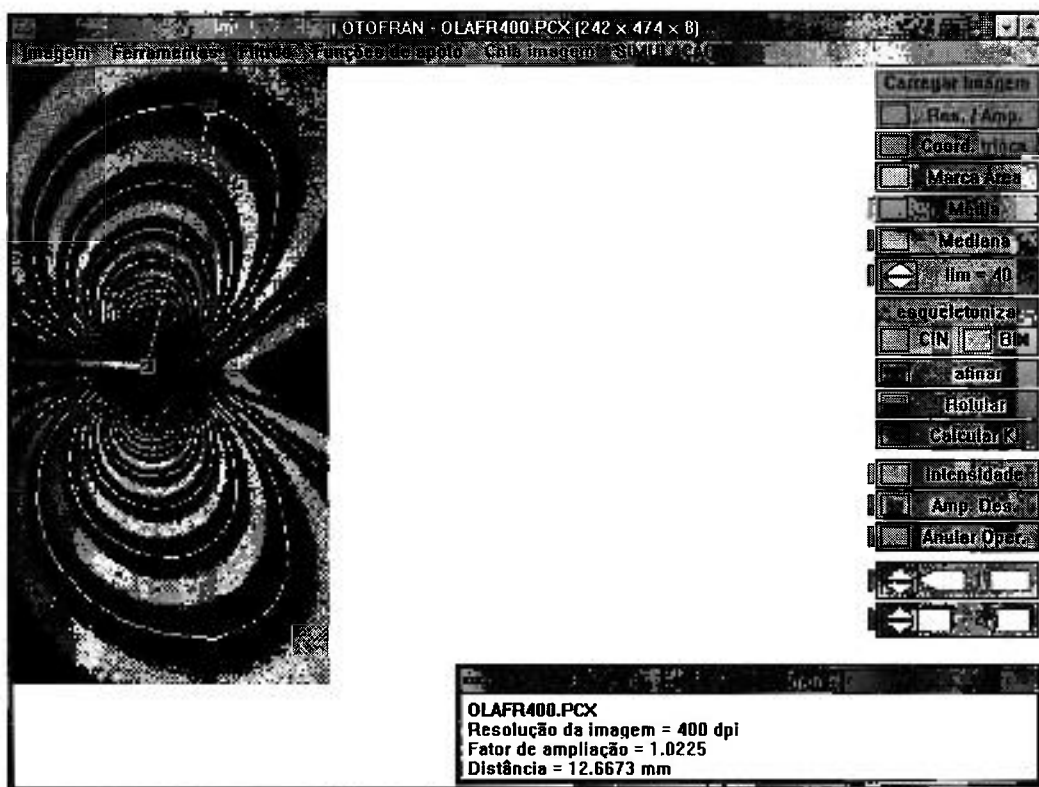


Figura 90 - Utilização da opção Régua para medir distâncias.

## 6.6 Recomendações para uso do sistema FOTOEL

É fundamental que o usuário forneça a resolução espacial e o fator de ampliação da imagem isocromática que estiver sendo usada para cálculo de parâmetros da Mecânica de Fratura.

Ao termino do processo de afinamento de franjas, os laços das franjas com números de ordens diferentes não poderão estar interligados. Caso isto ocorra, deve-se utilizar as opções *Lápis borracha* ou *Linha reta* para fazer a separação. A seguir, utiliza-se a opção *Atualizar Edição*. Estas ações devem preceder à etapa de rotulação de franjas.

Para cálculo de  $K_I$  pelo método superdeterminístico, os dados das franjas rotuladas devem estar dentro da zona 2. O limite superior pode ser controlado em FOTOFRAN, selecionando-se uma área da imagem que delimite o limite superior da zona 2 (3% do tamanho de trinca, no caso do método de Dally). O limite inferior pode ser controlado em FOTOVER, onde dispõe-se da opção de limitar este valor com base numa fração da espessura do material birrefringente.

## 7 EQUIPAMENTOS E MATERIAIS UTILIZADOS NA GERAÇÃO DE IMAGENS FOTOELÁSTICAS

No desenvolvimento do sistema FOTOEL, a aquisição de conhecimentos práticos pelo autor foi dividida, basicamente, em três fases. Numa primeira fase, visando à aquisição de fundamentos básicos da fotoelasticidade, foram utilizados os equipamentos de fotoelasticidade por reflexão, disponíveis no Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN). Numa segunda fase, o autor desenvolveu o *software* SIMFOT de simulação de experimento fotoelástico, com modelos birrefringentes tradicionais (disco sob compressão, chapas com furo circular). Este *software* foi adaptado para gerar, também, isocromáticas na ponta de trinca, carregada no modo I. Numa terceira fase, foram realizados experimentos fotoelásticos com polariscópio de transmissão, utilizando-se um modelo de material birrefringente, com trinca pré-fabricada, no Laboratório de Fotomecânica da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC/RJ). No decorrer destas fases, foram especificados e adquiridos os equipamentos do sistema FOTOEL para análise e processamento de isocromáticas em ponta de trinca.

### 7.1 Equipamentos, materiais e *software* de simulação de isocromáticas

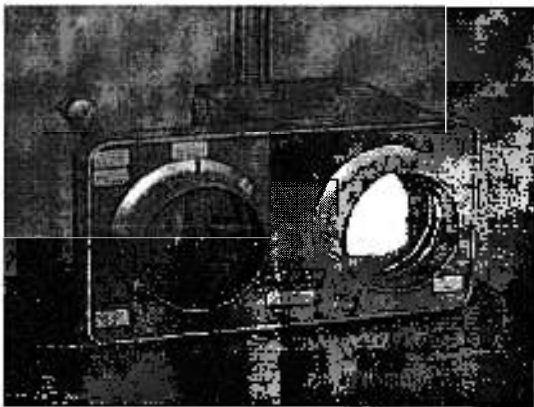
#### 7.1.1 Fase de estudos básicos de fotoelasticidade e de aquisição de imagens fotoelásticas

Com relação à primeira fase citada, foram utilizados os seguintes equipamentos e materiais para a realização de experimentos fotoelásticos:

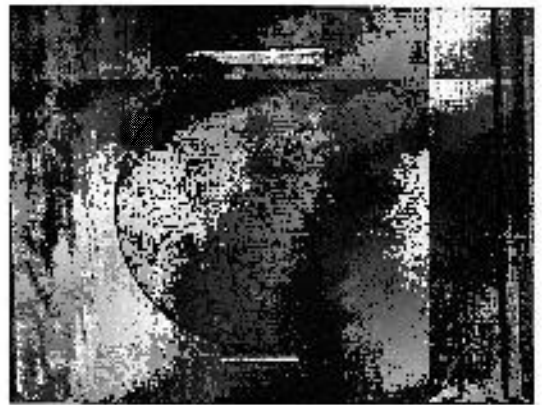
- máquina universal de ensaios *INSTRON* para aplicação de carga;

- polariscópio de reflexão da *Chapman Laboratories*, modelo LF/MU (*Large Field Meter Model*) com acessórios (compensador *Babinet*, conjunto telemicroscópico);
- microcomputador 486 - 66 MHz;
- câmara de vídeo *Panasonic OmniMovie PV-910-A* - 12x;
- placa de captura de vídeo : *Vídeo Blaster FS 200 - Creative Labs*;
- disco de material fotoelástico;
- viga de alumínio recoberta com material fotoelástico.

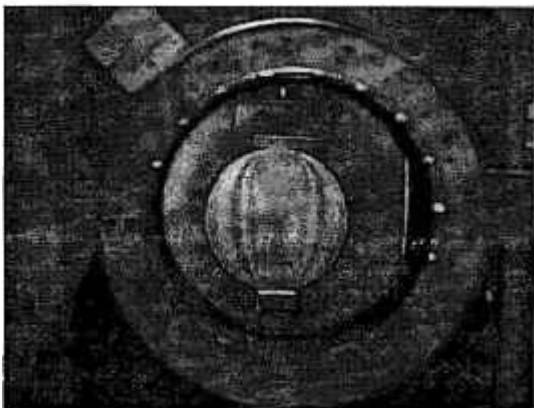
Nesta primeira fase, foram feitos alguns experimentos fotoelásticos com um disco submetido a cargas de compressão diametralmente aplicadas e com uma viga de alumínio com elemento concentrador de tensões revestida com material fotoelástico. Os experimentos foram feitos com um polariscópio de reflexão, ilustrado na Figura 91.



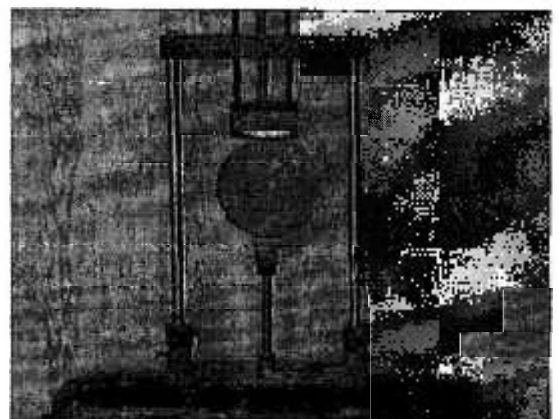
(a) Polariscópio de reflexão



(b) disco birrefringente



(d) isocromática vista através do analisador



(c) aplicação de cargas

Figura 91 - Experimento fotoelástico com disco birrefringente sob compressão.



Na Figura 92, é mostrado o esquema de carregamento da viga de alumínio, tendo um chanfro concentrador de tensões na sua parte inferior. O tipo de câmara de vídeo usado na aquisição das isocromáticas é mostrado na Figura 93. As isocromáticas, na região de concentração de tensões da viga de alumínio, são ilustradas na Figura 94.

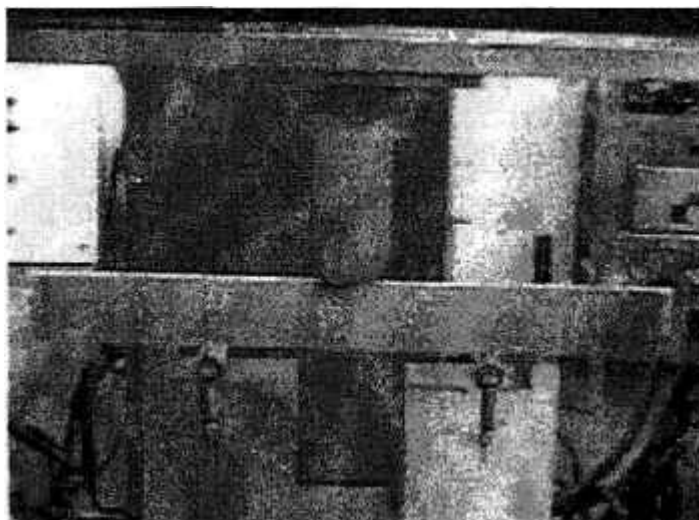


Figura 92 - Esquema do carregamento da viga de alumínio, revestida com uma camada de material birrefringente, tendo um chanfro concentrador de tensões.



Figura 93 - Equipamentos básicos usados na aquisição de imagens fotoelásticas na viga de alumínio da Figura 92.

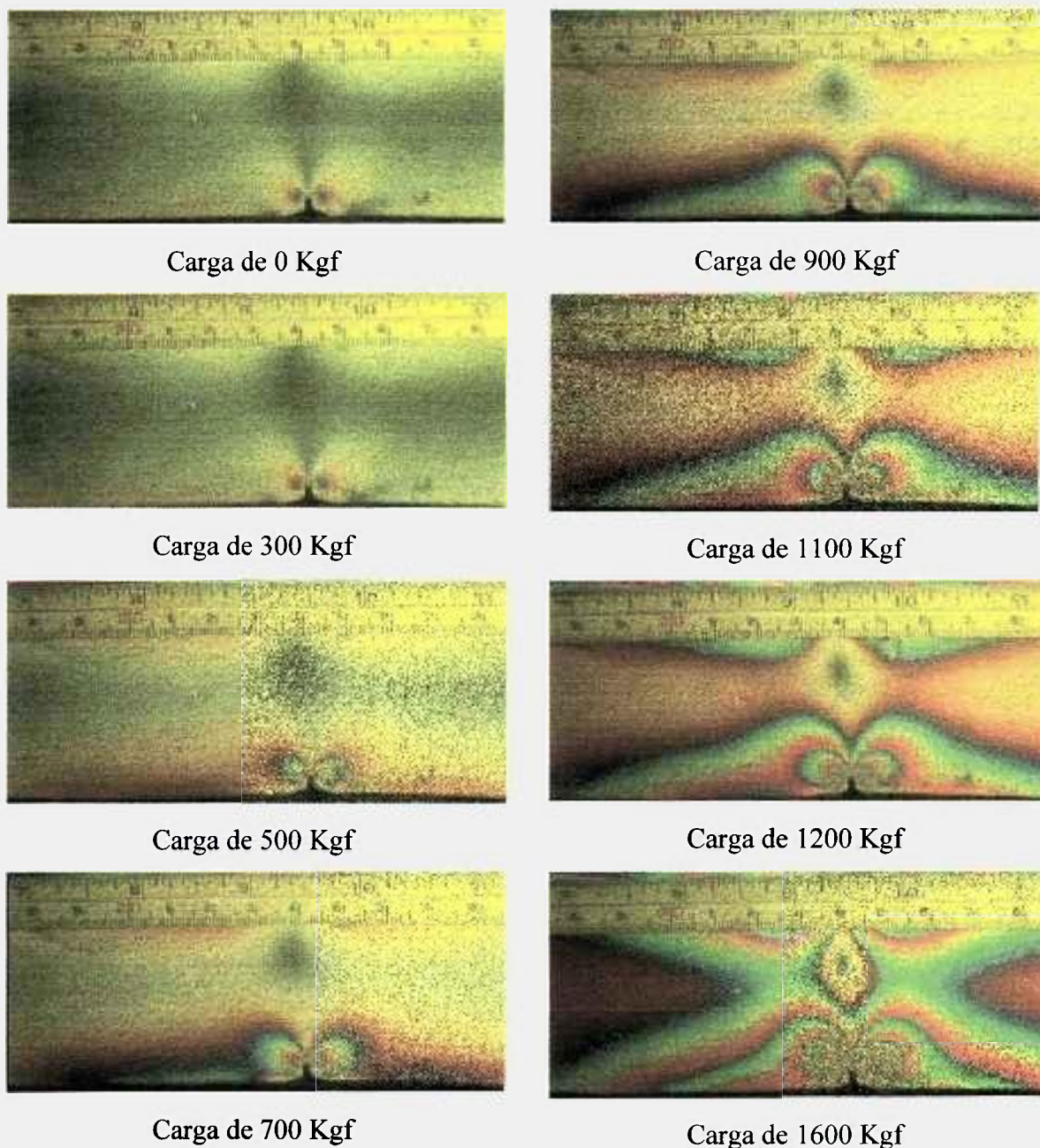


Figura 94 - Variação da isocromática em uma viga de alumínio com um chanfro, revestida com material birrefringente, em função da carga aplicada.

Os experimentos realizados nesta primeira fase mostraram que não seria possível a aquisição de imagens com a utilização de câmaras de vídeo convencionais, do tipo citado neste item. Observa-se, nas imagens da Figura 94, que não é possível extrair-se os parâmetros geométricos necessários para o cálculo do fator de intensidade de tensões  $K_I$ , tendo por base a técnica fotoelástica.

### 7.1.2 Simulação de imagens isocromáticas por computador

Como a geração de isocromáticas adequadas à extração de parâmetros para o cálculo de  $K_I$  iria demandar tempo, em virtude da necessidade de importação de equipamentos, resolveu-se, então, simular tais imagens utilizando-se recursos de computação gráfica. Dentro deste espírito, foi desenvolvido o *software* SIMFOT<sup>(6,7)</sup>, em ambiente MS-DOS<sup>(84)</sup>, que permite a simulação de isocromáticas em um disco de material birrefringente sob compressão e chapas infinitas com um furo circular. Posteriormente, introduziu-se, neste *software*, recursos para a geração de isocromáticas na região da ponta de uma trinca, tendo por base uma chapa com furo elíptico com uma das dimensões reduzidas<sup>(1)</sup>. Finalmente, incorporou-se em SIMFOT a opção de gerar-se isocromáticas na ponta de trinca, com base nas expressões do campo de tensões em ponta de trinca, onde se entra com o valor do fator de intensidade de tensões  $K_I$ , a tensão remota  $\sigma_{0x}$  e a dimensão “a” da trinca.

Nas Figuras 95 a 98, são mostradas isocromáticas em ponta de trinca, carregada no modo I, para as regiões  *muito próxima* e  *próxima* da ponta da trinca. Os dados das imagens das Figuras 95 e 96 são utilizados no Capítulo 7, para a aplicação dos métodos de Irwin e de Smith, na região  *muito próxima* da ponta da trinca. Os dados das imagens das Figuras 97 e 98 são usados para aplicação do método superdeterminístico de Dally no Capítulo 7. O interessante das isocromáticas das Figuras 95 a 98 é que sabe-se, *a priori*, qual é a dimensão “a” da trinca, o fator de intensidade de tensões  $K_I$ , a tensão remota  $\sigma_{0x}$  e ainda a localização da ponta da trinca e as ordens das franjas envolvidas.

As isocromáticas, mostradas nas Figuras 95 a 98, foram gerada com 64 níveis de cinza monotônicos e tiveram como base as equações (33) a (35) do Capítulo 4.

O *software* SIMFOT permite, para efeito de referência, que se desenhe com a cor branca, a faixa central de uma determinada franja escolhida, como ilustrado nas Figuras 96 e 98. No caso de imagens que sejam analisadas pelo método superdeterminístico, SIMFOT dispõe da opção de delimitar-se, com círculos, as regiões que se situem entre os raios de 3% da dimensão “a” da trinca e 50% da espessura do material birrefringente. Estes círculos são mostrados na Figura 98.

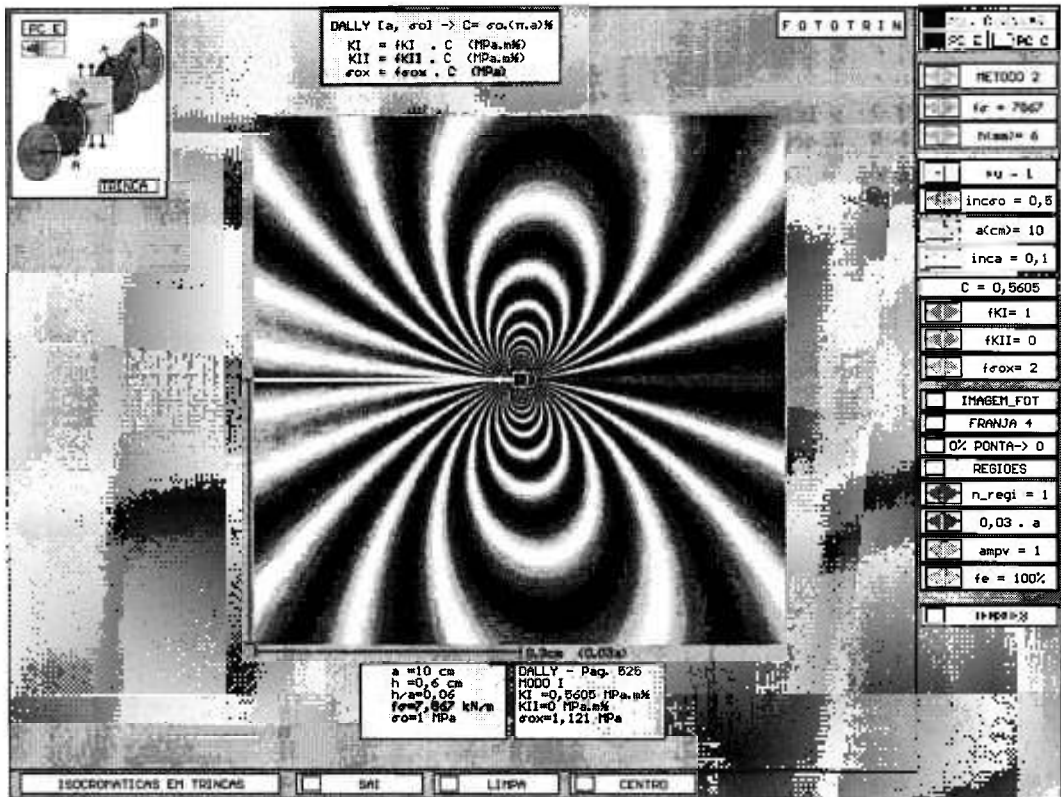


Figura 95 - Isocromática sintética na região  *muito próxima*  da ponta da trinca.

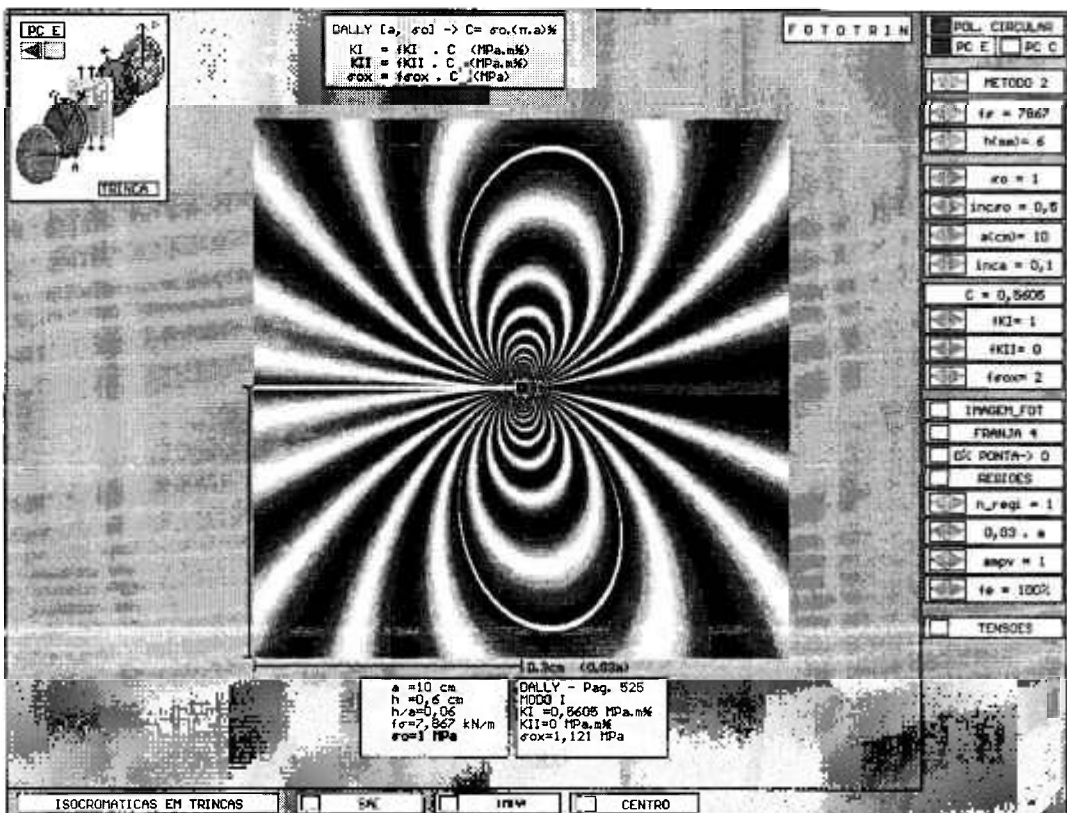


Figura 96 - Isocromática sintética, na região  *muito próxima*  da ponta da trinca, ilustrando a franja de ordem 4.

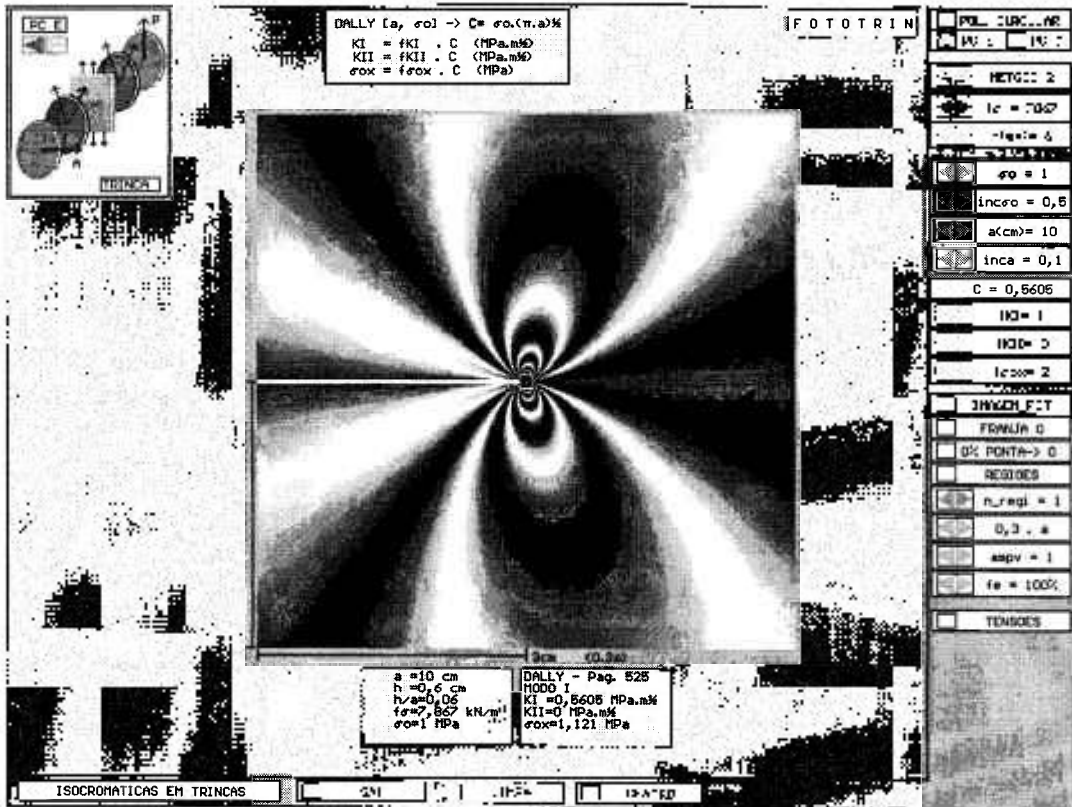


Figura 97 - Isocromática sintética na região *próxima* da ponta da trinca.

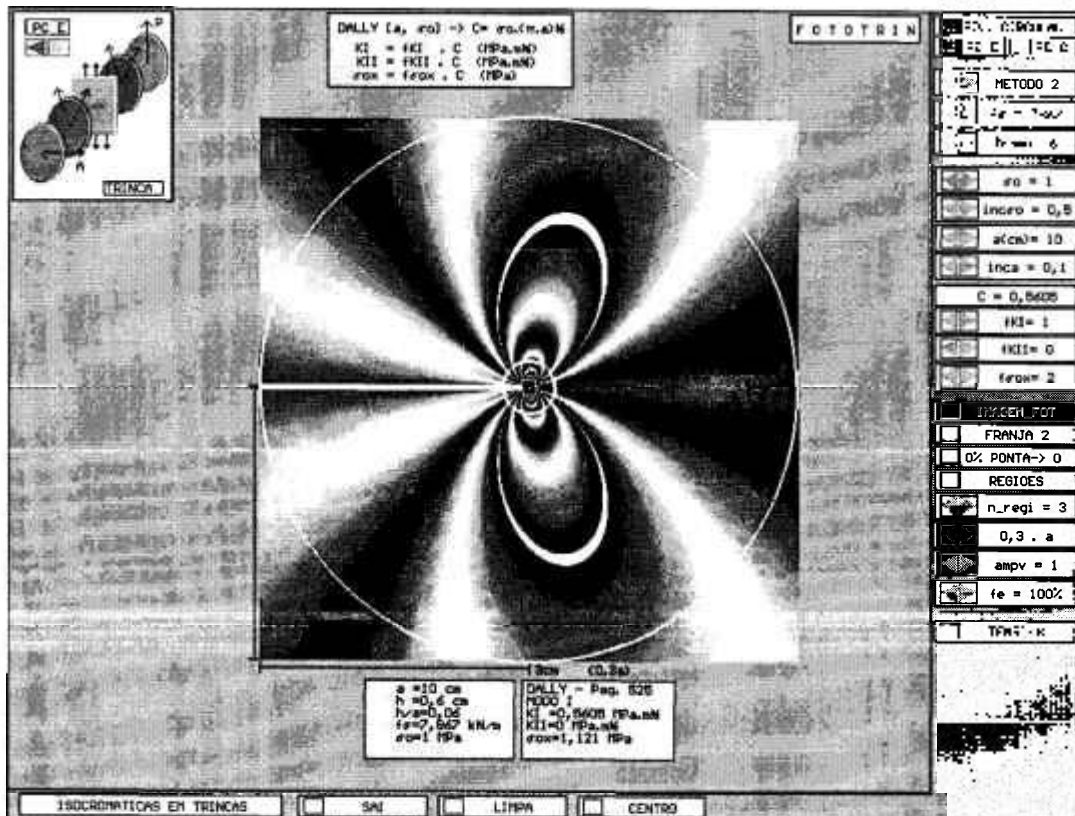


Figura 98 - Isocromática sintética, na região *próxima* da ponta da trinca, ilustrando a franja de ordem 2.

## 7.2 Isocromática digitalizada com a ajuda de um *scanner* HP de mesa.

Com o auxílio de um *scanner ScanJet IIc* da *Hewlett Packard*, com resolução espacial máxima de 600 dpi, digitalizou-se uma imagem isocromática, encontrada num artigo de OLADIMEJI<sup>(49)</sup>, a qual é mostrada na Figura 99. Esta imagem é interessante, uma vez que no artigo citado, são indicados todos os dados necessários para o cálculo de  $K_I$  com base na análise fotoelástica. Além disto, o original da imagem, no artigo, está em escala real (1x1). O experimento fotoelástico foi realizado em um modelo de material birrefringente ( $f_c = 7867$  N/m) do tipo MCTS (*Modified Compact Tension Specimen*) com relação  $a/W$  igual a 0,8 e espessura  $h$  de 6,35 mm.

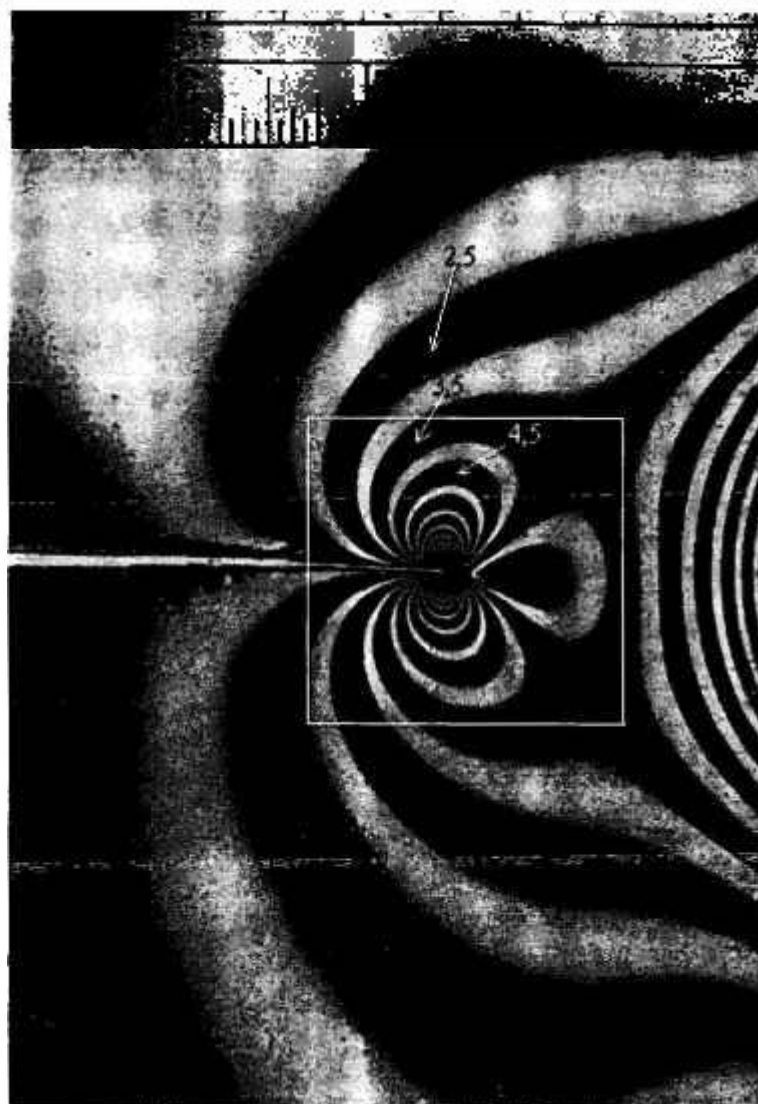


Figura 99 - Isocromática com polariscópio circular - campo claro (OLADIMEJI<sup>(49)</sup>).

A região da Figura 99, marcada com um retângulo, delimita aproximadamente o limite superior da área de aplicação do método superdeterminístico de Dally. Esta área foi digitalizada com resolução de 400 dpi, para ser processada pelo sistema FOTOEL. Na Figura 100, mostra-se a região interna ao retângulo e digitalizada com uma resolução de 400 dpi.

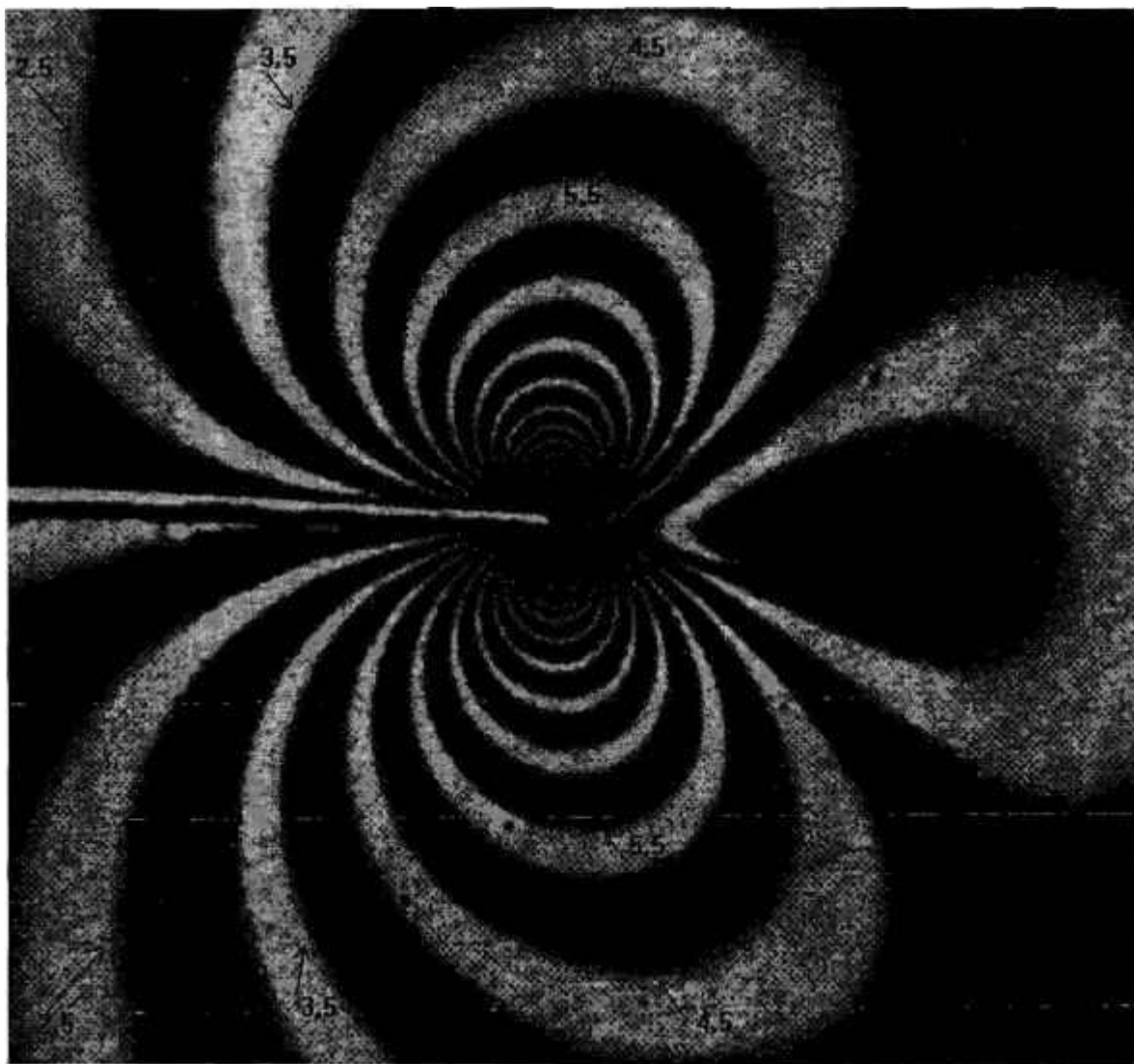


Figura 100 - Digitalização da região *próxima* da ponta da trinca, com base na Figura 99.

O cálculo de  $K_I$ , no artigo citado, é feito com base em franjas de ordens fracionárias (3,5 , 4,5 , 5,5 , etc.). Entretanto, esta imagem pode ser transformada, utilizando-se FOTOFRAN, numa imagem isocromática de franjas de ordens inteiras, como ilustrado na Figura 101. Esta imagem foi obtida aplicando-se as operações de *Mediana*, *Multiplicação*

pele fator 2 e aplicação da operação *Negativo* sobre a imagem da Figura 100. As anotações de ordem de franjas foram feitas com base no artigo de OLADIMEJI<sup>(49)</sup>.

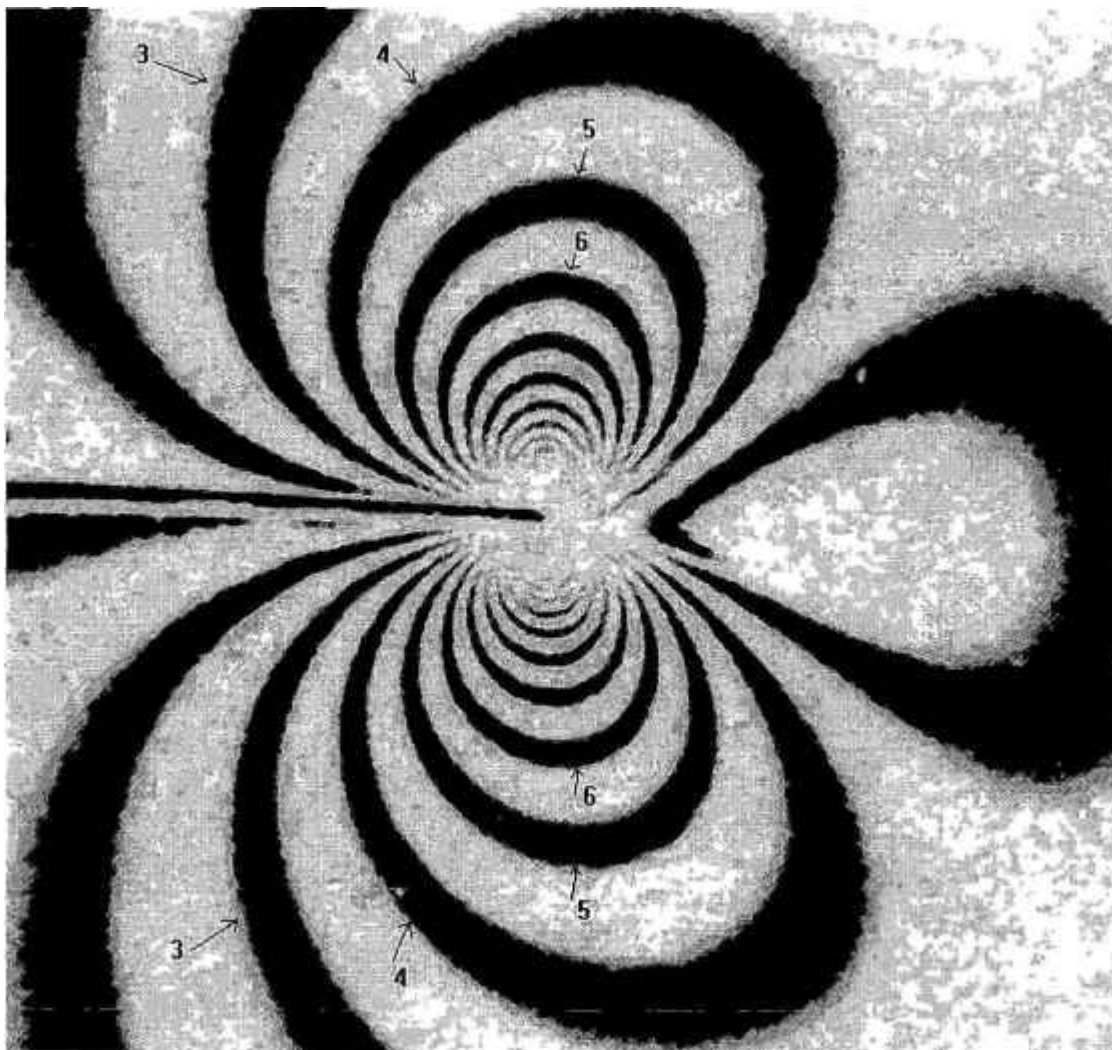


Figura 101 - Isocromática, com franjas de ordem inteira, obtida com a aplicação de operações de PID sobre a imagem da Figura 100.

### 7.3 Equipamentos e materiais da PUC/RIO

Foram utilizados dois polariscópios de transmissão para realização dos experimentos fotoelásticos na PUC/RIO, os quais são ilustrados nas Figuras 102 e 103.

Para efeito de geração das imagens isocromáticas, foi utilizado um modelo em polycarbonato, isento de franjas isocromáticas iniciais, já estudado na PUC/RIO, o qual foi objeto de trabalho realizado nesta Instituição<sup>(58)</sup>. O modelo possui uma trinca, usinada com fresa especial sob refrigeração. Na Figura 104, mostra-se o esquema do modelo em



questão, ilustrando-se a direção de aplicação do carregamento, o qual se dá através dos furos nas extremidades do modelo. Nesta situação, o carregamento se dá num plano perpendicular ao plano médio da trinca. Na Figura 105, são mostrados detalhes da região da trinca no modelo birrefringente. No Quadro 5, são relacionadas as propriedades geométricas e os dados do material fotoelástico.

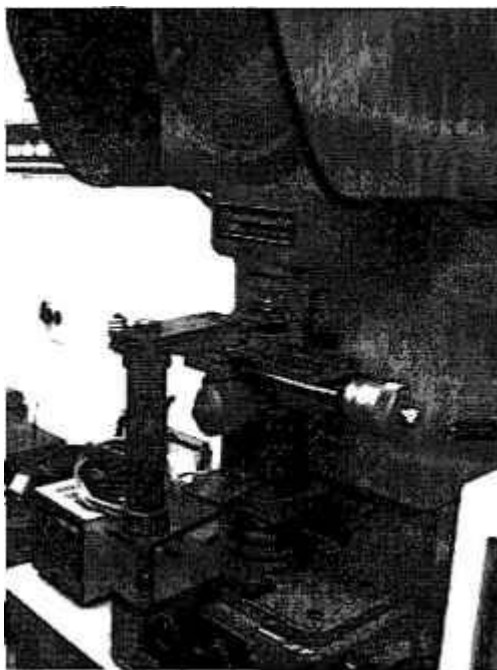


Figura 102- Polariscópio de transmissão, adaptado num projetor de perfil, tendo fator de ampliação de 10 vezes (PUC/RIO).

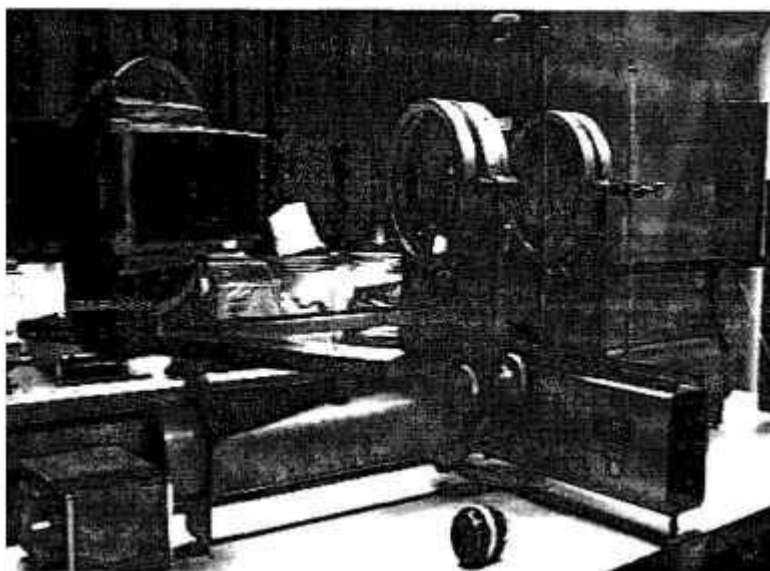


Figura 103 - Visão geral de um polariscópio de transmissão da PUC/RIO.

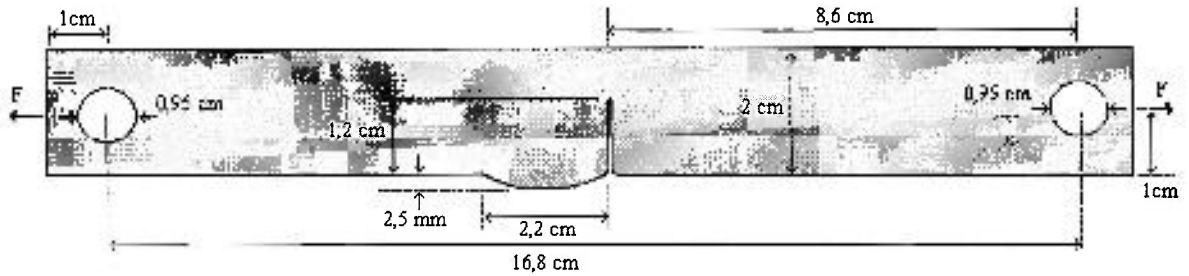


Figura 104 - Geometria e dimensões de modelo birrefringente.



Figura 105. Detalhes da trinca no modelo birrefringente.

Quadro 5 - Propriedades geométricas do modelo birrefringente.

$h = 0,60$ cm (espessura do modelo)
$a = 1,2$ cm (comprimento da trinca)
$e = 0,5$ mm (abertura da boca da trinca)
$\rho = 0,1$ ( raio de curvatura da ponta da trinca)
$f_{\sigma} = 7000$ N/m/franja (constante fotoelástica de tensão)
$\nu = 0,38$ ( coeficiente de Poisson)
$f_p = 34,5$ MPa ( limite de proporcionalidade)
$E = 2480$ MPa (módulo de elasticidade)

Na Figura 106, é mostrada a isocromática de ordem inteira, correspondente ao modelo da Figura 105, submetido a ensaio de tração, e observado através do polariscópio da Figura 102. O experimento foi realizado com luz branca, sendo, entretanto, utilizado um filtro monocromático. Na Figura 107, mostra-se a isocromática de ordem fracionária, obtida com o mesmo polariscópio da Figura 102, o qual tem um fator de ampliação igual a 10. O experimento foi monitorado com uma câmara de vídeo CCD, *Sony*, sendo as imagens

capturadas a partir da tela de um monitor de vídeo, com uma resolução de 75 dpi. De modo a ter-se controle do fator de ampliação da imagem, foi gerada uma imagem isocromática com a superposição de uma escala de largura igual a 1 cm. Esta isocromática é mostrada na Figura 108.

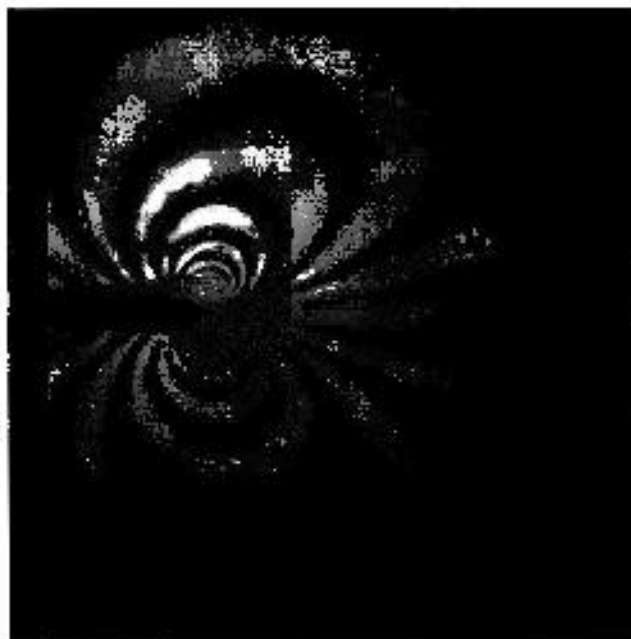


Figura 106 - Franjas isocromáticas de ordem inteira, para modelo birrefringente, com trinca pré-fabricada e analisadas sob o polariscópio da Figura 102.



Figura 107 - Franjas isocromáticas de ordem fracionária, para modelo birrefringente, com trinca pré-fabricada e analisadas sob o polariscópio da Figura 102.

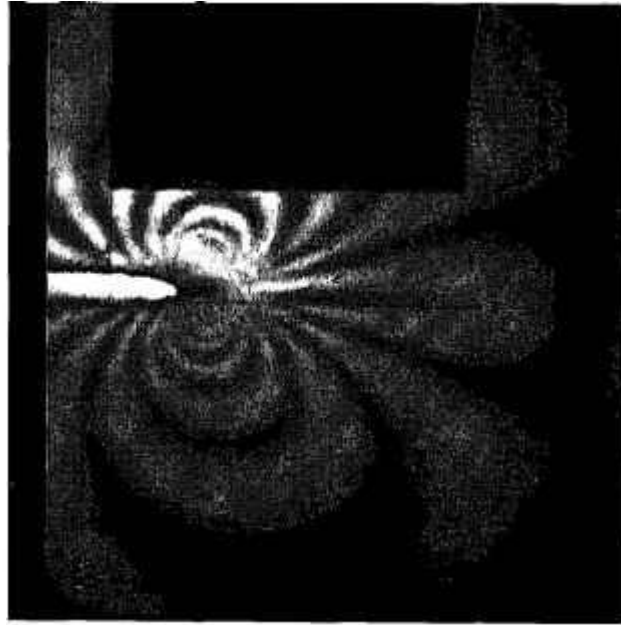


Figura 108 - Isocromática com escala (largura de 1 cm) superposta, para controle de dimensões.

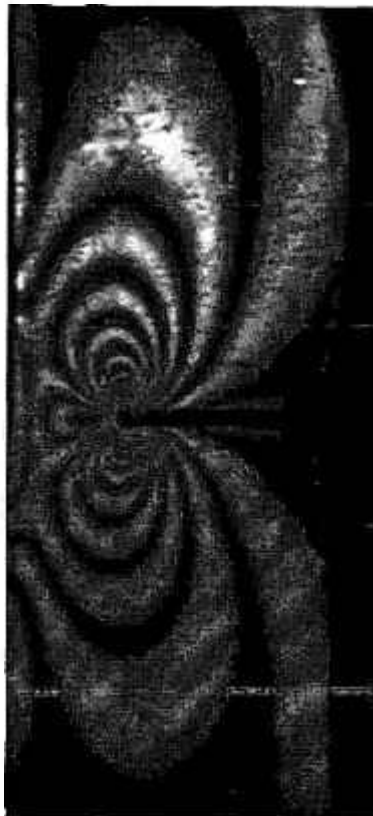


Figura 109 - Franjas isocromáticas de ordem inteira para modelo com trinca pré-fabricada e analisadas sob o polariscópio da Figura 103.

No Capítulo 8, são usadas as isocromáticas das Figuras 107 a 108 para obtenção do fator de intensidade de tensões  $K_I$  com base no método superdeterminístico de Dally. A isocromática da Figura 109 não foi utilizada, em virtude de não ter sido possível visualizar com clareza o local da ponta da trinca. Soma-se, ainda, a isto, o fato de que as franjas que se situam dentro da região em que o método de Dally se aplica não terem resolução espacial suficiente para extração adequada de dados geométricos das franjas.

#### 7.4 Equipamentos e materiais adquiridos pelo CDTN para o sistema FOTOEL

Dentro do processo de implementação do sistema FOTOEL, foram adquiridos, pelo CDTN, os seguintes equipamentos e materiais :

- microcomputador *Pentium* de 90 MHz, placa de vídeo para barramento PCI *Number 9*, modelo *9FX Motion 531*, monitor de vídeo *Samsung* - modelo *SyncMaster 3*, disco rígido de 1 Mega e *drive* de 1.44 polegadas;
- placa digitalizadora de vídeo DT 3152, barramento PCI, monocromática, de alta resolução, da *Data Translation*. É uma placa dedicada a aplicações científicas e industriais onde a precisão dos dados é fundamental. Permite a captura de imagem a partir de videocassete no modo de pausa. Possui *software* de gerenciamento e de captura de imagens provenientes da câmara de vídeo;
- câmara de vídeo CCD de alta resolução, da *Hitachi*, modelo KP-M1, tendo área sensora de 8,8 x 6,6 mm. É uma câmara de alta sensibilidade luminosa e de alta resolução.
- modelos planos de material birrefringente para experimentos por transmissão.
- placas polarizadoras e placas de quarto de onda (para confecção de um polariscópio).

Os novos equipamentos adquiridos para o sistema FOTOEL são ilustrados na Figura 110. Em apoio à pesquisa na área de fotoelasticidade, com vista a realização de experimentos na determinação de parâmetros da Mecânica de Fratura, foram adquiridos chapas birrefringentes para confecção de modelos planos e material para confecção de recobrimento fotoelástico, os quais são mostrados na Figura 111.

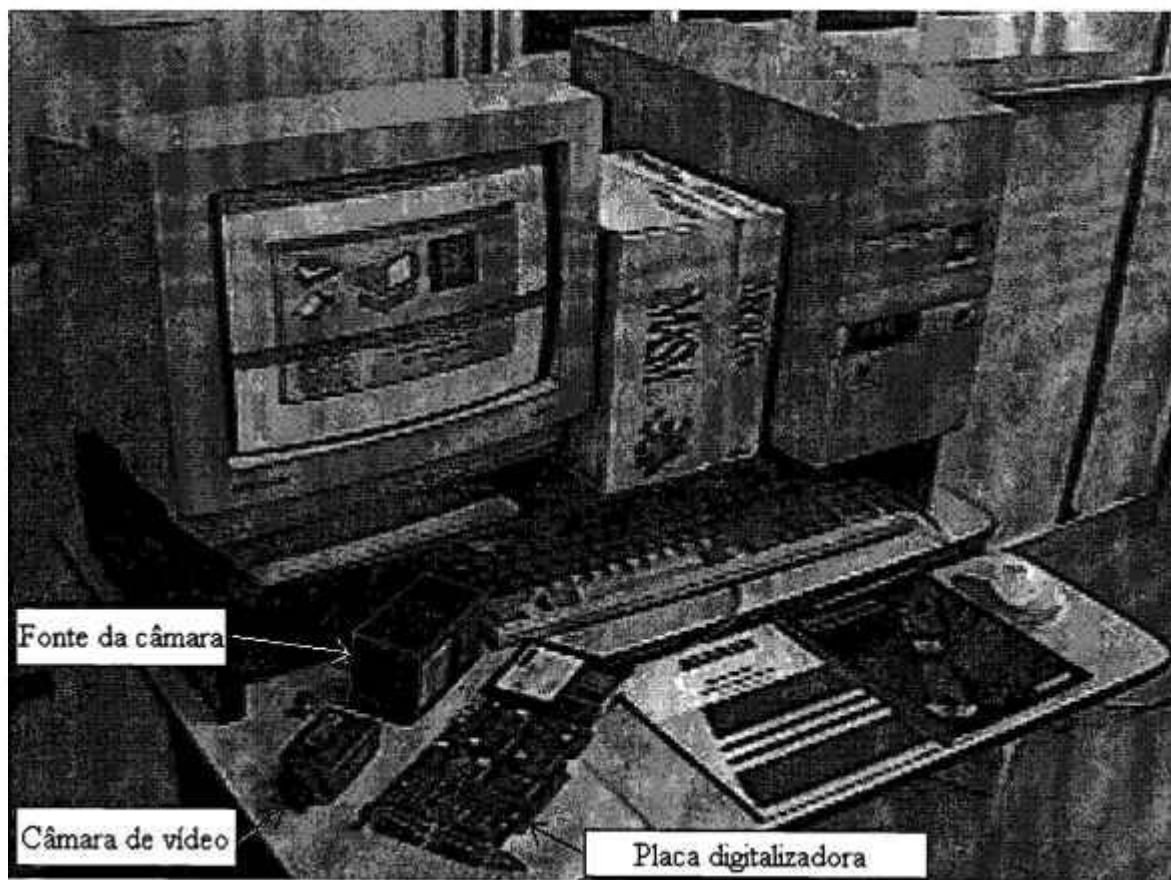


Figura 110 - Equipamentos adquiridos para o sistema FOTOEL

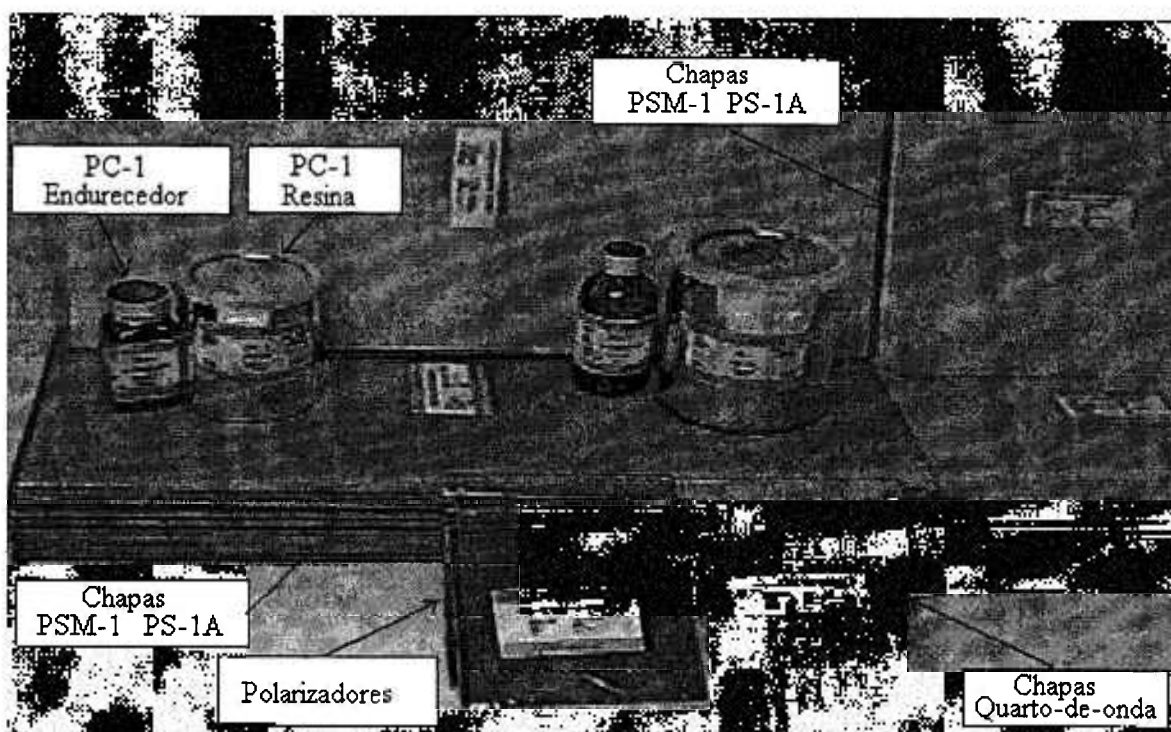


Figura 111 - Materiais fotoelásticos adquiridos em apoio ao sistema FOTOEL.

## 8 APLICAÇÃO DO SISTEMA FOTOEL A CASOS EXEMPLOS

### 8.1 Introdução

A aferição do cálculo de  $K_I$  por meio de processamento digital de imagens fotoelásticas depende de se ter uma imagem isocromática, na ponta de uma trinca, a partir de um experimento controlado, onde sejam conhecidas a espessura e a constante fotoelástica do material birrefringente. Uma outra alternativa é se ter uma imagem isocromática sintética gerada por computador. Neste Capítulo, são processadas algumas das imagens fotoelásticas, sintéticas ou geradas experimentalmente, e que foram mostradas no Capítulo 7.

### 8.2 Aplicação dos métodos de dois parâmetros

As franjas de ordem inteira, da isocromática da Figura 112, gerada com o *software* SIMFOT, encontram-se dentro da região em que é possível aplicar-se os métodos de Irwin e de Smith & Schroedl. Os dados, com que tal isocromática foi gerada, são mostrados na parte inferior da Figura 112. Como mostrado nesta Figura, a imagem isocromática que serviu de base para os cálculos foi gerada com  $K_I$  igual a  $0,5605 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ .

Na Figura 113, mostra-se o resultado das operações de PID em termos de extração das franjas de ordem inteira. Nesta Figura, é feita uma superposição das franjas obtidas por PID sobre a imagem original processada.

#### 8.2.1 Método de Irwin

Nos Quadros 6 e 7, são apresentados, respectivamente, os resultados de  $K_I$ , para as franjas com ângulos  $\theta$  positivos (franjas superiores) e para as franjas com ângulos  $\theta$  negativos (franjas inferiores). São mostrados, ainda, nestes quadros, os erros absolutos e

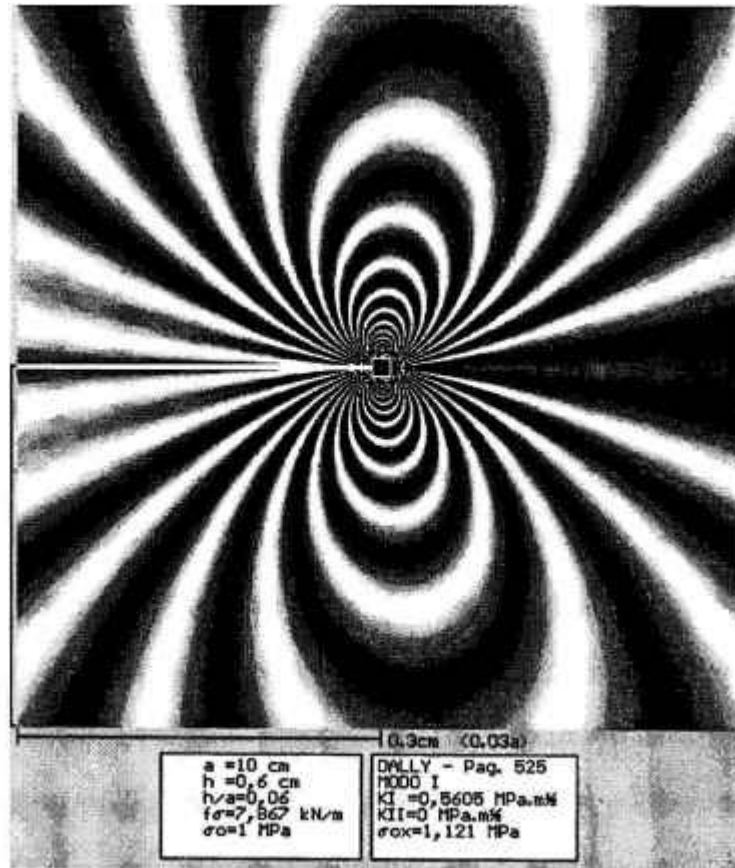


Figura 112 - Isocromática sintética, com franjas de ordem inteira, na região  *muito próxima* da ponta da trinca.

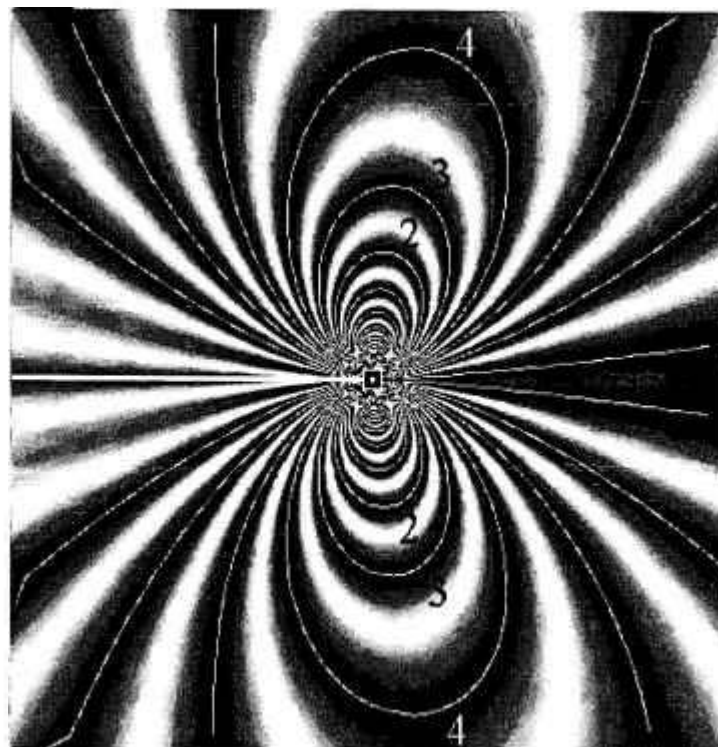


Figura 113 - Superposição de franjas afinadas sobre a isocromática da Figura 112.



os erros relativos ao valor de  $K_I$  com o qual a imagem foi gerada. Nas páginas 137 a 142 do Apêndice II, são listados os resultados condensados do processamento desta imagem, por FOTOFRAN, com o objetivo de se calcular o fator de intensidade de tensões.

Quadro 6 - Resultados de  $K_I$  pelo método de Irwin (franjas superiores).

N	$\theta$ (graus)	$r_{\max}$ (mm)	$r_{\max}/a$	$K_I$ (MPa.m <sup>1/2</sup> )	EA (MPa.m <sup>1/2</sup> )	ER (%)
4	81,7	2,685	0,027	0,581	0,02	3,7
5	81,8	1,568	0,016	0,556	-0,005	0,8
6	85,0	1,034	0,010	0,587	0,026	4,7
7	80,5	0,726	0,007	0,508	-0,053	9,4
8	82,1	0,542	0,005	0,528	-0,033	5,8

Observação : EA - Erro absoluto; ER - Erro relativo

Quadro 7 - Resultados de  $K_I$  pelo método de Irwin (franjas inferiores).

N	$\theta$ (graus)	$r_{\max}$ (mm)	$r_{\max}/a$	$K_I$ (MPa.m <sup>1/2</sup> )	EA (MPa.m <sup>1/2</sup> )	ER(%)
4	-82,3	2,681	0,027	0,591	0,03	5,4
5	-83,4	1,563	0,016	0,581	0,02	3,7
6	-81,6	1,026	0,010	0,537	-0,024	4,2
7	-84,1	0,720	0,007	0,560	-0,001	0,1
8	-83,7	0,541	0,005	0,550	-0,011	1,9

Observação : EA - Erro absoluto; ER - Erro relativo

Com base nos resultados dos Quadros 6 e 7, observa-se que os valores de  $K_I$  estão dentro dos valores esperados para a isocromática sintética analisada. Em princípio, os resultados das partes superior e inferior deveriam ser iguais. A diferença pode ser atribuída aos valores diferentes dos ângulos  $\theta$  para as partes superior e inferior. O método de Irwin usa dados de somente uma franja. Como se dispunha de várias franjas atendendo aos requisitos para utilização do método de Irwin, procedeu-se ao cálculo de  $K_I$  para todas elas. Observa-se, neste exemplo, a sensibilidade do método de Irwin ao valor do ângulo  $\theta$ .

### 8.2.1 Método de Smith & Schroedl

Nos Quadros 8 e 9 estão resumidos os resultados obtidos com aplicação do método de Smith & Schroedl à mesma isocromática da Figura 112.

Quadro 8 - Resultados do método de Smith referentes à faixa de ângulos positivos.

Valores de $K_I$ (Smith) considerados no cálculo final								
$N_j$	$r_j$ (mm)	$\theta_j$ (graus)	$r_j/a$	$N_i$	$r_i$ (mm)	$\theta_i$ (graus)	$r_i/a$	$K_I$
4	2,582	90,0	0,026	6	1,015	90,0	0,010	0,561
4	2,582	90,0	0,026	7	0,716	90,0	0,007	0,558
4	2,582	90,0	0,026	8	0,537	90,0	0,005	0,560
5	1,522	90,0	0,015	7	0,716	90,0	0,007	0,560
5	1,522	90,0	0,015	8	0,537	90,0	0,005	0,563
6	1,015	90,0	0,010	4	2,582	90,0	0,026	0,561
6	1,015	90,0	0,010	8	0,537	90,0	0,005	0,559
7	0,716	90,0	0,007	4	2,582	90,0	0,026	0,558
7	0,716	90,0	0,007	5	1,522	90,0	0,015	0,560
8	0,537	90,0	0,005	4	2,582	90,0	0,026	0,560
8	0,537	90,0	0,005	5	1,522	90,0	0,015	0,563
8	0,537	90,0	0,005	6	1,015	90,0	0,010	0,559

Valor final de  $K_I$  (MPa.m<sup>1/2</sup>) = 0,560

Quadro 9 - Resultados do método de Smith referentes à faixa de ângulos negativos.

Valores de $K_I$ (Smith) considerados no cálculo final								
$N_j$	$r_j$ (mm)	$\theta_j$ (graus)	$r_j/a$	$N_i$	$r_i$ (mm)	$\theta_i$ (graus)	$r_i/a$	$K_I$
4	2,582	-90,0	0,026	5	1,522	-90,0	0,015	0,552
4	2,582	-90,0	0,026	6	1,000	-90,0	0,010	0,550
4	2,582	-90,0	0,026	7	0,701	-90,0	0,007	0,545
4	2,582	-90,0	0,026	8	0,537	-90,0	0,005	0,560
5	1,522	-90,0	0,015	4	2,582	-90,0	0,026	0,552
5	1,522	-90,0	0,015	6	1,000	-90,0	0,010	0,548
5	1,522	-90,0	0,015	7	0,701	-90,0	0,007	0,542
5	1,522	-90,0	0,015	8	0,537	-90,0	0,005	0,563
6	1,000	-90,0	0,010	4	2,582	-90,0	0,026	0,550
6	1,000	-90,0	0,010	5	1,522	-90,0	0,015	0,548
6	1,000	-90,0	0,010	8	0,537	-90,0	0,005	0,571
7	0,701	-90,0	0,007	4	2,582	-90,0	0,026	0,545
7	0,701	-90,0	0,007	5	1,522	-90,0	0,015	0,542
8	0,537	-90,0	0,005	4	2,582	-90,0	0,026	0,560
8	0,537	-90,0	0,005	5	1,522	-90,0	0,015	0,563
8	0,537	-90,0	0,005	6	1,000	-90,0	0,010	0,571

Valor final de  $K_I$  (MPa.m<sup>1/2</sup>) = 0,554

No Quadro 10, são relacionados os valores de  $K_I$ , calculados pelo método de Smith, e os erros absolutos e erros relativos ao valor de  $K_I$  com o qual a isocromática foi gerada.

Quadro 10 - Valores finais de  $K_I$  e erros absolutos e relativos, pelo método de Smith.

Região	$K_I$ (MPa.m <sup>1/2</sup> )	EA (MPa.m <sup>1/2</sup> )	ER (%)
Ângulos positivos	0,560	-0,001	0,1
Ângulos negativos	0,554	-0,007	1,2
Observação : EA - Erro absoluto; ER - Erro relativo			

### 8.3 Aplicação do método de Dally - análise superdeterminística

#### 8.3.1 Considerações sobre amostragem de franjas e convergência do método

A utilização do método de Dally requer a amostragem de pontos sobre as franjas resultantes do afinamento da isocromática na região da ponta da trinca. Segundo o método apresentado por DALLY<sup>(8)</sup>, um número mínimo de pontos de amostragem das franjas seria 30, obtido com base na expressão  $5(m + n + 2)$ , onde “m” e “n”, iguais a 2, são os valores máximos dos índices dos somatórios indicados em (58) e (59).



Figura 114 - Isocromática na região próxima da ponta da trinca.

De modo a verificar o valor mínimo sugerido por DALLY<sup>(8)</sup>, a parte superior da franja de ordem 4,5, da isocromática da Figura 114, foi analisada pelo método superdeterminístico, obtendo-se as coordenadas x e y da franja pelas opções de amostragem por faixa angular e por pontos. Os resultados do cálculo são mostrados no gráfico da Figura 115. Observa-se que ao se aproximar do número 30, há uma convergência dos dois processos de amostragem para um mesmo valor.

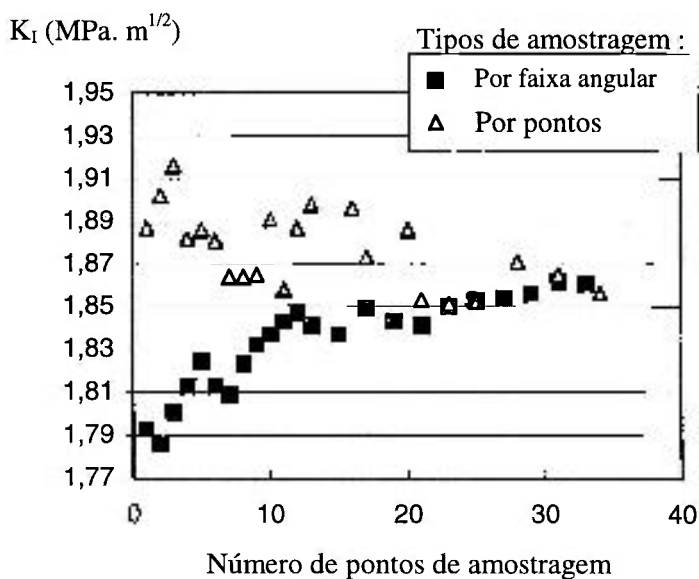


Figura 115 - Verificação do tipo de amostragem sobre o valor de  $K_I$ .

As várias franjas de ordens fracionárias, da isocromática da Figura 116, tendo a sua parte central marcadas com a cor branca, foram amostradas pelo processo de faixas angulares, procurando-se tomar um maior número de pontos das franjas mais próximas da ponta da trinca. Estes pontos selecionados foram, então, submetidos ao método superdeterminístico, de modo a verificar a influência do número total de pontos amostrados sobre o fator de intensidade de tensões  $K_I$  e sobre a tensão  $\sigma_{ox}$ .

Na Figura 117, é mostrada a convergência de  $K_I$ , à medida em que se aumenta o número total de pontos amostrados das franjas. Na Figura 118, é ilustrada a variação da tensão  $\sigma_{ox}$ , à medida em que se aumenta o número total de pontos citados.

Neste item, ilustra-se a convergência do método superdeterminístico, sem se preocupar para que valor o resultado está convergindo. No item seguinte, são comparados os

valores de  $K_I$  obtidos pelo método de DALLY, implementado em FOTOEL, com valores de  $K_I$  disponíveis na literatura ou com valores calculados por outros métodos numéricos.

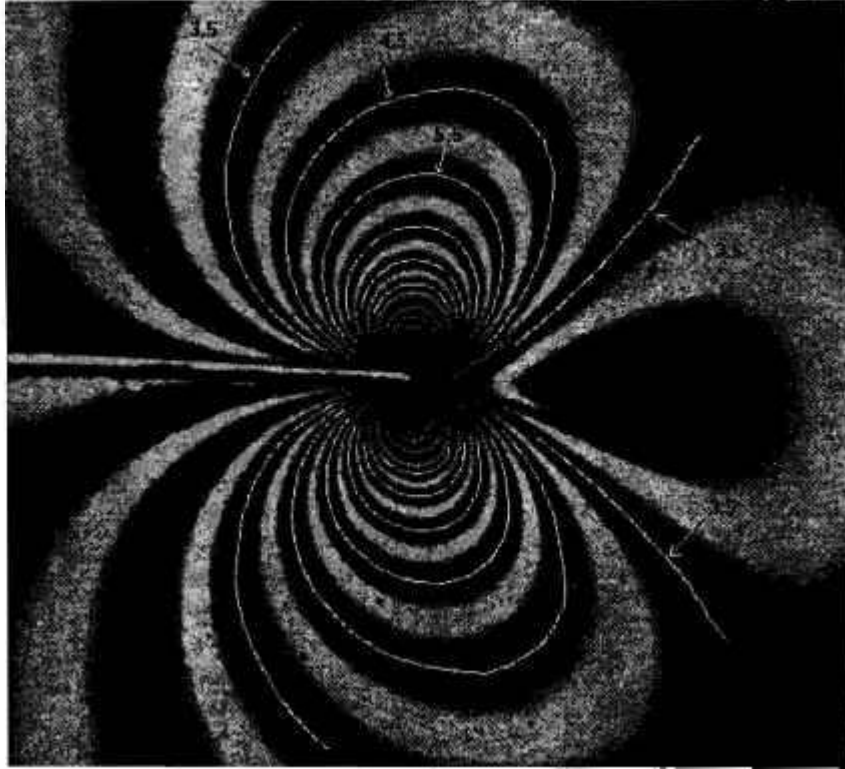


Figura 116 - Franjas isocromáticas de ordem fracionária, selecionadas para amostragem.

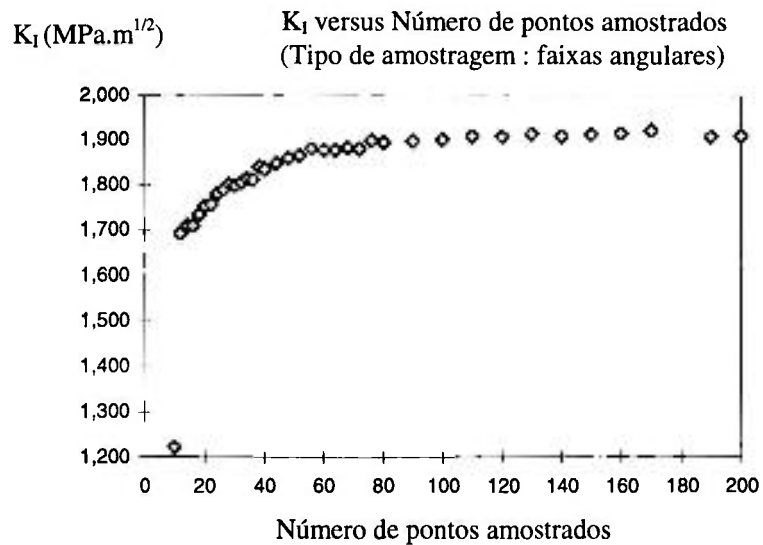


Figura 117 - Influência do número de pontos amostrados sobre o valor de  $K_I$ .

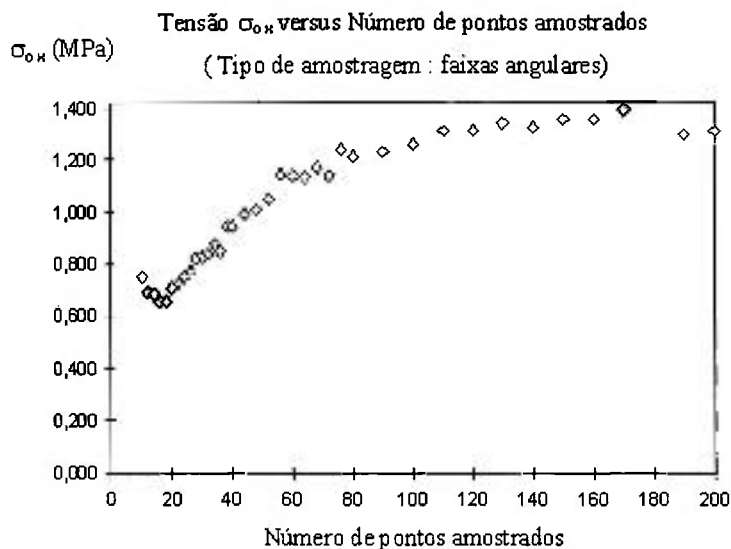


Figura 118 - Influência do número de pontos amostrados sobre a tensão  $\sigma_{0x}$ .

### 8.3.2 Aplicação à isocromática sintética gerada por computador (zona 2)

Neste item, é analisada a imagem isocromática da Figura 97, a qual inclui a zona 2 e foi gerada por computador. Conhece-se, neste caso, o valor de  $K_I$  e a tensão remota  $\sigma_{0x}$ . Na Figura 120, mostra-se a superposição de franjas afinadas finais sobre a imagem original da Figura 119. No Quadro 11, são apresentados os resultados do processamento pelo método superdeterminístico, em função do número de pontos de amostragem NA. São apresentados os resultados individuais e os resultados médios para  $K_I$  e  $\sigma_{0x}$ , considerando-se as sete amostragens realizadas. Em virtude de sistemas de referências diferentes, adotados em SIMFOT e em FOTOEL, a tensão remota  $\sigma_{0x}$  aparece com sinal trocado.

Quadro 11 - Resultados de  $K_I$  pelo método superdeterminístico para isocromática sintética.

NA	$K_I$ (MPa.m <sup>1/2</sup> )	$\sigma_{0x}$ (MPa)	EA $K_I$ (MPa.m <sup>1/2</sup> )	ER $K_I$ (%)
30	0,562	-1,159	0,002	0,3
60	0,562	-1,046	0,002	0,3
90	0,559	-1,149	0,002	0,3
120	0,558	-1,159	0,003	0,4
150	0,557	-1,162	0,004	0,6
180	0,558	-1,156	0,003	0,4
210	0,558	-1,158	0,003	0,4
Média	0,559	-1,141		
Desvio padrão de $K_I$ em (MPa.m <sup>1/2</sup> ) = 0,002				
Desvio padrão de $\sigma_{0x}$ em (MPa) = 0,039				

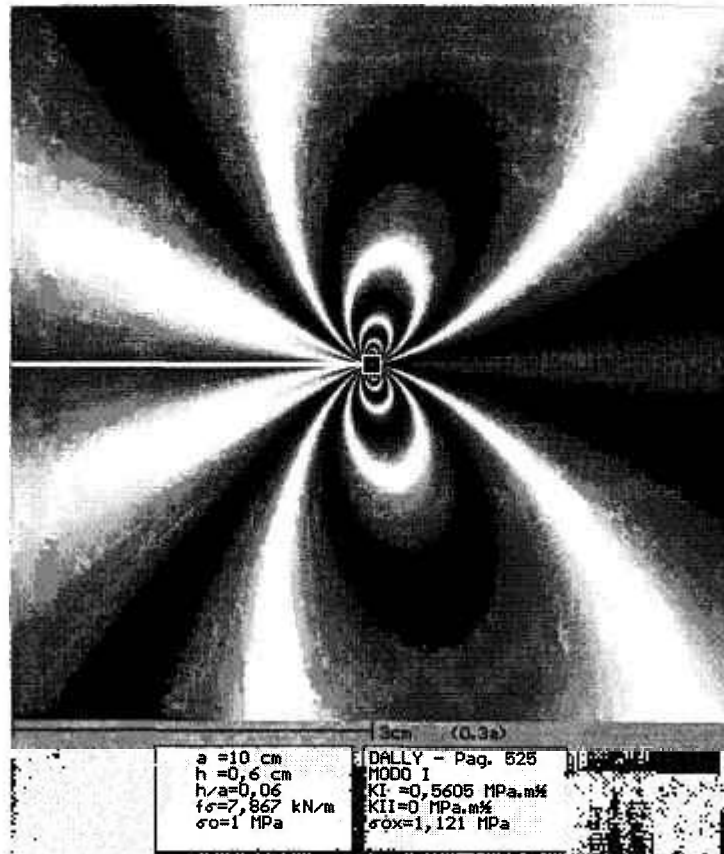


Figura 119 - Isocromática sintética na região *próxima* da ponta da trinca.

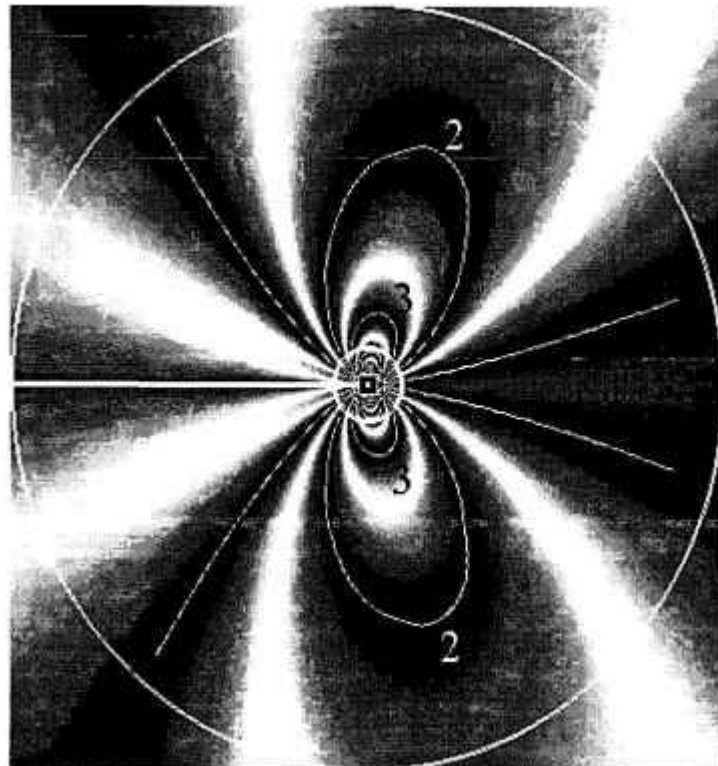


Figura 120 - Superposição de franjas afinadas sobre isocromática da Figura 119.

### 8.3.3 Aplicação à isocromática digitalizada, com *scanner*, a partir de um artigo de Oladimeji<sup>(49)</sup>.

No Capítulo anterior, foi apresentada uma imagem isocromática, com franjas de ordem fracionária em ponta de trinca, que consta do trabalho de OLADIMEJI<sup>(49)</sup>. Ela é interessante, uma vez que são apresentados todos os dados e resultados de obtenção de  $K_I$ , permitindo comparações com os resultados obtidos com o sistema FOTOEL. Desta imagem, foi selecionada a região em que o método de Dally pode ser aplicado, ou seja, uma região delimitada por círculo, centrado na ponta da trinca, e tendo um raio igual a 3% do valor da dimensão “a” da trinca. No item 8.3.3.1, é analisada a isocromática digitalizada com uma resolução de 400 dpi. No item 8.3.2.2, é analisada a imagem isocromática de ordem inteira obtida com base em operações de PID sobre a isocromática da Figura 116.

#### 8.3.3.1 Isocromática com franjas de ordem fracionária

Neste item, é analisada a isocromática apresentada na Figura 116. O processamento desta imagem com o sistema FOTOEL gerou os resultados apresentados no Quadro 12.

Quadro 12 - Resultados de obtenção de  $K_I$  pelo método superdeterminístico para isocromática, com franjas de ordem fracionária, e digitalizada com *scanner*.

NA	$K_I$ (MPa.m <sup>1/2</sup> )	$\sigma_{0x}$ (MPa)
30	1,837	0,894
42	1,822	0,824
60	1,812	0,757
72	1,799	0,718
90	1,806	0,741
102	1,808	0,758
120	1,792	0,652
132	1,791	0,635
150	1,792	0,646
Média	1,807	0,736
Desvio padrão de $K_I = 0,014$ MPa.m <sup>1/2</sup>		
Desvio padrão de $\sigma_{0x} = 0,081$ MPa		



No artigo de OLADIMEJI<sup>(49)</sup>, os seguintes valores são citados como resultados do cálculo de  $K_I$  por vários métodos utilizando a análise fotoelástica para a isocromática da Figura 116 :  $2,142 \text{ MPa.m}^{1/2}$  ,  $1,868 \text{ MPa.m}^{1/2}$  ,  $1,870 \text{ MPa.m}^{1/2}$  e  $1,825 \text{ MPa.m}^{1/2}$ .

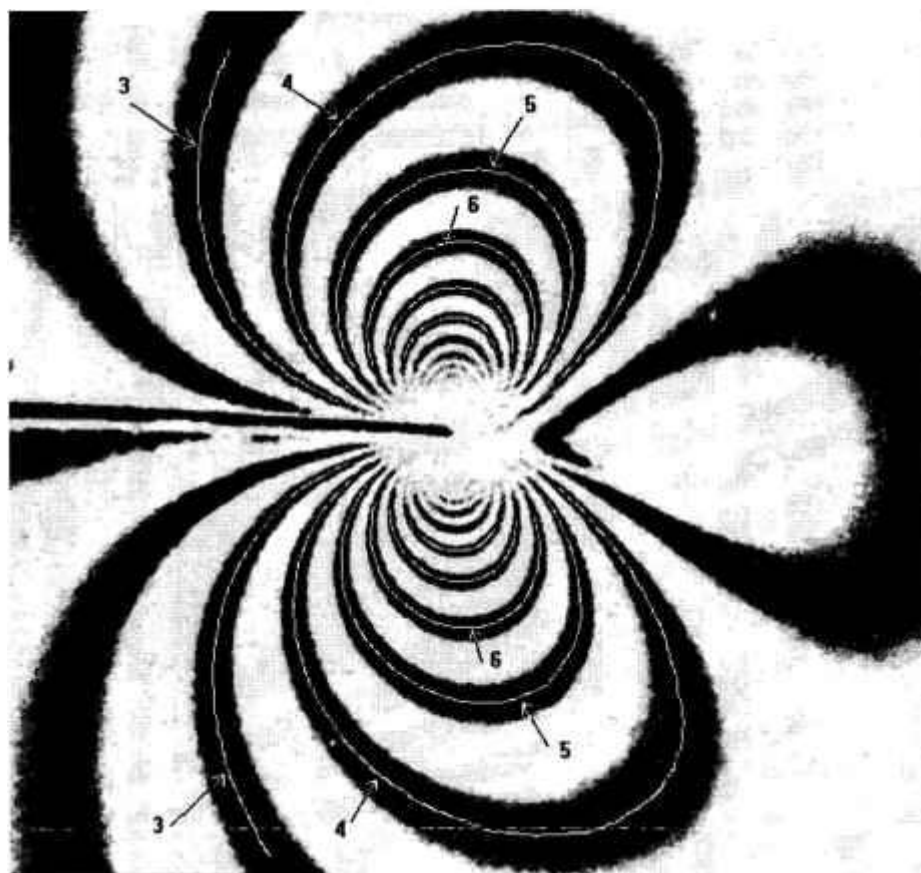


Figura 121 - Superposição de franjas inteiras afinadas sobre a isocromática original.

### 8.3.3.2 Isocromática de ordem inteira obtida a partir de operações de PID sobre isocromática de ordem fracionária.

Como resultado de operações de PID sobre a imagem original da Figura 116, obteve-se a imagem isocromática da Figura 121, que representa as franjas de ordem inteira que seriam obtidas num experimento fotoelástico com polariscópio em condições de campo escuro. Os resultados do processamento destas franjas com o sistema FOTOEL são mostrados no Quadro 13.

Quadro 13 - Resultados de  $K_I$  pelo método superdeterminístico para isocromática com franjas de ordem inteira, obtida por operações de PID.

NA	$K_I$ (MPa.m <sup>1/2</sup> )	$\sigma_{0x}$ (MPa)
30	1,841	1,121
42	1,811	0,915
60	1,807	0,901
72	1,798	0,872
90	1,792	0,843
102	1,799	0,864
120	1,783	0,764
132	1,783	0,759
150	1,784	0,761
Média	1,800	0,867
Desvio padrão de $K_I = 0,018$ MPa.m <sup>1/2</sup>		
Desvio padrão de $\sigma_{0x} = 0,107$ MPa		

### 8.3.4 Aplicação a isocromáticas obtidas experimentalmente na PUC/RIO

O problema encontrado no processamento das isocromáticas geradas na PUC foi a localização da ponta da trinca. A alternativa encontrada foi alterar-se, no arquivo de dados com terminação TEM, usado em FOTOVER, os valores, em *pixels*, das coordenadas  $x$  e  $y$  da ponta da trinca, até que os valor de  $K_I$ , encontrado pela análise de franjas de ordens inteiras se aproximasse do valor de  $K_I$  obtido pela análise das franjas de ordens fracionárias.

#### 8.3.4.1 Isocromática com franjas de ordem inteira

Na Figura 122, mostra-se o resultado das operações de afinamento de franjas de ordem inteira, para o cálculo de  $K_I$  e, no Quadro 14, os respectivos resultados.

#### 8.3.4.2 Isocromática com franjas de ordem fracionária

Na Figura 123, mostra-se o resultado das operações de afinamento de franjas de ordem fracionária e, no Quadro 15, os respectivos resultados. Observa-se que os valores de

$K_I$  obtidos pela análise dos dois tipos de franjas são compatíveis. Com base no trabalho desenvolvido por COSTA & FREIRE<sup>(58)</sup>, o valor estimado para  $K_I$ , com base em gráfico disponível, foi de  $0,78 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ .

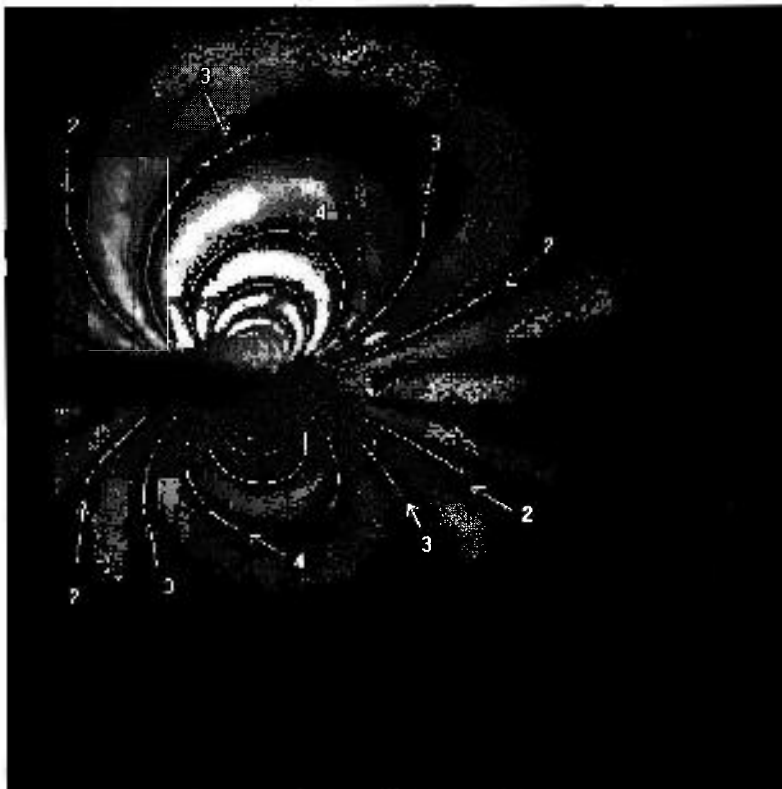


Figura 122 - Superposição de franjas inteiras afinadas sobre isocromática da Figura 106.

Quadro 14 - Resultados de  $K_I$ , pelo método superdeterminístico, para isocromática com franjas de ordem inteira, gerada experimentalmente.

NA	$K_I$ (MPa.m <sup>1/2</sup> )	$\sigma_{0x}$ (MPa)
49	0,845	1,296
96	0,846	1,271
111	0,847	1,294
127	0,845	1,280
142	0,845	1,269
157	0,845	1,263
171	0,845	1,266
Média	0,845	1,277
Desvio padrão de $K_I = 0,052 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$		
Desvio padrão de $\sigma_{0x} = 0,700 \text{ MPa}$		

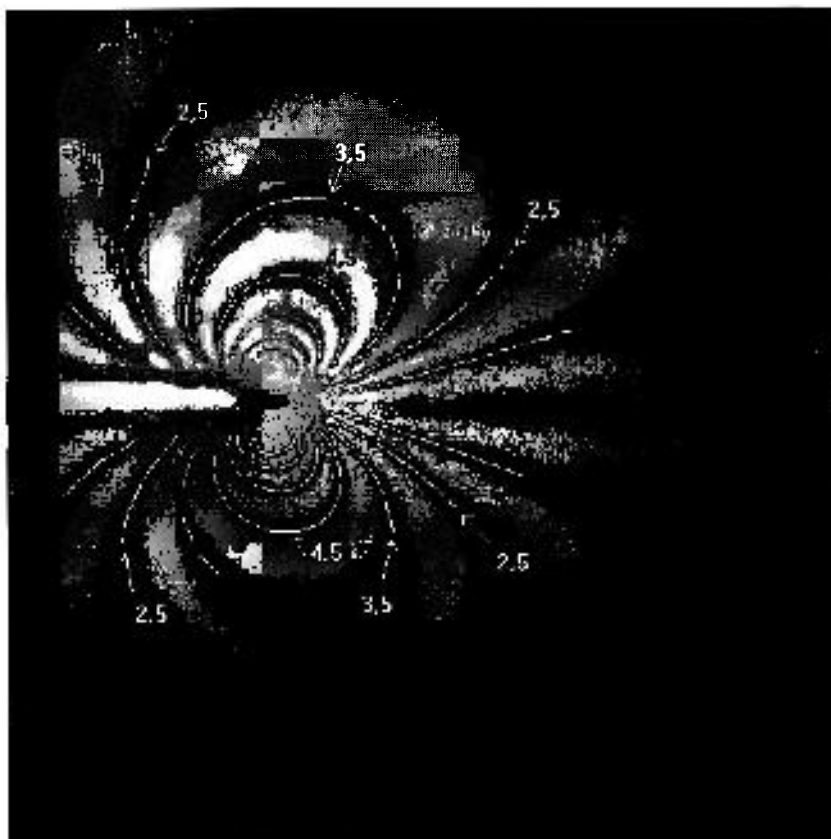


Figura 123 - Superposição de franjas afinadas sobre a isocromática da Figura 107.

Quadro 15 - Resultados de  $K_I$ , pelo método superdeterminístico, para isocromática com franjas de ordem fracionária, gerada experimentalmente.

NA	$K_I$ (MPa.m <sup>1/2</sup> )	$\sigma_{0x}$ (MPa)
29	0,827	1,142
38	0,833	1,223
47	0,833	1,221
57	0,829	1,168
64	0,832	1,225
74	0,833	1,208
83	0,831	1,185
92	0,831	1,202
100	0,832	1,192
108	0,831	1,185
126	0,831	1,195
Média	0,831	1,195
Desvio padrão de $K_I = 0,002$ MPa.m <sup>1/2</sup>		
Desvio padrão de $\sigma_{0x} = 0,024$ MPa		

## 9 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O sistema FOTOEL, para microcomputadores PC, desenvolvido neste trabalho, poderá trazer uma contribuição importante para a área de análise experimental de tensões, uma vez que, além de agilizar o processo de análise de imagens digitais, ele automatiza o processo de obtenção de parâmetros da Mecânica de Fratura com base em isocromáticas em ponta de trinca. A automação do processo de extração de franjas e cálculo automático de  $K_I$  e da tensão remota  $\sigma_{0x}$  aumentam a precisão e confiabilidade dos resultados, deixando para o pesquisador um tempo maior para dedicar-se à interpretação dos resultados.

Os algoritmos de PID, implementados para extração das franjas isocromáticas em níveis de cinza, apresentam bom desempenho, podendo tal fato ser comprovado ao se superpor as imagens resultantes da operação de afinamento sobre as franjas isocromáticas originais. A aplicação do sistema FOTOEL à franjas isocromáticas reais, geradas experimentalmente, mostrou que os filtros de média e mediana são operações necessárias antes do afinamento de franjas. Tais operações contribuem para a desconexão de franjas distintas na região da ponta da trinca, ação necessária no processo de rotulação das franjas.

As isocromáticas sintéticas se constituíram numa excelente ferramenta de apoio na aferição do sistema FOTOEL. Estas isocromáticas foram obtidas com o *software* SIMFOT, o qual foi adaptado para gerar isocromáticas na ponta de trincas, possibilitando a simulação de modos de carregamentos de trinca para valores conhecidos de fator de intensidade de tensões  $K_I$  e de tensão remota  $\sigma_{0x}$ .

Os valores de  $K_I$ , obtidos com o sistema FOTOEL, para franjas isocromáticas sintéticas, das quais já se sabia *a priori* o resultado de  $K_I$ , apresentaram erro relativo máximo de 9,4%, no caso do método de Irwin, de 0,1% no método de Smith & Schroedl para dados situados na região  *muito próxima* da ponta da trinca. No caso da região  *próxima* da ponta da trinca, o erro relativo máximo para  $K_I$ , pelo método superdeterminístico de 6 parâmetros de Dally, foi de 0,6%.

A aplicação do método superdeterminístico de Dally, para a franja de ordem 4,5 da imagem isocromática digitalizada a partir do artigo técnico de Oladimeji, mostrou que o método converge para o valor de  $K_I$ , a partir de aproximadamente 30 pontos amostrados, como sugerido por Dally, seja a amostragem por faixas angulares ou por pontos igualmente espaçados, escolhidos no arquivo-texto de coordenadas das franjas afinadas.

O resultado do cálculo de  $K_I$ , para as franjas de ordem inteira, da isocromática gerada experimentalmente na PUC/RIO, para um modelo birrefringente transparente, apresentou um erro relativo máximo de 8,3%, enquanto que para as de ordem fracionária o erro foi de 6,5%. O valor de  $K_I$  de referência, para efeito de cálculo destes erros, foi extraído de um ábaco de um trabalho anterior sobre este modelo. O erro maior, neste caso, pode estar associado com a constante fotoelástica de tensão  $f_\sigma$  adotada, e não determinada experimentalmente, ou ainda ser devido à pouca definição da imagem obtida no experimento, impossibilitando o uso de dados de algumas franjas. Entretanto, o erro, do ponto de vista de engenharia, é aceitável.

Em virtude de ser um sistema bem estruturado, do qual se tem conhecimento de todos os programas-fonte, FOTOEL permite, com facilidade, a incorporação de novas técnicas teóricas para cálculo de parâmetros da Mecânica de Fratura com base em isocromáticas em ponta de trinca. Além disto, o *software* relativo ao processamento de imagens digitais está pronto para ser usado por outras técnicas fotomecânicas baseadas na manipulação de dados de franjas de interferência.

Pretende-se dar continuidade a este trabalho, tendo-se como metas : quantificar, criteriosamente, os erros devidos ao processo de digitalização de imagens e de localização da ponta da trinca; incorporar métodos para cálculo do fator de intensidade de tensões para modos mistos de carregamentos de trincas; comparar os resultados experimentais com resultados de métodos analíticos; verificar a influência do processo de digitalização de franjas isocromáticas sobre os valores obtidos para  $K_I$ .

## APÊNDICE I - MÓDULO DE SIMULAÇÃO DO SOFTWARE FOTOFRAN

### I.1 Introdução

Como ilustrado na Figura 124, o sistema FOTOEL dispõe de um módulo de simulação de imagens fotoelásticas embutido em FOTOFRAN. Este módulo foi projetado usando a mesma interface deste *software* em virtude dele necessitar de algumas ferramentas já disponíveis no módulo de imagens. O módulo de simulação não é um pré-requisito necessário para cumprimento dos objetivos do sistema FOTOEL, que é a obtenção do fator  $K_I$  com base em imagens fotoelásticas na ponta de uma trinca. Entretanto, caso o usuário não tenha nenhum conhecimento de fotoelasticidade, ele poderá utilizar este módulo como uma ferramenta de aprendizado.

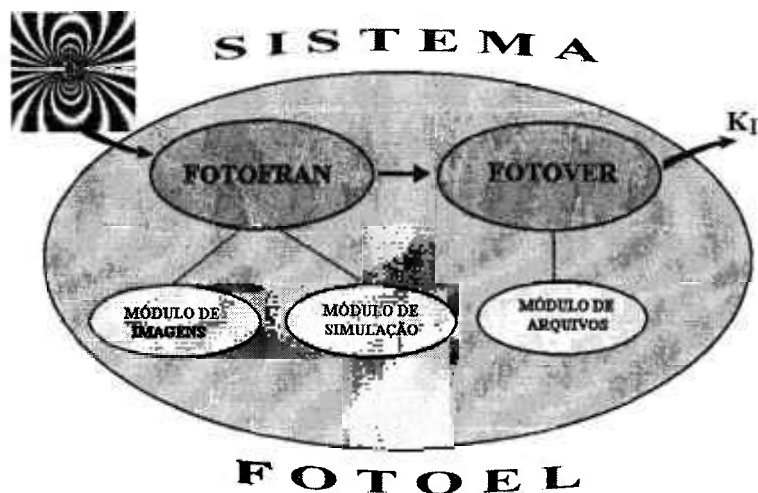


Figura 124 - Ilustração dos *softwares* que compõem o sistema FOTOEL.

O módulo de simulação utiliza como modelo básico um disco de material birrefringente submetido a duas cargas de compressão, aplicadas ao longo do diâmetro do disco. Este é um modelo clássico em fotoelasticidade, sendo inclusive utilizado na calibração de material fotoelástico (determinação da constante  $f_\sigma$ ). Para efeito de simulação, estão

implementadas as equações de campos de tensão referentes a estado plano de tensões, ou seja, a espessura do disco deve ser pequena quando comparada com o diâmetro do disco. As imagens fotoelásticas, geradas com o Módulo Simulação, simulam um experimento fotoelástico com a utilização de luz monocromática.

Na Figura 125, são mostrados os itens dos menus horizontal e vertical, utilizados na geração de imagens fotoelásticas para o disco em compressão.

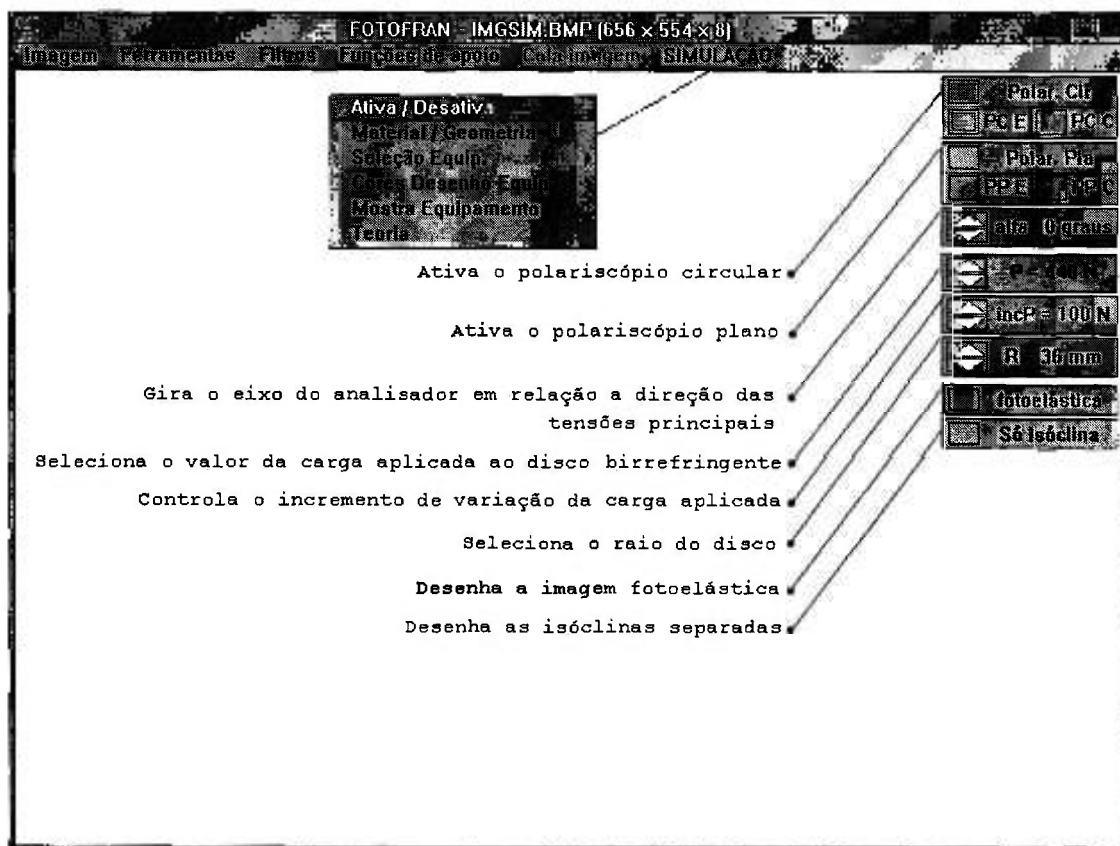


Figura 125 - Visão geral dos itens contidos nos menus horizontal e vertical do módulo de simulação do *software* FOTOFRAN.

Ao se entrar em FOTOFRAN, a ativação do módulo de simulação é feita a partir do sexto item do menu horizontal (**SIMULAÇÃO**) no subitem **Ativa/Desativa**. A função **Ativa** faz com que seja mostrado o menu vertical, mostrado no lado direito da Figura 124, a partir do qual pode-se, então, gerar as imagens fotoelásticas desejadas. No Quadro 16, é detalhada a função de cada subitem de **SIMULAÇÃO**. No Quadro 17, são detalhadas as funções dos itens do menu vertical usadas para simulação.



Quadro 16 - Itens do menu horizontal do Módulo de Simulação de FOTOFRAN .

SIMULAÇÃO	
<b>Ativa / Desativa</b>	ativa e desativa a opção de simulação de fotoelasticidade
<b>Material / Geometria</b>	permite a seleção de constante fotoelástica e dimensões do disco (espessura, raio)
<b>Seleção Equip.</b>	seleciona o arranjo das lentes do polariscópio
<b>Cores Desenho Equip.</b>	permite alterar a cor da janela mostrando as lentes do polariscópio
<b>Mostra equipamento</b>	mostra o desenho do arranjo das lentes do polariscópio numa janela separada.
<b>Teoria</b>	conceitos teóricos básicos de fotoelasticidade

Quadro 17 - Itens do menu vertical do Módulo de Simulação de FOTOFRAN

<b>Pol.Cir</b>	seleciona o polariscópio circular
<b>PC E</b>	polariscópio circular em condição de campo escuro
<b>PC C</b>	polariscópio circular em condição de campo claro
<b>Pol. Pla.</b>	seleciona polariscópio plano
<b>PP E</b>	polariscópio plano/campo escuro
<b>PP C</b>	polariscópio plano/campo claro
<b>alfa</b>	controla o giro do analisador em relação à direção das tensões principais, para efeito de geração de isóclinas.
<b>P</b>	seleciona o valor da carga aplicada no disco
<b>incP</b>	incremento do valor da carga aplicada no disco
<b>R</b>	seleciona o valor do raio do disco em milímetros
<b>fotoelástica</b>	gera a imagem fotoelástica determinada pelo arranjo de polariscópio escolhido
<b>só isóclina</b>	gera as isóclinas separadamente

## I.2 Exemplos de utilização do módulo de simulação de FOTOFRAN

Na Figura 126, é mostrada uma imagem fotoelástica para um disco em compressão, para a condição de polariscópio circular/campo escuro. Os dados de entrada para simulação são fornecidos a partir da ativação do subitem **Material/Geometria** do item **SIMULAÇÃO**, o qual, após ativação, abre uma janela de entrada de dados como ilustrado no canto esquerdo inferior da Figura 126. O arranjo das lentes do polariscópio pode ser visto através da ativação do subitem **Mostra Equipamento** do item **SIMULAÇÃO**. No lado direito inferior da Figura 126, é mostrada uma janela com o desenho do arranjo das lentes do polariscópio e o modelo em uso. Na Figura 127, ilustra-se a geração de imagens fotoelásticas para polariscópio em condições de campos claro e escuro e isóclinas isoladas.

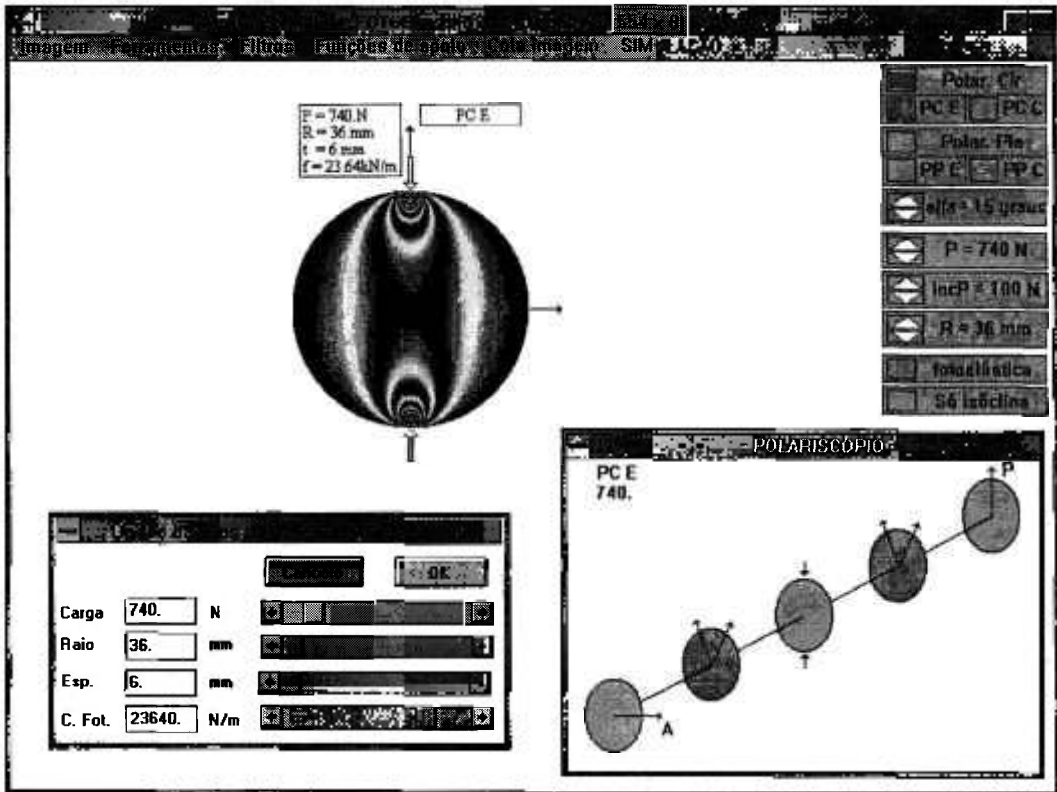


Figura 126 - Ilustração do módulo de simulação (arranjo do polariscópio, controle de carga e geração de isocromática).

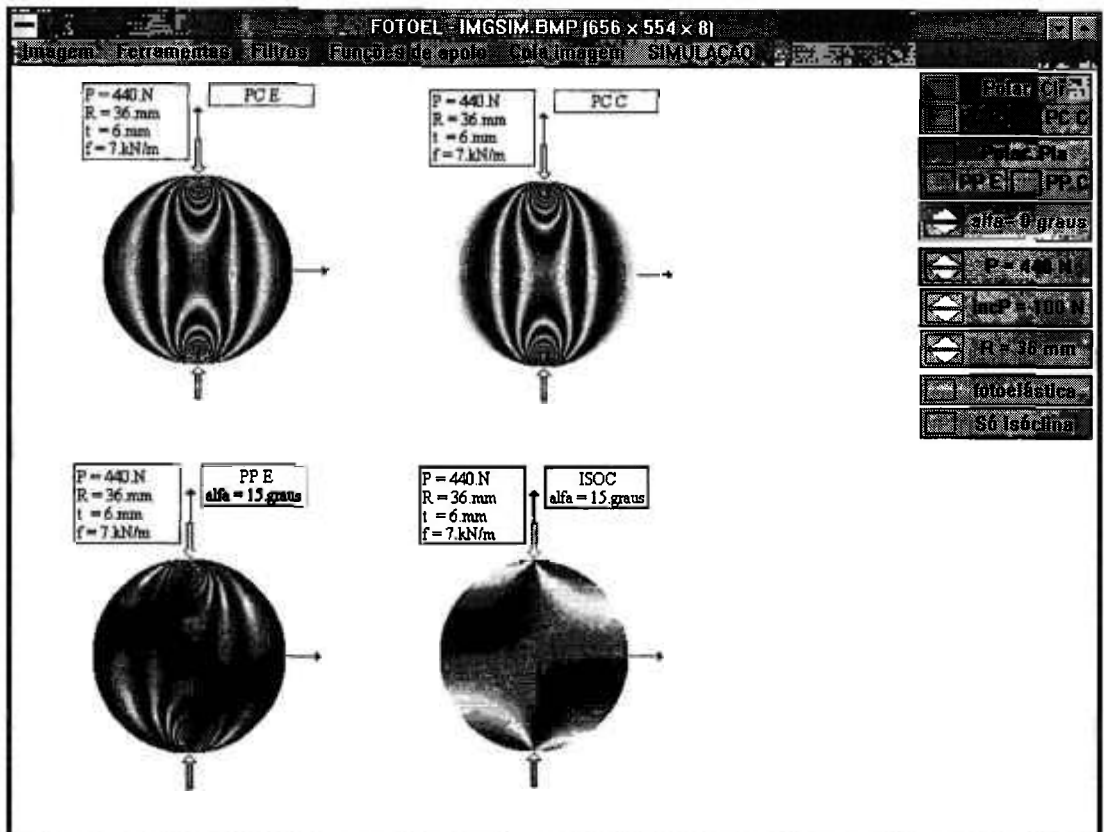


Figura 127 - Simulação de imagens fotoelásticas para várias condições do polariscópio.

O módulo de simulação de FOTOFRAN dispõe de um HELP de apoio na parte teórica de fotoelasticidade, o qual é ativado a partir do subitem **Teoria** do item **SIMULAÇÃO**. Na Figura 128, ilustra-se a utilização desta opção.

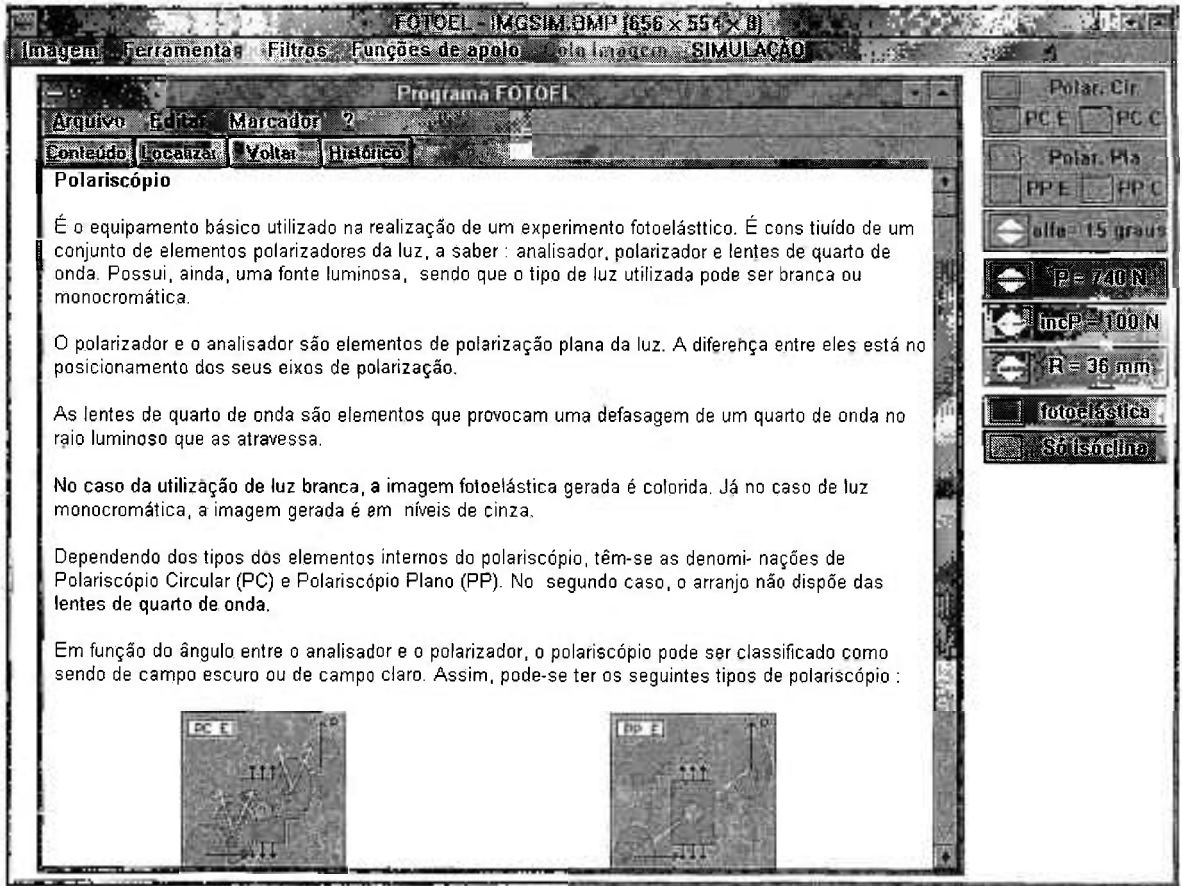


Figura 128 - Ilustração do menu de apoio na parte teórica de fotoelasticidade.

## APÊNDICE II- LISTAGEM DE RESULTADOS DE PROCESSAMENTO DE ISOCROMÁTICAS EM PONTA DE TRINCA COM O SISTEMA FOTOEL

### II.1 Processamento de isocromática sintética, na região *muito próxima* da ponta de de uma trinca - franjas de ordem inteira.

---

#### S I S T E M A F O T O T E L

SISTEMA DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS FOTOELÁSTICAS COM RECURSOS PARA CÁLCULO DO FATOR DE INTENSIDADE DE TENSÕES KI

F O T O F R A N  
MÓDULO DE IMAGENS E DE SIMULAÇÃO

---

NOME DESTE ARQUIVO -> [ ISO800.DAT ]

---

IMAGEM ANALISADA : ISO800.PCX

LOCALIZAÇÃO DA IMAGEM: C:\IMA\_TESE\FOTOTRIN\PERTO\ISO800.PCX

---

Coordenadas do retângulo referente à imagem original (em pixels)

(0 , 0) e (406 , 477)

Coordenadas do retângulo referente à área processada (em pixels)

(5 , 0) e (406 , 398)

Coordenadas da ponta da trinca -> (206 , 199)

Dimensão da trinca (a) em (pixels)= 100.00000 mm

Resolução da imagem = 640 pontos por polegada ( ppp, dpi )

Fator de ampliação = 2.659

Limiar usado (lim) = 58

Constante fotoelástica de tensão = 7867.000 N/m/franja

Espessura do material fotoelástico = 6.000 mm

Tipos de franjas : De ordem INTEIRA

Faixa de validade - métodos de Irwin e Smith

Relação raio/ dimensão da trinca :  $r/a < 0.03$

Limitação angular :  $73 < \text{teta (graus)} < 139$

Unidade de KI -> MPa.m<sup>1/2</sup>

---

Cálculo de KI - método de Irwin

Relação de raios máximos e ângulos de franjas rotuladas

Faixa angular POSITIVA

Ordem	x_fran	y_fran	rmax	rmax(mm)	ang(graus)
4	232	21	179.889	2.685	81.690
5	221	95	105.076	1.568	81.793
6	212	130	69.260	1.034	85.030
7	214	151	48.662	0.726	80.537
8	211	163	36.346	0.542	82.093

Ordem	ang	rmax(mm)	rmax/a	KI
4	81.690	2.685	0.027	0.581
5	81.793	1.568	0.016	0.556
6	85.030	1.034	0.010	0.587
7	80.537	0.726	0.007	0.508
8	82.093	0.542	0.005	0.528

Relação de raios máximos e ângulos de franjas rotuladas

Faixa angular NEGATIVA

Ordem	x_fran	y_fran	rmax	rmax(mm)	ang(graus)
4	230	377	179.611	2.681	-82.321
5	218	303	104.690	1.563	-83.418
6	216	267	68.731	1.026	-81.634
7	211	247	48.260	0.720	-84.053
8	210	235	36.222	0.541	-83.660

Ordem	ang	rmax(mm)	rmax/a	KI
4	-82.321	2.681	0.027	0.591
5	-83.418	1.563	0.016	0.581
6	-81.634	1.026	0.010	0.537
7	-84.053	0.720	0.007	0.560
8	-83.660	0.541	0.005	0.550

Cálculo de KI - método de Schroedl e Smith

Franjas interceptando RETA À 90 GRAUS / ponta da trinca

Faixa angular POSITIVA

Ordem	x_fran	y_fran	raio	raio(mm)	ang(graus)
4	206	26	173.000	2.582	90.000
5	206	97	102.000	1.522	90.000
6	206	131	68.000	1.015	90.000
7	206	151	48.000	0.716	90.000
8	206	163	36.000	0.537	90.000

Nj	rj(mm)	angj	rj/a	Ni	ri(mm)	angi	ri/a	KI
4	2.582	90.000	0.026	5	1.522	90.000	0.015	0.552
4	2.582	90.000	0.026	6	1.015	90.000	0.010	0.561
4	2.582	90.000	0.026	7	0.716	90.000	0.007	0.558
4	2.582	90.000	0.026	8	0.537	90.000	0.005	0.560
5	1.522	90.000	0.015	4	2.582	90.000	0.026	0.552
5	1.522	90.000	0.015	6	1.015	90.000	0.010	0.571
5	1.522	90.000	0.015	7	0.716	90.000	0.007	0.560
5	1.522	90.000	0.015	8	0.537	90.000	0.005	0.563
6	1.015	90.000	0.010	4	2.582	90.000	0.026	0.561
6	1.015	90.000	0.010	5	1.522	90.000	0.015	0.571
6	1.015	90.000	0.010	7	0.716	90.000	0.007	0.550
6	1.015	90.000	0.010	8	0.537	90.000	0.005	0.559
7	0.716	90.000	0.007	4	2.582	90.000	0.026	0.558
7	0.716	90.000	0.007	5	1.522	90.000	0.015	0.560
7	0.716	90.000	0.007	6	1.015	90.000	0.010	0.550
7	0.716	90.000	0.007	8	0.537	90.000	0.005	0.569
8	0.537	90.000	0.005	4	2.582	90.000	0.026	0.560
8	0.537	90.000	0.005	5	1.522	90.000	0.015	0.563
8	0.537	90.000	0.005	6	1.015	90.000	0.010	0.559
8	0.537	90.000	0.005	7	0.716	90.000	0.007	0.569

Número de valores de KI analisados = 20

Valor médio de KI = 0.560 MPa.m<sup>1/2</sup>

Desvio padrão de KI = 0.006 MPa.m<sup>1/2</sup>

Valores de KI (Smith) considerados no cálculo :

Nj	rj(mm)	angj	rj/a	Ni	ri(mm)	angi	ri/a	KI
4	2.582	90.000	0.026	6	1.015	90.000	0.010	0.561
4	2.582	90.000	0.026	7	0.716	90.000	0.007	0.558
4	2.582	90.000	0.026	8	0.537	90.000	0.005	0.560
5	1.522	90.000	0.015	7	0.716	90.000	0.007	0.560
5	1.522	90.000	0.015	8	0.537	90.000	0.005	0.563
6	1.015	90.000	0.010	4	2.582	90.000	0.026	0.561
6	1.015	90.000	0.010	8	0.537	90.000	0.005	0.559
7	0.716	90.000	0.007	4	2.582	90.000	0.026	0.558
7	0.716	90.000	0.007	5	1.522	90.000	0.015	0.560
8	0.537	90.000	0.005	4	2.582	90.000	0.026	0.560
8	0.537	90.000	0.005	5	1.522	90.000	0.015	0.563
8	0.537	90.000	0.005	6	1.015	90.000	0.010	0.559

Resultados referentes à faixa angular POSITIVA

Número de resultados de KI dentro da faixa = 12

Novo valor médio de KI = 0.560 MPa.m<sup>1/2</sup>

Franjas interceptando RETA À 90 GRAUS / ponta da trinca

Faixa angular NEGATIVA

Ordem	x_fran	y_fran	raio	raio(mm)	ang(graus)
4	206	372	173.000	2.582	-90.000
5	206	301	102.000	1.522	-90.000
6	206	266	67.000	1.000	-90.000
7	206	246	47.000	0.701	-90.000
8	206	235	36.000	0.537	-90.000

Nj	rj(mm)	angj	rj/a	Ni	ri(mm)	angi	ri/a	KI
4	2.582	-90.000	0.026	5	1.522	-90.000	0.015	0.552
4	2.582	-90.000	0.026	6	1.000	-90.000	0.010	0.550
4	2.582	-90.000	0.026	7	0.701	-90.000	0.007	0.545
4	2.582	-90.000	0.026	8	0.537	-90.000	0.005	0.560
5	1.522	-90.000	0.015	4	2.582	-90.000	0.026	0.552
5	1.522	-90.000	0.015	6	1.000	-90.000	0.010	0.548
5	1.522	-90.000	0.015	7	0.701	-90.000	0.007	0.542
5	1.522	-90.000	0.015	8	0.537	-90.000	0.005	0.563
6	1.000	-90.000	0.010	4	2.582	-90.000	0.026	0.550
6	1.000	-90.000	0.010	5	1.522	-90.000	0.015	0.548
6	1.000	-90.000	0.010	7	0.701	-90.000	0.007	0.536
6	1.000	-90.000	0.010	8	0.537	-90.000	0.005	0.571
7	0.701	-90.000	0.007	4	2.582	-90.000	0.026	0.545
7	0.701	-90.000	0.007	5	1.522	-90.000	0.015	0.542
7	0.701	-90.000	0.007	6	1.000	-90.000	0.010	0.536
7	0.701	-90.000	0.007	8	0.537	-90.000	0.005	0.610
8	0.537	-90.000	0.005	4	2.582	-90.000	0.026	0.560
8	0.537	-90.000	0.005	5	1.522	-90.000	0.015	0.563
8	0.537	-90.000	0.005	6	1.000	-90.000	0.010	0.571
8	0.537	-90.000	0.005	7	0.701	-90.000	0.007	0.610

Número de valores de KI analisados = 20

Valor médio de KI = 0.558 MPa.m<sup>1/2</sup>

Desvio padrão de KI = 0.020 MPa.m<sup>1/2</sup>

Valores de KI (Smith) considerados no cálculo

Nj	rj(mm)	angj	rj/a	Ni	ri(mm)	angi	ri/a	KI
4	2.582	-90.000	0.026	5	1.522	-90.000	0.015	0.552
4	2.582	-90.000	0.026	6	1.000	-90.000	0.010	0.550
4	2.582	-90.000	0.026	7	0.701	-90.000	0.007	0.545
4	2.582	-90.000	0.026	8	0.537	-90.000	0.005	0.560
5	1.522	-90.000	0.015	4	2.582	-90.000	0.026	0.552

5	1.522	-90.000	0.015	6	1.000	-90.000	0.010	0.548
5	1.522	-90.000	0.015	7	0.701	-90.000	0.007	0.542
5	1.522	-90.000	0.015	8	0.537	-90.000	0.005	0.563
6	1.000	-90.000	0.010	4	2.582	-90.000	0.026	0.550
6	1.000	-90.000	0.010	5	1.522	-90.000	0.015	0.548
6	1.000	-90.000	0.010	8	0.537	-90.000	0.005	0.571
7	0.701	-90.000	0.007	4	2.582	-90.000	0.026	0.545
7	0.701	-90.000	0.007	5	1.522	-90.000	0.015	0.542
8	0.537	-90.000	0.005	4	2.582	-90.000	0.026	0.560
8	0.537	-90.000	0.005	5	1.522	-90.000	0.015	0.563
8	0.537	-90.000	0.005	6	1.000	-90.000	0.010	0.571

Resultados referentes à faixa angular NEGATIVA

Número de resultados de KI dentro da faixa = 16

Novo valor médio de KI = 0.554 MPa.m<sup>1/2</sup>

## II.2 Processamento de isocromática sintética, na região *próxima* ponta de uma trinca - franjas de ordem inteira.

S I S T E M A F O T O T E L  
SISTEMA DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS FOTOELÁSTICAS COM  
RECURSOS PARA CÁLCULO DO FATOR DE INTENSIDADE DE TENSÕES KI  
F O T O F R A N  
M Ó D U L O D E I M A G E N S E D E S I M U L A Ç Ã O

NOME DESTA ARQUIVO -> [ FARISO2.DAT ]

IMAGEM ANALISADA : FARISO2.PCX

LOCALIZAÇÃO DA IMAGEM: C:\IMA\_TESE\FOTOTRIN\LONGE\FARISO2.PCX

Coordenadas do retângulo referente à imagem original (em pixels)

(0 , 0) e (409 , 475)

Coordenadas do retângulo referente à área processada (em pixels)

(0 , 0) e (409 , 404)

Coordenadas da ponta da trinca -> (206 , 202)

Dimensão da trinca (a) em (pixels)= 100.00000 mm

Resolução da imagem = 640 pontos por polegada ( ppp, dpi )

Fator de ampliação = 0.266

Limiar usado (lim) = 20

Constante fotoelástica de tensão = 7867.000 N/m/franja

Espessura do material fotoelástico = 6.000 mm

Tipos de franjas : De ordem INTEIRA

Relação de raios máximos e ângulos de franjas rotuladas - Faixa angular POSITIVA

Ordem	x_fran	y_fran	rmax	rmax(mm)	ang(graus)
1	87	61	184.505	27.538	130.163
2	239	76	130.250	19.440	75.323
3	212	164	38.471	5.742	81.027

Relação de raios máximos e ângulos de franjas rotuladas- Faixa angular NEGATIVA

Ordem	x_fran	y_fran	rmax	rmax(mm)	ang(graus)
1	87	343	184.505	27.538	-130.163
2	241	327	129.808	19.374	-74.358
3	215	239	38.079	5.683	-76.329

---



---

F O T O V E R  
M Ó D U L O D E A R Q U I V O S

---

Método superdeterminístico - Dally and Riley  
 Número de coeficientes usados = 6  
 Número mínimo de pontos de amostragem segundo Dally : 30 pontos  
 $KI = \text{raiz}(2 * \pi) * A0$   
 Resolução estabelecida para os coeficientes = 0.00000010  
 Número máximo previsto de iterações = 100  
 DADOS SOBRE A TRINCA :  
 Coordenadas da ponta da trinca em pixels -> (206 ,202)  
 Coordenadas da ponta da trinca em mm -> ( 30.7 , 30.1 )  
 Término da iteração em função da resolução estabelecida ( todas etapas)  
 AMOSTRAGEM : Por número de faixas angulares

---

Os dados das franjas amostradas em cada cálculo estão armazenados no arquivo FARISO2.DET

---

Número total de dados amostrados (NA)= 30  
 Número de iterações realizadas = 11  
 Término da iteração em função da resolução estabelecida

(Exemplo da primeira amostragem )

delta[A0] = 0.0000000114 (N/mm<sup>2</sup>).mm<sup>1/2</sup>  
 delta[A1] = -0.0000000150 (N/mm<sup>2</sup>).mm<sup>-1/2</sup>  
 delta[A2] = 0.0000000004 (N/mm<sup>2</sup>).mm<sup>-3/2</sup>  
 delta[B0] = 0.0000000012 (N/mm<sup>2</sup>)  
 delta[B1] = -0.0000000018 (N/mm<sup>2</sup>).mm<sup>-1</sup>  
 delta[B2] = 0.0000000000 (N/mm<sup>2</sup>).mm<sup>-2</sup>

[A0] = 7.0939292747 (N/mm<sup>2</sup>).mm<sup>1/2</sup>  
 [A1] = 0.0545133585 (N/mm<sup>2</sup>).mm<sup>-1/2</sup>  
 [A2] = 0.0007969120 (N/mm<sup>2</sup>).mm<sup>-3/2</sup>  
 [B0] = 0.5795459620 (N/mm<sup>2</sup>)  
 [B1] = -0.0017045012 (N/mm<sup>2</sup>).mm<sup>-1</sup>  
 [B2] = 0.0000695744 (N/mm<sup>2</sup>).mm<sup>-2</sup>

Fator KI	Coeficiente A0	Tensão remota S0x
0.562311 MPa.m <sup>1/2</sup>	0.224330 MPa.m <sup>1/2</sup>	-1.159092 MPa
0.511712 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.204144 Ksi.in <sup>1/2</sup>	-0.168106 Ksi
511.712059 psi.in <sup>1/2</sup>	204.143576 psi.in <sup>1/2</sup>	-0.000168 psi
17.781844 (N/mm <sup>2</sup> ).mm <sup>1/2</sup>	7.093929 (N/mm <sup>2</sup> ).mm <sup>1/2</sup>	-1.159092 (N/mm <sup>2</sup> )

---

Número total de dados amostrados (NA)= 60 Número de iterações realizadas = 11

Fator KI	Coeficiente A0	Tensão remota S0x
0.561997 MPa.m <sup>1/2</sup>	0.224204 MPa.m <sup>1/2</sup>	-1.045741 MPa
0.511426 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.204029 Ksi.in <sup>1/2</sup>	-0.151667 Ksi

---

Número total de dados amostrados (NA)= 90 Número de iterações realizadas = 10

Fator KI	Coeficiente A0	Tensão remota S0x
0.559059 MPa.m <sup>1/2</sup>	0.223032 MPa.m <sup>1/2</sup>	-1.148964 MPa
0.508752 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.202963 Ksi.in <sup>1/2</sup>	-0.166637 Ksi

---

Número total de dados amostrados (NA)= 120 Número de iterações realizadas = 8

Fator KI	Coeficiente A0	Tensão remota S0x
0.558446 MPa.m <sup>1/2</sup>	0.222788 MPa.m <sup>1/2</sup>	-1.159284 MPa
0.508195 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.202740 Ksi.in <sup>1/2</sup>	-0.168134 Ksi

---



Número total de dados amostrados (NA)= 150 Número de iterações realizadas = 7

Fator KI	Coefficiente A0	Tensão remota S0x
0.557450 MPa.m <sup>1/2</sup>	0.222390 MPa.m <sup>1/2</sup>	-1.162411 MPa
0.507288 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.202379 Ksi.in <sup>1/2</sup>	-0.168588 Ksi

Número total de dados amostrados (NA)= 180 Número de iterações realizadas = 8

Fator KI	Coefficiente A0	Tensão remota S0x
0.557514 MPa.m <sup>1/2</sup>	0.222416 MPa.m <sup>1/2</sup>	-1.156272 MPa
0.507347 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.202402 Ksi.in <sup>1/2</sup>	-0.167697 Ksi

Número total de dados amostrados (NA)= 210 Número de iterações realizadas = 8

Fator KI	Coefficiente A0	Tensão remota S0x
0.557618 MPa.m <sup>1/2</sup>	0.222457 MPa.m <sup>1/2</sup>	-1.157769 MPa
0.507441 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.202440 Ksi.in <sup>1/2</sup>	-0.167914 Ksi

----- TABELA FINAL -----

NA	KI	S0x	A0	A1	A2	B0	B1	B2
	(MPa.m <sup>1/2</sup> )	(MPa)	(MPa.m <sup>1/2</sup> )	(MPa.m <sup>-1/2</sup> )	(MPa.m <sup>-3/2</sup> )	(MPa)	(MPa.m <sup>-1</sup> )	(MPa.m <sup>-2</sup> )
30	0.562	-1.159	0.224	1.724	25.201	0.580	-1.705	69.574
60	0.562	-1.046	0.224	3.562	-110.932	0.523	15.045	-143.300
90	0.559	-1.149	0.223	1.150	9.927	0.574	-0.321	31.385
120	0.558	-1.159	0.223	1.313	16.623	0.580	-0.975	49.408
150	0.557	-1.162	0.222	1.058	16.485	0.581	-1.254	45.663
180	0.558	-1.156	0.222	1.125	11.054	0.578	-0.505	34.172
210	0.558	-1.158	0.222	1.005	11.215	0.579	-0.698	33.546
Média	0.559	-1.141	0.223	1.562	-2.918	0.571	1.370	17.207

Número de valores contabilizados = 7

Desvio padrão de KI em (MPa.m<sup>1/2</sup>) = 0.0019

Desvio padrão de S0x em (MPa)...= 0.0392

### II.3 Processamento de isocromática real, na região *próxima* da ponta de uma trinca (franjas de ordem fracionária obtida a partir de digitalização de resultado experimental de Oladimej )

---

S I S T E M A F O T O T E L  
SISTEMA DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS FOTOELÁSTICAS COM  
RECURSOS PARA CÁLCULO DO FATOR DE INTENSIDADE DE TENSÕES KI  
F O T O F R A N  
MÓDULO DE IMAGENS E DE SIMULAÇÃO

---

NOME DESTA ARQUIVO -> [ OLAFR400.DAT ]

---

IMAGEM ANALISADA : OLAFR400.PCX  
LOCALIZAÇÃO DA IMAGEM: C:\IMA\_TESE\OLAD\COEFIC\OLAFR400.PCX

---

Coordenadas do retângulo referente à imagem original (em pixels)  
(0 , 0) e (591 , 549)

Coordenadas do retângulo referente à área processada (em pixels)  
(0 , 0) e (591 , 549)

Coordenadas da ponta da trinca -> (283 , 267)

Dimensão da trinca (a) em (pixels)= 57.00000 mm

Resolução da imagem = 400 pontos por polegada ( ppp, dpi )

Fator de ampliação = 1.020

Limiar usado (lim) = 50

Constante fotoelástica de tensão = 7867.000 N/m/franja

Espessura do material fotoelástico = 6.350 mm

Tipos de franjas : de ordem FRACIONÁRIA

---

Relação de raios máximos e ângulos de franjas rotuladas  
Faixa angular POSITIVA

Ordem	x_fran	y_fran	rmax	rmax(mm)	ang(graus)
3.5	206	20	258.724	16.107	107.314
4.5	331	67	205.679	12.805	76.504
5.5	302	125	143.265	8.919	82.379
6.5	292	161	106.381	6.623	85.147
7.5	289	185	82.219	5.119	85.815
8.5	294	202	65.924	4.104	80.395

---

Relação de raios máximos e ângulos de franjas rotuladas  
Faixa angular NEGATIVA

Ordem	x_fran	y_fran	rmax	rmax(mm)	ang(graus)
3.5	216	523	264.622	16.474	-104.666
4.5	340	475	215.669	13.426	-74.675
5.5	307	413	147.959	9.211	-80.665
6.5	296	376	109.772	6.834	-83.198
7.5	297	351	85.159	5.302	-80.537
8.5	291	335	68.469	4.263	-83.290

---

F O T O V E R  
MÓDULO DE ARQUIVOS

---

Método superdeterminístico - Dally and Riley

Número de coeficientes usados = 6

Número mínimo de pontos de amostragem segundo Dally : 30 pontos

KI = raiz(2\*pi)\*A0

Resolução estabelecida para os coeficientes = 0.0000010

Número máximo previsto de iterações = 100

DADOS SOBRE A TRINCA :

Coordenadas da ponta da trinca em pixels -> (283 ,267)

Coordenadas da ponta da trinca em mm -> ( 17.6 , 16.6 )

Término da iteração em função da resolução estabelecida ( todas etapas)

AMOSTRAGEM : Por número de faixas angulares

(Exemplo da primeira amostragem)

Ordem Raio(mm) Ângulo (graus)

4.5	3.540	156.139
5.5	3.557	147.144
5.5	8.721	92.045
6.5	3.963	133.727
6.5	6.072	105.461
6.5	6.422	73.673
7.5	3.764	124.215
7.5	4.729	106.049
7.5	5.108	87.905
7.5	4.787	69.444
8.5	3.259	118.523
8.5	3.763	106.336
8.5	4.059	94.398
8.5	4.085	82.117
8.5	3.899	70.408
4.5	3.425	-152.969
5.5	3.402	-145.437
5.5	8.906	-91.602
6.5	3.350	-138.012
6.5	6.176	-104.596
6.5	6.705	-74.931
7.5	3.801	-121.607
7.5	4.747	-106.771
7.5	5.233	-87.954
7.5	5.006	-68.860
8.5	3.702	-109.654
8.5	3.944	-101.842
8.5	4.173	-91.710
8.5	4.217	-81.511
8.5	4.075	-71.288

Número total de dados amostrados (NA)= 30

Número de iterações realizadas = 13

Término da iteração em função da resolução estabelecida

delta[A0] = -0.0000000220 (N/mm<sup>2</sup>).mm<sup>1/2</sup>  
 delta[A1] = 0.0000000107 (N/mm<sup>2</sup>).mm<sup>-1/2</sup>  
 delta[A2] = -0.0000000002 (N/mm<sup>2</sup>).mm<sup>-3/2</sup>  
 delta[B0] = 0.0000000049 (N/mm<sup>2</sup>)  
 delta[B1] = 0.0000000010 (N/mm<sup>2</sup>).mm<sup>-1</sup>  
 delta[B2] = 0.0000000000 (N/mm<sup>2</sup>).mm<sup>-2</sup>

[A0] = 23.1713038065 (N/mm<sup>2</sup>).mm<sup>1/2</sup>  
 [A1] = -0.8730554427 (N/mm<sup>2</sup>).mm<sup>-1/2</sup>  
 [A2] = -0.0210933067 (N/mm<sup>2</sup>).mm<sup>-3/2</sup>  
 [B0] = -0.4471714673 (N/mm<sup>2</sup>)  
 [B1] = 0.0079540269 (N/mm<sup>2</sup>).mm<sup>-1</sup>  
 [B2] = -0.0026708266 (N/mm<sup>2</sup>).mm<sup>-2</sup>

Fator KI	Coeficiente A0	Tensão remota S0x
1.836709 MPa.m <sup>1/2</sup>	0.732741 MPa.m <sup>1/2</sup>	0.894343 MPa
1.671434 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.666806 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.129709 Ksi
1671.434140 psi.in <sup>1/2</sup>	666.805747 psi.in <sup>1/2</sup>	0.000130 psi
58.081845 (N/mm <sup>2</sup> ).mm <sup>1/2</sup>	23.171304 (N/mm <sup>2</sup> ).mm <sup>1/2</sup>	0.894343 (N/mm <sup>2</sup> )

Número total de dados amostrados (NA)= 42 Número de iterações realizadas = 15

Fator KI	Coefficiente A0	Tensão remota S0x
1.821618 MPa.m <sup>1/2</sup>	0.726720 MPa.m <sup>1/2</sup>	0.824125 MPa
1.657700 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.661327 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.119525 Ksi

Número total de dados amostrados (NA)= 60 Número de iterações realizadas = 11

Fator KI	Coefficiente A0	Tensão remota S0x
1.812212 MPa.m <sup>1/2</sup>	0.722968 MPa.m <sup>1/2</sup>	0.756911 MPa
1.649141 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.657912 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.109777 Ksi

Número total de dados amostrados (NA)= 72 Número de iterações realizadas = 12

Fator KI	Coefficiente A0	Tensão remota S0x
1.799452 MPa.m <sup>1/2</sup>	0.717878 MPa.m <sup>1/2</sup>	0.717701 MPa
1.637530 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.653280 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.104090 Ksi

Número total de dados amostrados (NA)= 90 Número de iterações realizadas = 12

Fator KI	Coefficiente A0	Tensão remota S0x
1.805904 MPa.m <sup>1/2</sup>	0.720452 MPa.m <sup>1/2</sup>	0.740834 MPa
1.643401 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.655622 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.107445 Ksi

Número total de dados amostrados (NA)= 102

Número de iterações realizadas = 12

Fator KI	Coefficiente A0	Tensão remota S0x
1.807859 MPa.m <sup>1/2</sup>	0.721231 MPa.m <sup>1/2</sup>	0.758212 MPa
1.645180 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.656332 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.109965 Ksi

Número total de dados amostrados (NA)= 120 Número de iterações realizadas = 12

Fator KI	Coefficiente A0	Tensão remota S0x
1.792133 MPa.m <sup>1/2</sup>	0.714958 MPa.m <sup>1/2</sup>	0.652260 MPa
1.630869 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.650623 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.094599 Ksi

Número total de dados amostrados (NA)= 132 Número de iterações realizadas = 12

Fator KI	Coefficiente A0	Tensão remota S0x
1.791145 MPa.m <sup>1/2</sup>	0.714564 MPa.m <sup>1/2</sup>	0.635253 MPa
1.629970 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.650264 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.092132 Ksi

Número total de dados amostrados (NA)= 150 Número de iterações realizadas = 13

Fator KI	Coefficiente A0	Tensão remota S0x
1.791988 MPa.m <sup>1/2</sup>	0.714900 MPa.m <sup>1/2</sup>	0.646159 MPa
1.630738 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.650570 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.093714 Ksi

----- TABELA FINAL -----

NA	KI	S0x	A0	A1	A2	B0	B1	B2
	(MPa.m <sup>1/2</sup> )	(MPa)	(MPa.m <sup>1/2</sup> )	(MPa.m <sup>-1/2</sup> )	(MPa.m <sup>-3/2</sup> )	(MPa)	(MPa)	(MPa.m <sup>-2</sup> )

30	1.837	0.894	0.733	-27.608	-667.029	-0.447	7.954	-2670.827
42	1.822	0.824	0.727	-23.825	-565.199	-0.412	10.412	-1895.387
60	1.812	0.757	0.723	-22.586	-753.672	-0.378	20.967	-2624.669
72	1.799	0.718	0.718	-20.194	-703.290	-0.359	25.942	-2089.646
90	1.806	0.741	0.720	-20.107	-523.553	-0.370	16.334	-1328.791
102	1.808	0.758	0.721	-20.845	-543.170	-0.379	16.340	-1461.843
120	1.792	0.652	0.715	-18.446	-736.541	-0.326	29.389	-1985.908
132	1.791	0.635	0.715	-18.301	-759.722	-0.318	30.670	-2038.376
150	1.792	0.646	0.715	-17.656	-564.780	-0.323	22.209	-1264.437

Média 1.807 0.736 0.721 -21.063 -646.328 -0.368 20.024 -1928.876

Número de valores contabilizados = 9

Desvio padrão de KI = 0.0144 MPa.m<sup>1/2</sup>

Desvio padrão de S0x = 0.0812 Mpa

## II.4 Processamento de isocromática real, na região *próxima* da ponta de uma trinca (Oladimej - franjas de inteira obtidas por aplicação de operações de PID na imagem relativa ao item II.3 )

---

S I S T E M A F O T O T E L  
SISTEMA DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS FOTOELÁSTICAS COM RECURSOS PARA  
CÁLCULO DO FATOR DE INTENSIDADE DE TENSÕES KI  
F O T O F R A N  
M Ó D U L O D E I M A G E N S E D E S I M U L A Ç Ã O

---

NOME DESTES ARQUIVO -> [ OLAIN400.DAT ]

---

IMAGEM ANALISADA : OLAIN400.PCX

LOCALIZAÇÃO DA IMAGEM: C:\IMA\_TESE\OLAD\ESCURO\OLAIN400.PCX

---

Coordenadas do retângulo referente à imagem original (em pixels)

(0 , 0) e (591 , 549)

Coordenadas do retângulo referente à área processada (em pixels)

(0 , 0) e (591 , 549)

Coordenadas da ponta da trinca -> (283 , 266)

Dimensão da trinca (a) em (pixels)= 57.00000 mm

Resolução da imagem = 400 pontos por polegada ( ppp, dpi )

Fator de ampliação = 1.020

Limiar usado (lim) = 50

Constante fotoelástica de tensão = 7867.000 N/m/franja

Espessura do material fotoelástico = 6.350 mm

Tipos de franjas : De ordem INTEIRA

---

Relação de raios máximos e ângulos de franjas rotuladas

Faixa angular POSITIVA

Ordem	x_fran	y_fran	rmax	rmax(mm)	ang(graus)
3	142	24	280.080	17.436	120.227
4	351	22	253.298	15.769	74.427
5	321	102	168.345	10.480	76.954
6	298	145	121.926	7.591	82.933
7	288	174	92.136	5.736	86.889
8	294	194	72.835	4.534	81.313

---

Relação de raios máximos e ângulos de franjas rotuladas

Faixa angular NEGATIVA

Ordem	x_fran	y_fran	rmax	rmax(mm)	ang(graus)
3	167	536	293.864	18.294	-113.250
4	359	522	267.043	16.625	-73.465
5	317	439	176.309	10.976	-78.881
6	303	391	126.590	7.881	-80.910
7	296	362	96.876	6.031	-82.288
8	294	342	76.792	4.781	-81.764

---



---

F O T O V E R  
MÓDULO DE ARQUIVOS

---

Método superdeterminístico - Dally and Riley  
 Número de coeficientes usados = 6  
 Número mínimo de pontos de amostragem segundo Dally : 30 pontos  
 $KI = \text{raiz}(2*\pi)*A0$   
 Resolução estabelecida para os coeficientes = 0.00000010  
 Número máximo previsto de iterações = 100  
 DADOS SOBRE A TRINCA :  
 Coordenadas da ponta da trinca em pixels -> (283 ,266)  
 Coordenadas da ponta da trinca em mm -> ( 17.6 , 16.6 )  
 Término da iteração em função da resolução estabelecida ( todas etapas)  
 AMOSTRAGEM : Por número de faixas angulares

---

(Exemplo da primeira amostragem )

RELAÇÃO DAS FRANJAS AMOSTRADAS E PROCESSADAS

Ordem	Raio(mm)	Ângulo (graus)
4	4.162	158.039
5	4.749	145.685
5	10.272	89.653
6	4.146	138.652
6	6.852	107.447
6	7.415	74.913
7	4.035	128.107
7	5.119	108.435
7	5.666	89.370
7	5.377	69.677
8	3.491	121.139
8	4.037	109.832
8	4.299	100.008
8	4.483	89.204
8	4.444	78.690
4	4.538	-153.083
5	4.335	-144.940
5	10.585	-91.011
6	4.270	-135.590
6	7.098	-105.255
6	7.732	-75.068
7	4.097	-126.347
7	5.422	-105.313
7	5.976	-90.000
7	5.788	-71.175
8	4.410	-103.055
8	4.534	-98.686
8	4.731	-90.000
8	4.729	-80.910
8	4.568	-72.553

Número total de dados amostrados (NA)= 30  
 Número de iterações realizadas = 12

( Exemplo do incremento na primeira amostragem )  
 $\text{delta}[A0] = -0.0000000228 \text{ (N/mm}^2\text{).mm}^{1/2}$   
 $\text{delta}[A1] = 0.0000000103 \text{ (N/mm}^2\text{).mm}^{-1/2}$   
 $\text{delta}[A2] = -0.0000000000 \text{ (N/mm}^2\text{).mm}^{-3/2}$   
 $\text{delta}[B0] = 0.0000000048 \text{ (N/mm}^2\text{)}$   
 $\text{delta}[B1] = 0.0000000007 \text{ (N/mm}^2\text{).mm}^{-1}$   
 $\text{delta}[B2] = 0.0000000000 \text{ (N/mm}^2\text{).mm}^{-2}$

[A0] = 23.2303851152 (N/mm<sup>2</sup>).mm<sup>1/2</sup>  
 [A1] = -0.8436772312 (N/mm<sup>2</sup>).mm<sup>-1/2</sup>  
 [A2] = -0.0150823130 (N/mm<sup>2</sup>).mm<sup>-3/2</sup>  
 [B0] = -0.5605337402 (N/mm<sup>2</sup>)  
 [B1] = 0.0103880393 (N/mm<sup>2</sup>).mm<sup>-1</sup>  
 [B2] = -0.0017177133 (N/mm<sup>2</sup>).mm<sup>-2</sup>

Fator KI	Coefficiente A0	Tensão remota S0x
1.841392 MPa.m <sup>1/2</sup>	0.734609 MPa.m <sup>1/2</sup>	1.121067 MPa
1.675696 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.668506 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.162591 Ksi
1675.695899 psi.in <sup>1/2</sup>	668.505943 psi.in <sup>1/2</sup>	0.000163 psi
58.229940 (N/mm <sup>2</sup> ).mm <sup>1/2</sup>	23.230385 (N/mm <sup>2</sup> ).mm <sup>1/2</sup>	1.121067 (N/mm <sup>2</sup> )

Número total de dados amostrados (NA)= 42 Número de iterações realizadas = 13

Fator KI	Coefficiente A0	Tensão remota S0x
1.811117 MPa.m <sup>1/2</sup>	0.722531 MPa.m <sup>1/2</sup>	0.915113 MPa
1.648144 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.657515 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.132721 Ksi

Número total de dados amostrados (NA)= 60 Número de iterações realizadas = 11

Fator KI	Coefficiente A0	Tensão remota S0x
1.806732 MPa.m <sup>1/2</sup>	0.720782 MPa.m <sup>1/2</sup>	0.901014 MPa
1.644154 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.655923 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.130676 Ksi

Número total de dados amostrados (NA)= 72 Número de iterações realizadas = 12

Fator KI	Coefficiente A0	Tensão remota S0x
1.798157 MPa.m <sup>1/2</sup>	0.717361 MPa.m <sup>1/2</sup>	0.871871 MPa
1.636351 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.652810 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.126450 Ksi

Número total de dados amostrados (NA)= 90 Número de iterações realizadas = 10

Fator KI	Coefficiente A0	Tensão remota S0x
1.791789 MPa.m <sup>1/2</sup>	0.714820 MPa.m <sup>1/2</sup>	0.843283 MPa
1.630556 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.650498 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.122304 Ksi

Número total de dados amostrados (NA)= 102 Número de iterações realizadas = 11

Fator KI	Coefficiente A0	Tensão remota S0x
1.798956 MPa.m <sup>1/2</sup>	0.717680 MPa.m <sup>1/2</sup>	0.863806 MPa
1.637078 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.653100 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.125280 Ksi

Número total de dados amostrados (NA)= 120 Número de iterações realizadas = 18

Fator KI	Coefficiente A0	Tensão remota S0x
1.782820 MPa.m <sup>1/2</sup>	0.711242 MPa.m <sup>1/2</sup>	0.763536 MPa
1.622394 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.647242 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.110738 Ksi

Número total de dados amostrados (NA)= 132 Número de iterações realizadas = 17

Fator KI	Coefficiente A0	Tensão remota S0x
1.782544 MPa.m <sup>1/2</sup>	0.711132 MPa.m <sup>1/2</sup>	0.758834 MPa
1.622143 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.647141 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.110056 Ksi

Número total de dados amostrados (NA)= 150 Número de iterações realizadas = 16

Fator KI	Coefficiente A0	Tensão remota S0x
1.783708 MPa.m <sup>1/2</sup>	0.711597 MPa.m <sup>1/2</sup>	0.760897 MPa
1.623202 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.647564 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.110355 Ksi

TABELA FINAL

NA	KI	S0x	A0	A1	A2	B0	B1	B2
(MPa.m <sup>1/2</sup> )	(MPa)	(MPa.m <sup>1/2</sup> )	(MPa.m <sup>1/2</sup> )	(MPa.m <sup>1/2</sup> )	(MPa.m <sup>-3/2</sup> )	(MPa)	(MPa)	(MPa.m <sup>-1</sup> )
30	1.841	1.121	0.735	-26.679	-476.945	-0.561	10.388	-1717.713
42	1.811	0.915	0.723	-20.625	-513.739	-0.458	21.456	-1320.571
60	1.807	0.901	0.721	-20.793	-618.961	-0.451	26.614	-1818.033
72	1.798	0.872	0.717	-18.965	-536.233	-0.436	27.214	-1300.657
90	1.792	0.843	0.715	-17.834	-518.287	-0.422	28.777	-1037.685
102	1.799	0.864	0.718	-18.343	-490.463	-0.432	25.218	-998.978
120	1.783	0.764	0.711	-16.667	-616.594	-0.382	34.257	-1373.446
132	1.783	0.759	0.711	-16.678	-612.510	-0.379	33.896	-1370.835
150	1.784	0.761	0.712	-16.330	-462.046	-0.380	25.933	-827.931
Média	1.800	0.867	0.718	-19.213	-538.120	-0.433	25.973	-1307.317

Número de valores contabilizados = 9

Desvio padrão de KI = 0.0177 MPa.m<sup>1/2</sup>

Desvio padrão de S0x = 0.1066 Mpa



## II.5 Processamento de isocromática real, na região *próxima* da ponta de uma trinca (PUC/RIO Franjas de ordem inteira geradas experimentalmente).

---

### S I S T E M A F O T O T E L

SISTEMA DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS FOTOELÁSTICAS COM  
RECURSOS PARA CÁLCULO DO FATOR DE INTENSIDADE DE TENSÕES KI

F O T O F R A N  
MÓDULO DE IMAGENS E DE SIMULAÇÃO

---

NOME DESTA ARQUIVO -> [ TR\_INT.DAT ]

---

IMAGEM ANALISADA : TR\_INT.PCX  
LOCALIZAÇÃO DA IMAGEM: C:\IMA\_TESE\PUC\INT\TR\_INT.PCX

---

Coordenadas do retângulo referente à imagem original (em pixels)  
(0 , 0) e (511 , 511)  
Coordenadas do retângulo referente à área processada (em pixels)  
(0 , 0) e (511 , 511)  
Coordenadas da ponta da trinca -> (153 , 245)  
Dimensão da trinca (a) em (pixels)= 12.00000 mm  
Resolução da imagem = 75 pontos por polegada ( ppp, dpi )  
Fator de ampliação = 10.058  
Limiar usado (lim) = 64  
Constante fotoelástica de tensão = 7000.000 N/m/franja  
Espessura do material fotoelástico = 6.000 mm  
Tipos de franjas : De ordem INTEIRA

---

Relação de raios máximos e ângulos de franjas rotuladas  
Faixa angular POSITIVA

Ordem	x_fran	y_fran	rmax	rmax(mm)	ang(graus)
2	39	127	164.073	5.524	134.012
3	170	82	163.884	5.518	84.046
4	183	145	104.403	3.515	73.301
5	172	180	67.720	2.280	73.706
6	167	198	49.041	1.651	73.412
7	164	208	38.601	1.300	73.443

---

Relação de raios máximos e ângulos de franjas rotuladas  
Faixa angular NEGATIVA

Ordem	x_fran	y_fran	rmax	rmax(mm)	ang(graus)
3	88	324	102.303	3.445	-129.447
4	150	340	95.047	3.200	-91.809
5	169	310	66.940	2.254	-76.171
6	167	291	48.083	1.619	-73.072
7	163	280	36.401	1.226	-74.054

---

### F O T O V E R MÓDULO DE ARQUIVOS

---

Método superdeterminístico - Dally and Riley  
Número de coeficientes usados = 6  
Número mínimo de pontos de amostragem segundo Dally : 30 pontos  
KI = raiz(2\*pi)\*A0  
Resolução estabelecida para os coeficientes = 0.00000010  
Número máximo previsto de iterações = 100

## DADOS SOBRE A TRINCA :

Coordenadas da ponta da trinca em pixels -&gt; (165 ,241)

Coordenadas da ponta da trinca em mm -&gt; ( 5.6 , 8.1 )

Término da iteração em função da resolução estabelecida

AMOSTRAGEM : Por número de faixas angulares

(Exemplo de incrementos referentes a primeira amostragem)

## RELAÇÃO DAS FRANJAS AMOSTRADAS E PROCESSADAS

Ordem Raio(mm) Ângulo (graus)

2	3.015	159.743
2	3.030	14.808
2	3.071	15.255
2	3.104	15.092
3	3.003	142.744
3	3.382	136.613
3	4.591	110.162
3	3.028	28.560
3	3.074	28.811
3	3.120	29.055
4	3.006	102.946
4	3.024	101.560
4	3.018	100.934
4	3.045	100.191
4	3.201	87.589
4	3.237	71.188
2	3.007	-158.317
2	3.007	-21.682
2	3.051	-22.036
2	3.082	-21.801
3	3.010	-143.642
3	3.572	-135.764
3	3.026	-34.574
3	3.073	-34.735
3	3.120	-34.891
3	3.167	-35.042
4	3.012	-115.133
4	3.153	-109.983
4	3.141	-109.406
4	3.206	-107.102
4	3.298	-63.958
4	3.283	-63.172
4	3.268	-62.379

Número total de dados amostrados (NA)= 33

Número de iterações realizadas = 14

Término da iteração em função da resolução estabelecida

$\delta[A0] = -0.0000000982 \text{ (N/mm}^2\text{).mm}^{1/2}$   
 $\delta[A1] = 0.0000000797 \text{ (N/mm}^2\text{).mm}^{-1/2}$   
 $\delta[A2] = 0.000000011 \text{ (N/mm}^2\text{).mm}^{-3/2}$   
 $\delta[B0] = 0.000000339 \text{ (N/mm}^2\text{)}$   
 $\delta[B1] = 0.000000020 \text{ (N/mm}^2\text{).mm}^{-1}$   
 $\delta[B2] = 0.000000009 \text{ (N/mm}^2\text{).mm}^{-2}$

$[A0] = 8.7022889895 \text{ (N/mm}^2\text{).mm}^{1/2}$   
 $[A1] = 0.4725362442 \text{ (N/mm}^2\text{).mm}^{-1/2}$   
 $[A2] = -0.0991986858 \text{ (N/mm}^2\text{).mm}^{-3/2}$   
 $[B0] = 0.4190958527 \text{ (N/mm}^2\text{)}$   
 $[B1] = 0.0914605665 \text{ (N/mm}^2\text{).mm}^{-1}$   
 $[B2] = -0.0027427380 \text{ (N/mm}^2\text{).mm}^{-2}$

Fator KI      Coeficiente A0      Tensão remota S0x  
 0.689800 MPa.m<sup>1/2</sup>      0.275191 MPa.m<sup>1/2</sup>      -0.838192 MPa  
 0.627729 Ksi.in<sup>1/2</sup>      0.250428 Ksi.in<sup>1/2</sup>      -0.121565 Ksi  
 627.729153 psi.in<sup>1/2</sup>      250.427700 psi.in<sup>1/2</sup>      -0.000122 psi  
 21.813404 (N/mm<sup>2</sup>).mm<sup>1/2</sup>      8.702289 (N/mm<sup>2</sup>).mm<sup>1/2</sup>      -0.838192 (N/mm<sup>2</sup>)

Número total de dados amostrados (NA)= 49      Número de iterações realizadas = 9

Fator KI      Coeficiente A0      Tensão remota S0x  
 0.844864 MPa.m<sup>1/2</sup>      0.337052 MPa.m<sup>1/2</sup>      1.296043 MPa  
 0.768840 Ksi.in<sup>1/2</sup>      0.306723 Ksi.in<sup>1/2</sup>      0.187969 Ksi

Número total de dados amostrados (NA)= 65      Número de iterações realizadas = 9

Fator KI      Coeficiente A0      Tensão remota S0x  
 0.847083 MPa.m<sup>1/2</sup>      0.337937 MPa.m<sup>1/2</sup>      1.269147 MPa  
 0.770859 Ksi.in<sup>1/2</sup>      0.307528 Ksi.in<sup>1/2</sup>      0.184068 Ksi

Número total de dados amostrados (NA)= 96      Número de iterações realizadas = 9

Fator KI      Coeficiente A0      Tensão remota S0x  
 0.846185 MPa.m<sup>1/2</sup>      0.337579 MPa.m<sup>1/2</sup>      1.270742 MPa  
 0.770041 Ksi.in<sup>1/2</sup>      0.307202 Ksi.in<sup>1/2</sup>      0.184299 Ksi

Número total de dados amostrados (NA)= 111      Número de iterações realizadas = 9

Fator KI      Coeficiente A0      Tensão remota S0x  
 0.846561 MPa.m<sup>1/2</sup>      0.337729 MPa.m<sup>1/2</sup>      1.293802 MPa  
 0.770383 Ksi.in<sup>1/2</sup>      0.307338 Ksi.in<sup>1/2</sup>      0.187644 Ksi

Número total de dados amostrados (NA)= 127      Número de iterações realizadas = 9

Fator KI      Coeficiente A0      Tensão remota S0x  
 0.845407 MPa.m<sup>1/2</sup>      0.337269 MPa.m<sup>1/2</sup>      1.279707 MPa  
 0.769334 Ksi.in<sup>1/2</sup>      0.306920 Ksi.in<sup>1/2</sup>      0.185599 Ksi

Número total de dados amostrados (NA)= 142      Número de iterações realizadas = 9

Fator KI      Coeficiente A0      Tensão remota S0x  
 0.844826 MPa.m<sup>1/2</sup>      0.337037 MPa.m<sup>1/2</sup>      1.268600 MPa  
 0.768805 Ksi.in<sup>1/2</sup>      0.306709 Ksi.in<sup>1/2</sup>      0.183988 Ksi

Número total de dados amostrados (NA)= 157      Número de iterações realizadas = 9

Fator KI      Coeficiente A0      Tensão remota S0x  
 0.845300 MPa.m<sup>1/2</sup>      0.337226 MPa.m<sup>1/2</sup>      1.262936 MPa  
 0.769236 Ksi.in<sup>1/2</sup>      0.306881 Ksi.in<sup>1/2</sup>      0.183167 Ksi

Número total de dados amostrados (NA)= 171      Número de iterações realizadas = 9

Fator KI      Coeficiente A0      Tensão remota S0x  
 0.845428 MPa.m<sup>1/2</sup>      0.337277 MPa.m<sup>1/2</sup>      1.265636 MPa  
 0.769353 Ksi.in<sup>1/2</sup>      0.306927 Ksi.in<sup>1/2</sup>      0.183559 Ksi

----- TABELA FINAL -----

NA	KI	S0x	A0	A1	A2	B0	B1	B2	
(MPa.m <sup>1/2</sup> )	(MPa)	(MPa)	(MPa.m <sup>1/2</sup> )	(MPa.m <sup>1/2</sup> )	(MPa.m <sup>1/2</sup> )	(MPa.m <sup>-3/2</sup> )	(MPa)	(MPa.m <sup>-1</sup> )	(MPa.m <sup>-2</sup> )
49	0.845	1.296	0.337	-31.069	387.918	-0.648	-58.203	1790.303	
96	0.846	1.271	0.338	-30.430	342.790	-0.635	-58.669	1793.518	
111	0.847	1.294	0.338	-30.686	419.230	-0.647	-59.742	2046.673	
127	0.845	1.280	0.337	-30.640	391.541	-0.640	-58.938	1856.214	
142	0.845	1.269	0.337	-30.390	377.227	-0.634	-58.165	1799.547	
157	0.845	1.263	0.337	-30.212	399.474	-0.631	-59.575	1893.961	
171	0.845	1.266	0.337	-30.293	414.253	-0.633	-60.106	1976.347	

Média 0.845 1.277 0.330 -24.847 -50.563 -0.506 -40.242 1301.728

Número de valores contabilizados = 8  
 Desvio padrão de KI = 0.0515 MPa.m<sup>1/2</sup>  
 Desvio padrão de S0x = 0.6996 Mpa

## II.6 Processamento de isocromática real, na região *próxima* da ponta de uma trinca (PUC/RIO Franjas de ordem fracionária geradas experimentalmente).

---

S I S T E M A F O T O T E L  
 SISTEMA DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS FOTOELÁSTICAS COM  
 RECURSOS PARA CÁLCULO DO FATOR DE INTENSIDADE DE TENSÕES KI  
 F O T O F R A N  
 MÓDULO DE IMAGENS E DE SIMULAÇÃO

---

NOME DESTA ARQUIVO -> [ TR\_FRAC.DAT ]

---

IMAGEM ANALISADA : TR\_FRAC.PCX

---

Coordenadas do retângulo referente à imagem original (em pixels)  
 (0 , 0) e (511 , 511)  
 Coordenadas do retângulo referente à área processada (em pixels)  
 (0 , 0) e (511 , 511)  
 Coordenadas da ponta da trinca -> (150 , 240)  
 Dimensão da trinca (a) em (pixels)= 12.00000 mm  
 Resolução da imagem = 75 pontos por polegada ( ppp, dpi )  
 Fator de ampliação = 10.058  
 Limiar usado (lim) = 64  
 Constante fotoelástica de tensão = 7000.000 N/m/franja  
 Espessura do material fotoelástico = 6.000 mm  
 Tipos de franjas : de ordem FRACIONÁRIA

---

Relação de raios máximos e ângulos de franjas rotuladas  
 Faixa angular POSITIVA

Ordem	x_fran	y_fran	rmax	rmax(mm)	ang(graus)
2.5	80	109	148.529	5.001	118.118
3.5	187	116	129.402	4.357	73.385
4.5	173	162	81.320	2.738	73.571
5.5	166	186	56.321	1.896	73.495
6.5	162	200	41.761	1.406	73.301
7.5	159	208	33.242	1.119	74.291

---

Relação de raios máximos e ângulos de franjas rotuladas  
 Faixa angular NEGATIVA

Ordem	x_fran	y_fran	rmax	rmax(mm)	ang(graus)
2.5	69	326	118.140	3.978	-133.285
3.5	123	341	104.547	3.520	-104.966
4.5	174	319	82.565	2.780	-73.101
5.5	166	295	57.280	1.929	-73.780
6.5	162	281	42.720	1.438	-73.686
7.5	159	272	33.242	1.119	-74.291

---

F O T O V E R  
 MÓDULO DE ARQUIVOS

---

Método superdeterminístico - Dally and Riley

Número de coeficientes usados = 6

Número mínimo de pontos de amostragem segundo Dally : 30 pontos

$KI = \text{raiz}(2 \cdot \pi) \cdot A0$

Resolução estabelecida para os coeficientes = 0.00000010

Número máximo previsto de iterações = 100

DADOS SOBRE A TRINCA :

Coordenadas da ponta da trinca em pixels -> (165 ,241)

Coordenadas da ponta da trinca em mm -> ( 5.6 , 8.1 )

Término da iteração em função da resolução estabelecida

AMOSTRAGEM : Por número de faixas angulares

(Exemplo da primeira amostragem)

#### RELAÇÃO DAS FRANJAS AMOSTRADAS E PROCESSADAS

Ordem Raio(mm) Ângulo (graus)

2.5	3.003	149.697
2.5	4.799	130.732
2.5	3.002	23.114
2.5	3.033	22.864
2.5	3.077	23.199
2.5	3.121	23.523
3.5	3.003	127.255
3.5	3.030	126.870
3.5	3.205	121.686
3.5	3.684	108.104
3.5	4.052	94.289
3.5	4.262	80.910
3.5	4.315	67.036
3.5	4.034	52.460
3.5	3.108	39.726
2.5	3.042	-152.300
2.5	4.295	-138.814
2.5	3.012	-25.133
2.5	3.057	-25.436
2.5	3.102	-25.731
2.5	3.147	-26.017
3.5	3.006	-131.367
3.5	3.031	-130.946
3.5	3.152	-126.747
3.5	3.639	-112.293
3.5	3.003	-42.274
3.5	3.051	-42.316
3.5	3.074	-42.780
3.5	3.097	-43.238

Número total de dados amostrados (NA)= 29

Número de iterações realizadas = 10

Término da iteração em função da resolução estabelecida

$\text{delta}[A0] = 0.0000000725 \text{ (N/mm}^2\text{).mm}^{1/2}$   
 $\text{delta}[A1] = -0.0000000440 \text{ (N/mm}^2\text{).mm}^{-1/2}$   
 $\text{delta}[A2] = 0.0000000078 \text{ (N/mm}^2\text{).mm}^{-3/2}$   
 $\text{delta}[B0] = -0.0000000441 \text{ (N/mm}^2\text{)}$   
 $\text{delta}[B1] = -0.0000000104 \text{ (N/mm}^2\text{).mm}^{-1}$   
 $\text{delta}[B2] = 0.0000000008 \text{ (N/mm}^2\text{).mm}^{-2}$

$[A0] = 10.4357383871 \text{ (N/mm}^2\text{).mm}^{1/2}$   
 $[A1] = -0.9621476819 \text{ (N/mm}^2\text{).mm}^{-1/2}$   
 $[A2] = -0.0077228351 \text{ (N/mm}^2\text{).mm}^{-3/2}$   
 $[B0] = -0.5709852433 \text{ (N/mm}^2\text{)}$   
 $[B1] = -0.0319934230 \text{ (N/mm}^2\text{).mm}^{-1}$   
 $[B2] = -0.0019996382 \text{ (N/mm}^2\text{).mm}^{-2}$

Fator KI	Coefficiente A0	Tensão remota S0x
0.827205 MPa.m <sup>1/2</sup>	0.330007 MPa.m <sup>1/2</sup>	1.141970 MPa
0.752769 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.300312 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.165623 Ksi
752.769441 psi.in <sup>1/2</sup>	300.311557 psi.in <sup>1/2</sup>	0.000166 psi
26.158517 (N/mm <sup>2</sup> ).mm <sup>1/2</sup>	10.435738 (N/mm <sup>2</sup> ).mm <sup>1/2</sup>	1.141970 (N/mm <sup>2</sup> )

---

Número total de dados amostrados (NA)= 38    Número de iterações realizadas = 8

Fator KI	Coefficiente A0	Tensão remota S0x
0.832606 MPa.m <sup>1/2</sup>	0.332162 MPa.m <sup>1/2</sup>	1.223427 MPa
0.757685 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.302272 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.177437 Ksi

---

Número total de dados amostrados (NA)= 47    Número de iterações realizadas = 8

Fator KI	Coefficiente A0	Tensão remota S0x
0.833072 MPa.m <sup>1/2</sup>	0.332348 MPa.m <sup>1/2</sup>	1.221128 MPa
0.758108 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.302441 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.177103 Ksi

---

Número total de dados amostrados (NA)= 57    Número de iterações realizadas = 9

Fator KI	Coefficiente A0	Tensão remota S0x
0.828749 MPa.m <sup>1/2</sup>	0.330623 MPa.m <sup>1/2</sup>	1.167821 MPa
0.754174 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.300872 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.169372 Ksi

---

Número total de dados amostrados (NA)= 64    Número de iterações realizadas = 8

Fator KI	Coefficiente A0	Tensão remota S0x
0.832069 MPa.m <sup>1/2</sup>	0.331948 MPa.m <sup>1/2</sup>	1.224901 MPa
0.757196 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.302078 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.177651 Ksi

---

Número total de dados amostrados (NA)= 74    Número de iterações realizadas = 8

Fator KI	Coefficiente A0	Tensão remota S0x
0.831238 MPa.m <sup>1/2</sup>	0.331616 MPa.m <sup>1/2</sup>	1.185371 MPa
0.756440 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.301776 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.171917 Ksi

---

Número total de dados amostrados (NA)= 92    Número de iterações realizadas = 9

Fator KI	Coefficiente A0	Tensão remota S0x
0.831223 MPa.m <sup>1/2</sup>	0.331610 MPa.m <sup>1/2</sup>	1.201677 MPa
0.756426 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.301770 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.174282 Ksi

---

Número total de dados amostrados (NA)= 100    Número de iterações realizadas = 9

Fator KI	Coefficiente A0	Tensão remota S0x
0.831749 MPa.m <sup>1/2</sup>	0.331820 MPa.m <sup>1/2</sup>	1.192125 MPa
0.756905 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.301961 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.172897 Ksi

---

Número total de dados amostrados (NA)= 108    Número de iterações realizadas = 9

Fator KI	Coefficiente A0	Tensão remota S0x
0.830919 MPa.m <sup>1/2</sup>	0.331489 MPa.m <sup>1/2</sup>	1.185177 MPa
0.756149 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.301660 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.171889 Ksi

---

Número total de dados amostrados (NA)= 126    Número de iterações realizadas = 9

Fator KI	Coefficiente A0	Tensão remota S0x
0.831236 MPa.m <sup>1/2</sup>	0.331615 MPa.m <sup>1/2</sup>	1.195007 MPa
0.756438 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.301775 Ksi.in <sup>1/2</sup>	0.173315 Ksi

---

Número total de dados amostrados (NA)= 155    Número de iterações realizadas = 10

Fator KI      Coeficiente A0      Tensão remota S0x  
 0.832543 MPa.m<sup>1/2</sup>      0.332137 MPa.m<sup>1/2</sup>      1.189243 MPa  
 0.757627 Ksi.in<sup>1/2</sup>      0.302250 Ksi.in<sup>1/2</sup>      0.172479 Ksi

TABELA FINAL

NA	KI	S0x	A0	A1	A2	B0	B1	B2
	(MPa.m <sup>1/2</sup> )	(MPa)	(MPa.m <sup>1/2</sup> )	(MPa.m <sup>-1/2</sup> )	(MPa.m <sup>-3/2</sup> )	(MPa)	(MPa.m <sup>-1</sup> )	(MPa.m <sup>-2</sup> )
29	0.827	1.142	0.330	-30.426	-244.217	-0.571	-31.993	-1999.638
38	0.833	1.223	0.332	-31.503	29.620	-0.612	-41.789	-886.317
47	0.833	1.221	0.332	-31.394	79.542	-0.611	-44.896	-608.338
57	0.829	1.168	0.331	-30.712	-100.053	0.584	-37.112	-1361.099
64	0.832	1.225	0.332	-31.462	36.558	-0.612	-41.778	-728.352
74	0.833	1.208	0.332	-31.203	68.325	-0.604	-44.126	-492.067
83	0.831	1.185	0.332	-30.914	-5.543	-0.593	-40.674	-807.754
92	0.831	1.202	0.332	-31.019	36.644	-0.601	-41.712	-634.000
100	0.832	1.192	0.332	-30.870	57.299	-0.596	-43.102	-423.599
108	0.831	1.185	0.331	-30.784	20.284	-0.593	-41.176	-628.901
126	0.831	1.195	0.332	-30.828	63.074	-0.598	-42.303	-378.107
Média	0.831	1.195	0.332	-31.010	3.776	-0.598	-40.969	-813.470

Número de valores contabilizados = 11  
 Desvio padrão de KI = 0.0017 MPa.m<sup>1/2</sup>  
 Desvio padrão de S0x = 0.0240 MPa

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MEASUREMENTS GROUP VISHAY. Photoelastic stress analysis : a short-form catalog introducing. Raleigh, N.C., 1987. (Bulletin SFC-300-B).
- [2] MEASUREMENTS GROUP VISHAY. Photostress instrumentation: full-field systems for stress analysis. Raleigh, N.C., 1989. (Bulletin S-134-1).
- [3] MEASUREMENTS GROUP VISHAY. Photoelastic materials. Raleigh, N.C., 1992. (Bulletin S-116-F).
- [4] MEASUREMENTS GROUP VISHAY. Teaching/learning aids for experimental stress analysis. Raleigh, N.C., 1983. (Bulletin 308-B).
- [5] DINIZ, S. M. C. **Aplicação da fotoelasticidade no estudo de tensões em componentes do elemento combustível do reator nuclear**. Belo Horizonte: 1987. Dissertação ( Mestrado em Ciências em Técnicas Nucleares) - Universidade Federal de Minas Gerais.
- [6] SOARES, W. A.; ANDRADE, A. H. P. Software para geração e análise de imagens fotoelásticas sintéticas. In : 49 CONGRESSO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS, Outubro, 1994, São Paulo, Brasil. **Proceedings...** São Paulo, Brasil : Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais-ABM, 1994. Volume 1 - Pesquisa da Microestrutura de Metais e Materiais; Metalurgia Física, p. 335-343.
- [7] SOARES, W. A.; ANDRADE, A. H. P. SIMFOT : a software for simulating photoelastic experiments. In : THIRD INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER AIDED LEARNING AND INSTRUCTION IN SCIENCE AND ENGINEERING, Jul. 2-3, 1996, San Sebastian, Spain : Springer, 1996, p. 476-478.



- [8] DALLY, J. M.; RILEY, W. F. **Experimental stress analysis**. New York, N.Y.: McGraw-Hill, 1991.
- [9] FREIRE, J. L. F. **Introdução à fotoelasticidade**. Rio de Janeiro, R.J. : Departamento de Engenharia Mecânica da PUC, [s.d]. (Apostila).
- [10] DURELLI, A. J.; RILEY, W.F. **Introduction to photomechanics**. New Jersey : Prentice-Hall, 1965.
- [11] HECHT, E. **Optics**. Massachussets : Addison-Wesley, 1987.
- [12] FROCHT, M. M. **Photoelasticity**. New York, N. Y.: John Wiley, 1948.
- [13] FROCHT, M.M. **Fotoelasticidad**. Tucumán, Argentina : John Wiley, 1952.
- [14] BUDYNAS, R. G. Experimental stress anlysis. In: BUDYNAS, R. G. **Advanced strength and applied stress analysis**. New York, n. y.: McGraw-Hill, 1977. p. 349-415.
- [15] KHOL, R. Understanding photoelasticity. **Machine Design**, v. 40, n. 25, p. 168-184, 1968.
- [16] POST, D. Photoelasticity. **Experimental Mechanics**, v. 19, n. 5, p. 176-192, 1979.
- [17] SOARES, W.A. **Seminário sobre fundamentos de fotoelasticidade no curso de pós- graduação em engenharia de estruturas da UFMG**. Belo Horizonte : Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, 1995. (NI CT2- 003/95).
- [18] HAERTLING, G. H. Electro-optic ceramics and devices. In: LEVINSON, L. M. **Electronic Ceramics Properties, Devices and Applications**. New York, N. Y.: Marcel Dekker, p. 371-401, 1988.

- [19] SOARES, W. A.; ANDRADE, A. H. P. Software for generation and analysis of photoelastic fringes in plates with a single hole subjected to in-plane loads. In : 13th INTERNATIONAL CONFERENCE ON STRUCTURAL MECHANICS IN REACTOR TECHNOLOGY, Aug. 13-18, 1995, Porto Alegre, Brasil. **Proceedings...** Porto Alegre, Brasil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. v. II, Pressure Vessels and Piping, Fracture Mechanics and Fatigue, Material Behaviour in Continuum Mechanics, p. 863-868.
- [20] YOUNG, F. D. Basic principles and concepts on model analysis. **Experimental Mechanics**, Jul. , p. 25-36, 1971.
- [21] MÖNCH, E. Similarity and model laws in photoelastic experiments. **Experimental Mechanics**, May, p. 141-150, 1964.
- [22] MUELLER, R. K. Mathematical and physical models. **Experimental Mechanics**, v. 18, n. 7, p. 241-245, 1964.
- [23] GODEFROID, L . B. **Aplicação da mecânica de fratura no projeto estrutural**. Ouro Preto, Minas Gerais : UFOP, 1995.
- [24] GODEFROID, L. B. **Ensaio mecânicos de fratura de materiais**. Ouro Preto, Minas Gerais : Associação Brasileira de Metalurgia e de Materiais, 1995. (Apostila).
- [25] IRWIN, G. R.; DE WIT, R. A summary of fracture mechanics concepts. **Journal of testing and evaluation**. v. 11, n. 1, p. 56-65, 1993.
- [26] BORESI, A. P.; SCHMIDT, R. J.; SIDEBOTTOM, O. M. **Advanced mechanics of materials**. New York, N. Y.: John Wiley & Sons, 1993.
- [27] DODD, B.; BAI, Y. **Ductile fracture and ductility with applications to metalworking**. London : Academic Press, 1987.

- [28] ANDERSON, T. L. **Fracture Mechanics - fundamentals and applications**. Boston, Boca Raton : CRC, 1991.
- [29] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for plane-strain fracture toughness of metallic materials. Nov., 30, 1990. (ASTM E 399-90). In: 1996 ANNUAL book of ASTM standards. Section 3 : Metals - mechanical testing : elevated and low-temperature tests; metallography. v. 03.01.
- [30] POST, D. Photoelastic stress analysis for an edge crack in a tensile field. In: SPRING MEETING OF THE SOCIETY FOR EXPERIMENTAL STRESS ANALYSIS, Cincinnati, 1954. **Proceedings...** Cincinnati, 1954, v. XII, n. 1, pp.90-116. apud DALLY, J. W.; RILEY, W. F. **Experimental stress analysis**. New York, N. Y.: McGraw-Hill, 1991.
- [31] WELLS, A.; POST, D. The dynamic stress distribution surrounding a running crack . In: SPRING MEETING OF THE SOCIETY FOR EXPERIMENTAL STRESS ANALYSIS, Boston, Mass. **Proceedings...** Boston, 1957, v. XVI, n. 1, p. 69-92.
- [32] SANFORD, R. J. Determining fracture parameters with full-field optical methods. **Experimental Mechanics**, v. 29, p. 241-247, 1989.
- [33] BRADLEY, W.B.; KOBAYASHI, A.S. An investigation of propagating cracks by dynamic photoelasticity. **Experimental Mechanics**, Mar. , p.106-113, 1970.
- [34] SCHROEDL, M. A.; SMITH, C. W. Local stress near deep surface flaws under cylindrical bonding fields, Progress in Flaw Growth and Fracture Toughness Testing. ASTM STP 536, ATM, 45-63 (1973). apud DALLY, J. W.; RILEY, W. F. **Experimental stress analysis**. New York, N. Y.: McGraw-Hill, 1991.
- [35] 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.

- [36] SANFORD, R. J. Application of the least-squares method to photoelastic analysis. **Experimental Mechanics**, v. 20, n. 6, p.192-197, 1980.
- [37] 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.
- [38] BARKER, D. B.; SANFORD, R. J.; CHONA, R. Determining K and related stress-field parameters from displacement fields. **Experimental Mechanics**, Dec. , p. 395-407, 1985.
- [39] MARLOFF, R. H.; LEVEN, M. M.; RINGLER, T. N.; JOHNSON, R. L. Photoelastic determination of stress intensity factors. **Experimental Mechanics**, v. 11, n. 12, p. 529-539, 1971.
- [40] BRADLEY, W. B.; KOBAYASHI, A. S. Fracture dynamics - a photoelastic investigation. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 3 , p. 317-332, 1971.
- [41] SCHROEDL, M. A.; MCGOWAN, J. J.; SMITH, C. W. An assesment of factors influencing data obtained by photoelastic stress freezing technique for stress field near crack tips. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 9, n. 4, p. 801-809, 1972.
- [42] SMITH, D. G.; SMITH, C.W. Photoelastic determination of mixed mode stress intensity factors. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 4, p. 357-366, 1972.
- [43] THEOCARIS, P.S.; GDOUTOS, E. E. A photoelastic determination of  $K_I$  stress intensity factors. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 7, p. 331-339, 1975.
- [44] 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.

- [45] GDOUTOS, E. E.; THEOCARIS, P. S. A photoelastic determination of mixed-mode stress-intensity factors. **Experimental Mechanics**, Mar. , p. 87-96, 1978.
- [46] ETHERIDGE, J. M.; DALLY, J. W. A three-parameter method for determining stress intensity factors from isochromatic fringe loops. **Journal of Strain Analysis**, v.13, n. 2, p. 91-94, 1978.
- [47] DURELLI, A. J. Classification os stress intensity factors from isochromatics-fringe patterns. **Experimental Mechanics**, v. 19, n. 9, p. 336-338, 1979.
- [48] SMITH, C. W. Photoelasticity in fracture mechanics. **Experimental Mechanics**, Nov. , p. 391-396, 1980.
- [49] OLADIMEJI, M. K. Photoelastic analysis of practical mode I fracture teste specimens. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 9, n. 4, p. 717-738, 1984.
- [50] SMITH, C. W. Experimental determination of stress intensity factor distributions in engineering problems. In : THIRD PAN-AMERICAN CONGRESS OF APPLIED MECHANICS, Janeiro, 1993, São Paulo, Brasil. **Proceedings...** São Paulo,Brasil: Applied Mechanics Reviews, v. 46, n. 11, p. 33-36.
- [51] MORTON, J.; RUIZ, C. Photoelasticity in the assesment of structural integrity. **Experimental Mechancis**, Jun. , p. 210-215, 1982.
- [52] DOYLE, J. F.; KAMLE, S.; TAKEZAKI, J. Error analysis of photoelasticity in fracture mechanics. **Experimental Mechanics**, Nov. , p. 429-435, 1981.
- [53] ARAI, H. **Determinação de fatores de intensidade de tensões para modos de abertura I e II combinados através da fotoelasticidade**. Rio de Janeiro : 1983. Dissertação ( Mestrado em Ciências em Engenharia Mecânica ) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

- [54] COSTA, T.F. **Uma generalização dos métodos de determinação dos fatores de intensidade de tensões  $K_I$  e  $K_{II}$  através da fotoelasticidade.** Rio de Janeiro : 1986. Dissertação ( Mestrado em Ciências em Engenharia Mecânica ) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- [55] REBELLO, J.R. **Fatores de intensidade de tensões para trincas próximas a juntas soldadas planas e tubulares via fotoelasticidade.** Rio de Janeiro : 1987. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Mecânica ) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 1987.
- [56] CAVACO, M. A. M.; FREIRE, J. L. F. Um método analítico-fotoelástico assistido por computador para análise de tensões. In : X CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, Dez. 5-8, 1989, Rio de Janeiro, Brasil. **Proceedings...** Brasil : ABCM, p. 33-36.
- [57] FREIRE, F. L.; CARVALHO, E. A.; CAVACO, M. A. M. Determination of stress concentration factor for shallow and sharp v-notches using a hybrid method. **Applied Mechanics**, v. 46, n. 11, part 2, p. S129-S135, 1993.
- [58] COSTA, T. F.; FREIRE, J. L. F. Fatores de intensificação de tensões para trincas vizinhas a soldas de topo. In : IX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, Dez. 1987, Florianópolis, Brasil. **Proceedings...** Brasil : ABCM, p. 999-1002.
- [59] CHEN, T.Y.; TAYLOR, C.E. Computerized fringe analysis in photomechanics. **Experimental Mechanics**, v. 29, Sep. , p. 323-329, 1989.
- [60] VOLOSHIN, A. S.; BURGER, C. P. Half-fringe photoelasticity : a new approach to whole-field stress analysis. **Experimental Mechanics**, v. 23, Sep. , p. 304-313, 1983.
- [61] SEGUCHI, Y.; TOMITA, Y.; WATANABE, M. Computer-aided fringe-patterns analyzer - a case of photoelastic fringe. **Experimental Mechanics**, v. 19, Oct. , p. 362-370.

- [62] YATAGAI, T.; NAKADATE, S.; IDESAWA, M.; SAITO, H. Automatic fringe analysis using digital image processing techniques. **Optical Engineering**, v. 21, n. 3, p. 432-435, 1982.
- [63] KHADAKKAR, A. G.; JYOTHI, V.; NARAYANAN, R. Fringe tracing by image processing. **Optical Engineering**, v.33, n. 6, p.1872-1875, 1994.
- [64] RAMESH, K.; PRAMOD, B. R. Digital image processing of fringe patterns in photomechanics, **Optical Engineering**, v.31, n. 7, p. 148-798, 1992.
- [65] MEHDI-SOOZANI, A.; MISKIOGLU, I.; BURGER, C. P.; RUDOLPH, T. J. Stress intensity factors for interacting cracks. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 27, n. 3, p. 345-359, 1987.
- [66] MISKIOGLU, I.; MEHDI-SOOZANI, A.; BURGER, C. P.; VOLOSHIN, A.S. Stress intensity factors for near edge cracks by digital image analysis. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 27, n. 3, p. 329-343, 1987.
- [67] SOARES, W. A.; ANDRADE, A. H. P. FOTOEL - sistema de processamento digital de imagens fotoelásticas para cálculo do parâmetro  $K_I$  da mecânica da fratura. In : I SEMINÁRIO DE MECÂNICA DA FRATURA, Jun. 1-2, 1995, Ouro Preto, Brasil. **Proceedings...** São Paulo, Brasil : Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABCM, 1995. p. 249-264.
- [68] SOARES, W. A.; ANDRADE, A. H. P.; DI LORENZO, R. F.; BARROS, P. N. A. Determinação de franjas de ordem inteira a partir de imagens fotoelásticas utilizando processamento digital de imagens. In: XIII CONGRESSO BRASILEIRO E II CONGRESSO IBERO AMERICANO DE ENGENHARIA MECÂNICA, Dez. 12-15, 1995, Belo Horizonte, Brasil. **Proceedings...** Belo Horizonte, Brasil : Associação Brasileira de Ciências Mecânicas ABCM, 1995. Anais em CD ROM.
- [69] REID, G. T. Automatic fringe pattern analysis : a review. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 7, p. 37-68, 1986.

- [70] DYER, C. R.; ROSENFELD, A. Thinning algorithms for gray-scale pictures. **IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence**, v. PAMI-1, n. 1, p. 88-89, 1979.
- [71] JAIN, K. A. **Fundamentals of digital image processing**. Ney York : Prentice-Hall International, 1989.
- [72] HUSSAIN, Z. **Digital image processing : practical applications of parallel processing techniques**. New York, N. Y.: Ellis Horwood, 1991.
- [73] GONZALEZ, R. C.: WINTZ, P. **Digital Image Processing**. Reading, M. A.: Addison-Wesley, 1987.
- [74] PHILLIPS, D. **Image processing - analysing and enhancing digital images**, Kansas : R & D Publications, 1994.
- [75] SALARI, E.; SIY, P. The ridge-seeking method for obtaining the skeleton of digital images. **IEEE transactions on systems, man, and cybernetics**, v. SMC-14, n. 3, p. 524-528, 1984.
- [76] GILLIES, A. C. Image processing approach to fringe patterns. **Optical Engineering**, v. 27. n. 10, p. 861-866, 1988.
- [77] KÖDITZ, W. Image processing and image analysis. **Elektronik praxis**, v. 22, p.4-20, special print, [s. d.].
- [78] ZHI, H.; JOHANSSON, R. B. Adaptive filter for enhacement of fringe patterns. **Optics and Lasers in Engineering**. v. 15, p. 241-251, 1991.
- [79] MENDENHALL, F. T. Jr. **Computer aided analysis of photoelastic images**. Illinois: 1981. Thesis (Ph.D.), University of Illinois.



- [80] SOARES, W.A. **A fotoelasticidade e o processamento digital de imagens**. Belo Horizonte : Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, 1993. (NI- 01/93 - CT2).
- [81] MICROSOFT CORPORATION. **Introducing visual C++ - Development system for Windows and Windows NT - Version 2.0**, 1994.
- [82] CATENARY SYSTEM. **Victor image processing library for Windows - User's guide and library reference**, 1995.
- [83] MICROSOFT CORPORATION. **Microsoft Windows for workgroups. Version 3.11**, 1993.
- [84] MICROSOFT CORPORATION. **Operational System MS-DOS, version 6.22**.
- [85] PRESS, W.H.; TEUKOLSKY, S. A.; VETTERLING, W.T.; FLANNERY, B. P. **Numerical recipes in C - the art of scientific computing**. Melbourne, Australia : University of Cambridge, 1992.