

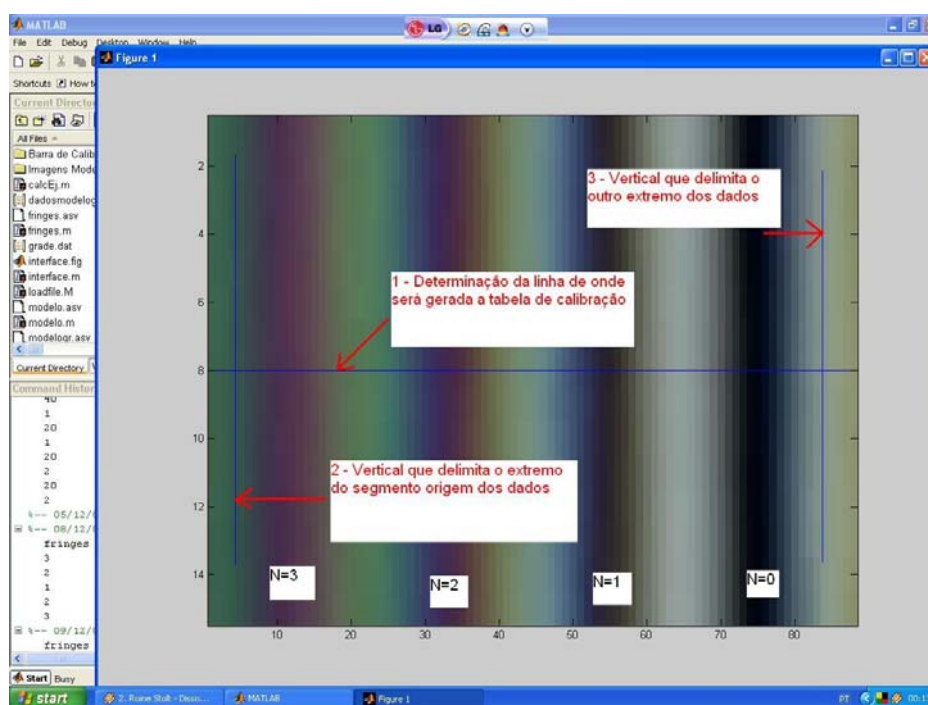


Figura 5.10 – Detalhe da área selecionada para montagem da tabela de calibração.

No próximo passo, duas imagens (uma em padrão RGB e outra em tons de cinza) com os seus respectivos gráficos serão abertas (Fig. 5.11 e 5.12).

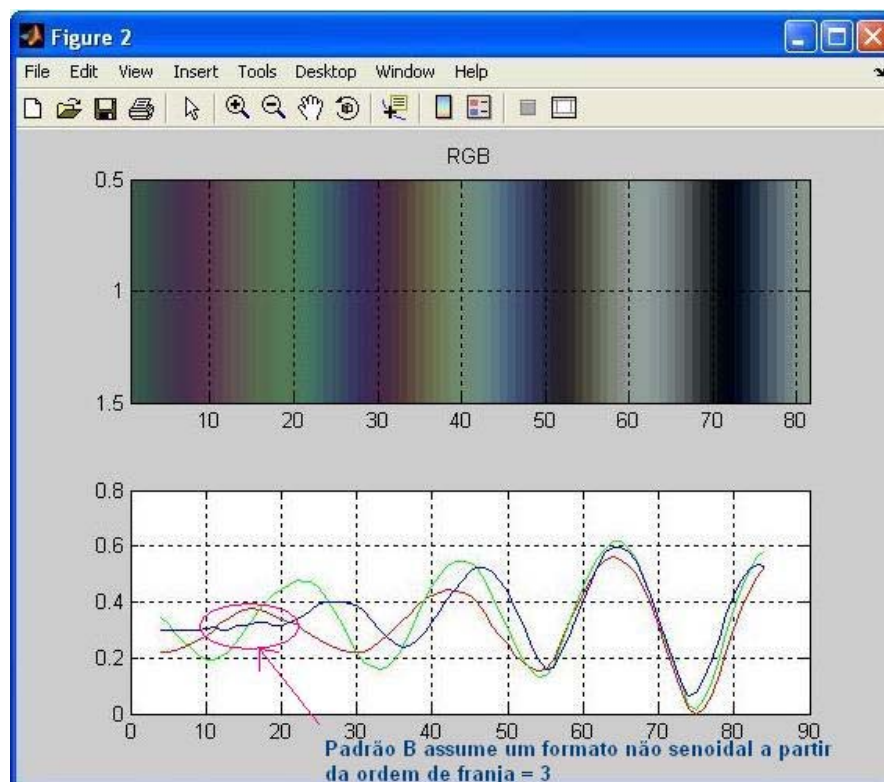


Figura 5.11 – Imagem RGB e gráfico (relativos à área selecionada)

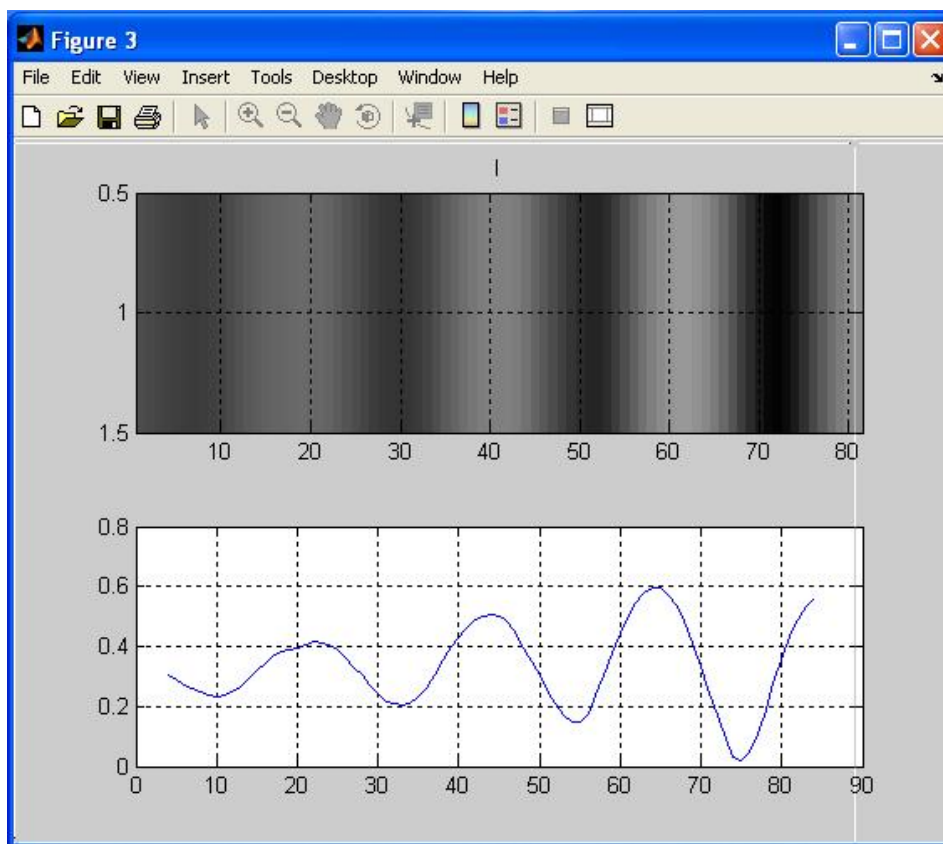


Figura 5.12 – Imagem com tons de cinza e gráficos (relativos à área selecionada)

Nesse ponto o usuário deverá verificar a aparência das curvas RGB, constatando se há presença de ruído na linha selecionada. A presença de ruído poderá ser percebida quando os padrões RGB exibidos na imagem “Figura 2”, cujo exemplo é mostrado na Fig. 5.11 apresentarem-se com desvios do formato senoidal. Nesta figura, o padrão B (azul) muda de formato a partir da ordem de franja $N = 3$, o que Yoneyama e Takashi (1998) já haviam afirmado (atenuação das intensidades de luz a partir da franja 3).

Na Fig. 7.5 é mostrado um exemplo de um caso onde a linha escolhida apresentou pontos de ruído que geraram distorções na imagem dos parâmetros, o que resultará em uma tabela de calibração com valores não utilizáveis.

Na Fig. 5.11 se pode verificar alguma irregularidade da curva do padrão B na altura da ordem de franja 3, onde a curva abandona a forma senoidal e sofre algum amortecimento em seu perfil. Neste caso o usuário deverá reiniciar novamente o programa e escolher outra região para a geração da tabela de calibração das ordens de franja.

Retornando à tela do prompt do Matlab®, o programa solicitará ao usuário as seguintes entradas de dados (Fig 5.13):

Mensagem no Prompt Matlab	Ação a ser tomada
>> A partir do gráfico em tons de cinza, selecione a posição da franja zero (linha 1)	1. Clicar com o mouse na área de franja 0 no gráfico de tons de cinza.
>> A partir do gráfico em tons de cinza, selecione a posição da ultima franja analisada (linha2)	2. Clicar com o mouse na área de franja cujo valor nos interesse utilizar.
>> Informe a ordem da última franja nesse ponto (linha 2) = 3	3. Digite na tela do prompt do Matlab, o valor da ordem de franja selecionada.

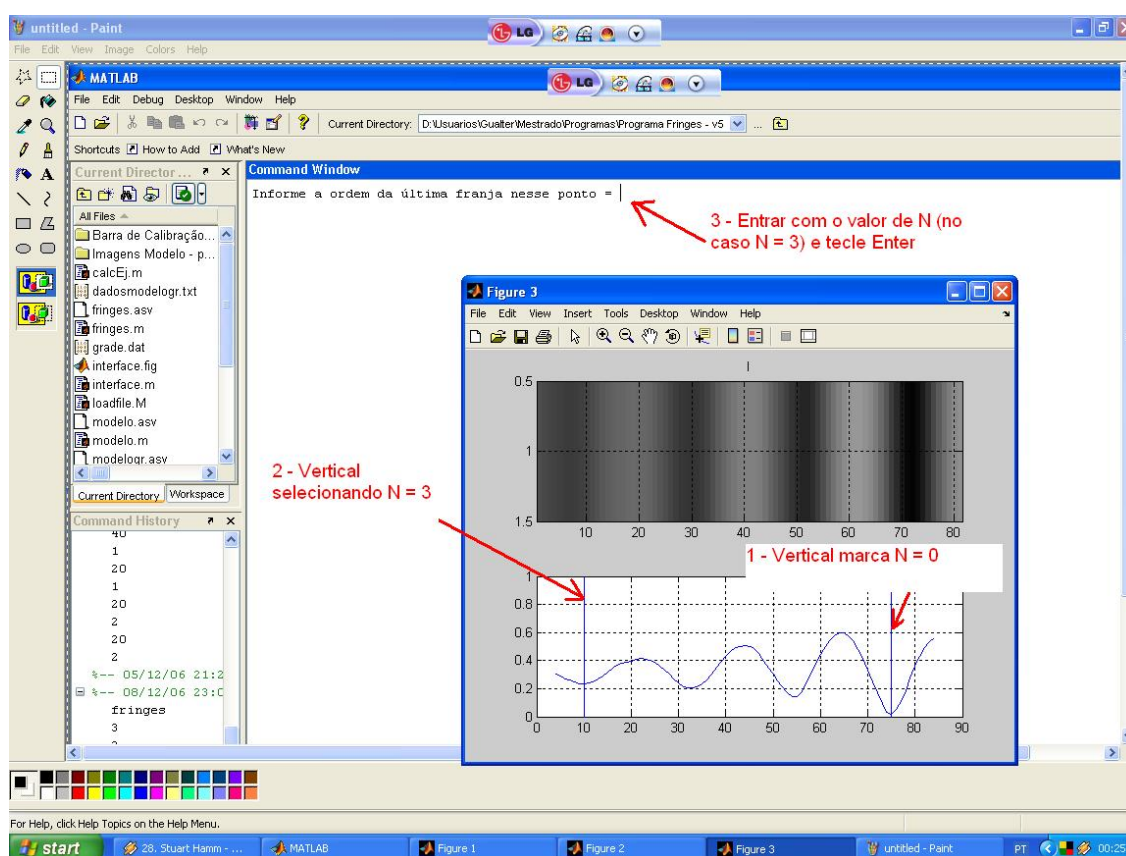


Figura 5.13 – Seleção da ordem de franja 0 e máxima de interesse, com o mouse.

No exemplo da Fig. 5.13, foi selecionada a maior franja do modelo de calibração em análise, mas o usuário poderia selecionar a franja de ordem 2, o que possibilitaria a confecção de uma tabela de calibração com ordem máxima 2. Como procedimento mais seguro, deve-se procurar selecionar sempre a de maior ordem, pois assim será possível fazer a análise de modelos com maiores ordens de franja.

Nessa etapa, será gerada uma tabela de calibração das ordens de franja, cujo conteúdo será armazenado em uma planilha Excel® denominada “tabela.xls”, no mesmo diretório do programa “Fringes”, cujo conteúdo será: valores RGB x ordem de franja.

Com a tabela de calibração das ordens de franja montada, será solicitado ao usuário que opte entre: utilizar uma grade de pontos definida em arquivo externo, utilizar uma grade gerada pelo próprio programa ou pela seleção dos pontos de interesse diretamente na imagem fotoelástica do modelo. A Figura 5.14 mostra as opções de análise a serem escolhidos.

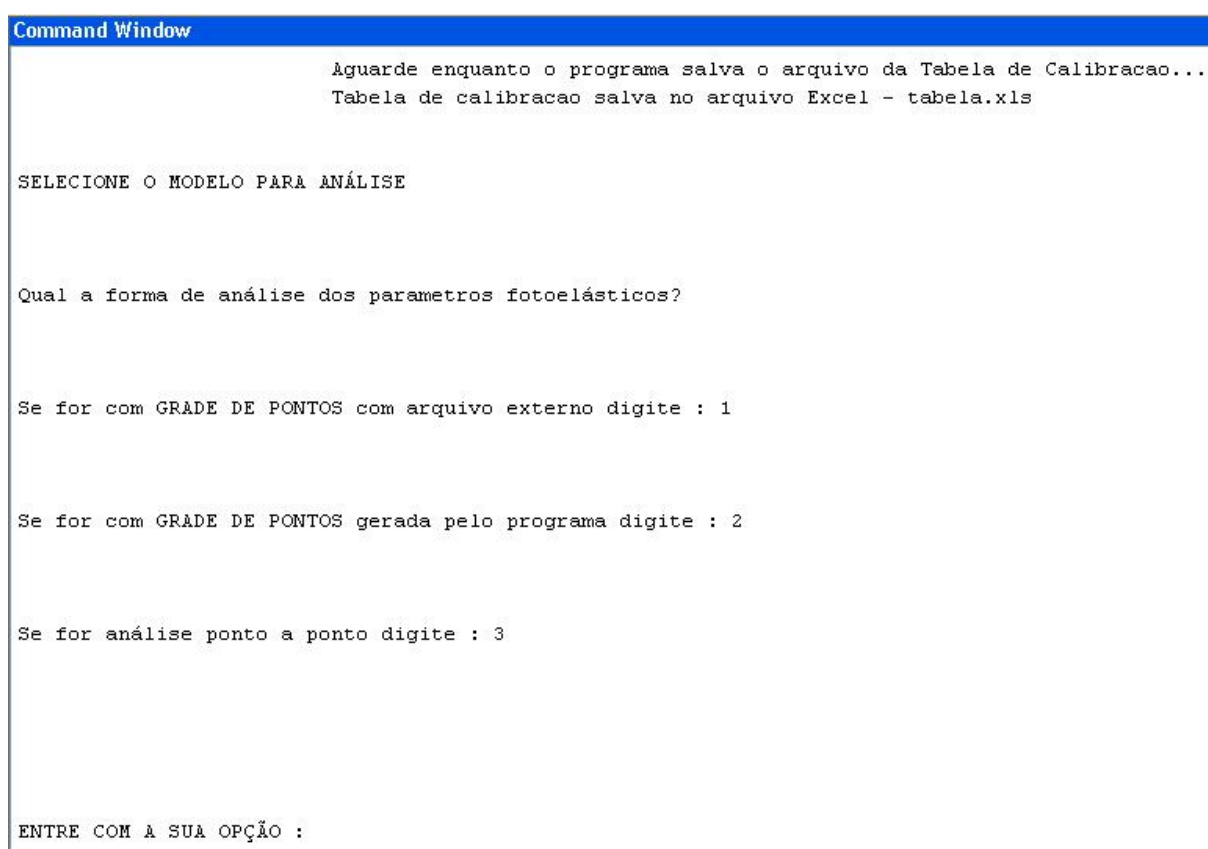


Figura 5.14 – Tela de opção pelo método de análise do modelo.

Opção por Grade Externa dos Pontos Gerada em Arquivo Externo

Se o usuário optar por utilizar uma grade externa de pontos, o programa “Fringes” lerá os arquivos *gradefi.dat* (dados utilizados na geração da tabela de calibração das direções principais) e *grade.dat* (dados dos pontos da grade, do modelo fotoelástico analisado). O usuário deverá editar e alterar previamente estes arquivos, conforme seja seu disco de calibração. Todos os valores das coordenadas consideram o modelo posicionado no 1º quadrante.

Após serem obtidos os dados acima, o programa “Fringes” gerará uma tabela Excel® denominada “tabelaresultados1.xls”, com os resultados finais para os pontos: número do ponto, ordem de franja, tensão cisalhante, ângulos da direção das tensões principais. Caso o arquivo já exista, o programa sobregravará as linhas correspondentes ao número de pontos analisados, deixando a partir da linha seguinte os dados antigos do arquivo sem alteração.

A Tabela 5.1 mostra um exemplo do conteúdo do arquivo *gradefi.dat*. A primeira linha possui os dados: número de pontos utilizados, dimensão horizontal do disco (mm), dimensão vertical do disco (mm), e 2 campos não utilizados, preenchidos com zeros. Na segunda linha, temos 5 campos utilizados internamente no programa. A partir da 3ª linha do arquivo *gradefi.dat* temos: número de ordem do ponto (esta numeração não corresponde à numeração do arquivo *grade.dat*), coordenada horizontal (mm), coordenada vertical (mm), valor da menor ordem de franja mais próxima do ponto, valor da maior ordem de franja mais próxima do ponto.

Tabela 5.1 – Exemplo de conteúdo do arquivo *gradefi.dat*

Conteúdo	Significado
6,39.5,39.5,0,0	
0,0,0,0,0	
1,11.75,19.75,1,2	6 pontos, 39,5mm, 39,5mm, 0,0
2,15.75,19.75,2,3	Não alterar.
3,19.75,11.75,2,3	Ponto 1, x=11,75, y=19,75, franja 1, franja 2. (ponto entre 1 e 2)
4,19.75,15.75,2,3	Mesmo critério para os demais pontos
5,19.75,19.75,2,3	
6,19.75,23.75,2,3	

A Tabela 5.2 mostra um exemplo do conteúdo do arquivo *grade.dat*. Os valores de dados são separados por vírgula e os pontos decimais seguem a notação do Matlab®, que utiliza pontos para indicar casas decimais. O primeiro valor de cada linha do arquivo *grade.dat* serve para uso interno do programa e não deve ser alterado, exceto para os casos em que se aumente o número de pontos da grade. Neste caso, para cada linha a partir da 3ª, deve-se adicionar 1 ao valor do primeiro campo. Na primeira linha do arquivo, os 2º e 3º valores indicam respectivamente a dimensão horizontal e vertical do modelo fotoelástico (em milímetros) e serão alterados para cada caso a ser estudado.

Na segunda linha do arquivo *grade.dat*, os 2º e 3º valores indicam respectivamente a constante ótica do material fotoelástico (obtida na etapa de calibração do material) e a espessura do modelo (em mm), e devem ser alterados para cada caso a ser estudado.

Tabela 5.2 – Exemplo de conteúdo do arquivo *grade.dat*

Conteúdo da linha	Significado
0,39.5,22,25,0	0 = não alterar (uso interno do programa) 39.5 = dimensão horizontal do modelo (em mm) 22 = dimensão vertical do modelo (em mm) 25 = número de pontos 0 = valor não utilizado
0,0.236,6,0,0	0 = não alterar (uso interno do programa) 0.236 = valor da constante ótica do material fotoelástico em uso 6 = espessura da fatia do modelo fotoelástico (em mm) 0 = valor não utilizado 0 = valor não utilizado
1,11.75,11.75,1,2	1 = indica primeiro ponto da grade (não alterar) 11.75 = indica 11.75 mm a partir da origem das abscissas 11.75 = indica 11.75 mm a partir da origem das ordenadas 1 = ordem de franja 1 2 = ordem de franja 2
2,11.75,15.75,1,2	2 = indica segundo ponto da grade (não alterar) 11.75 = indica 11.75 mm a partir da origem das abscissas 15.75 = indica 15.75 mm a partir da origem das ordenadas 1 = ordem de franja 1 2 = ordem de franja 2
3,11.75,19.75,1,2	Similar ao anterior
4,11.75,23.75,1,2	Similar ao anterior
5,11.75,27.75,1,2	Similar ao anterior
..... continua	

Feita a opção (Fig. 5.14), se visualizará uma tela para seleção do disco de calibração a ser utilizado. O usuário deverá direcionar para o diretório onde está o arquivo da imagem do disco de calibração e clicar em “Abrir” no arquivo selecionado, conforme Fig. 5.15.

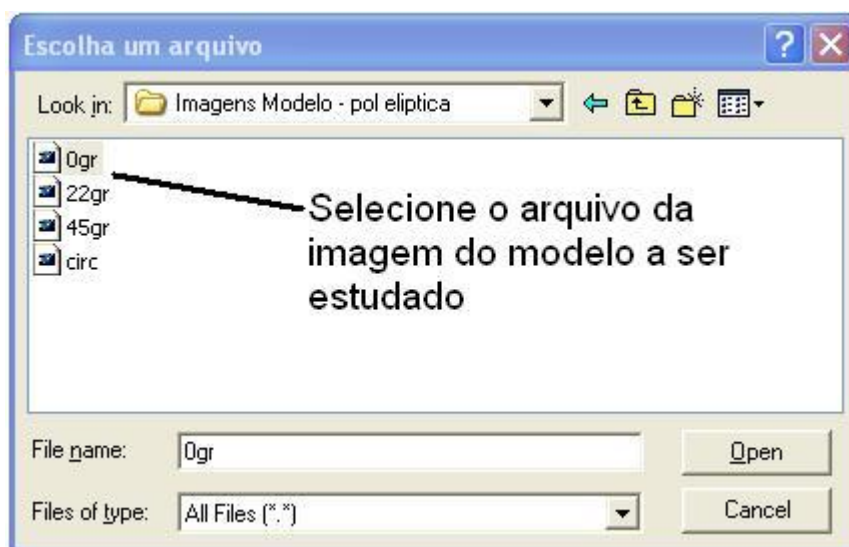


Figura 5.15 – Tela de seleção do arquivo de imagem fotoelástica do modelo.

O programa abrirá a imagem do disco de calibração, solicitará que o usuário delimite o disco, por uso do mouse, clicando num ponto que marca o vértice superior esquerdo e outro, que marca o vértice inferior direito de um retângulo no qual o disco esteja inscrito, conforme se vê na Fig. 5.16.

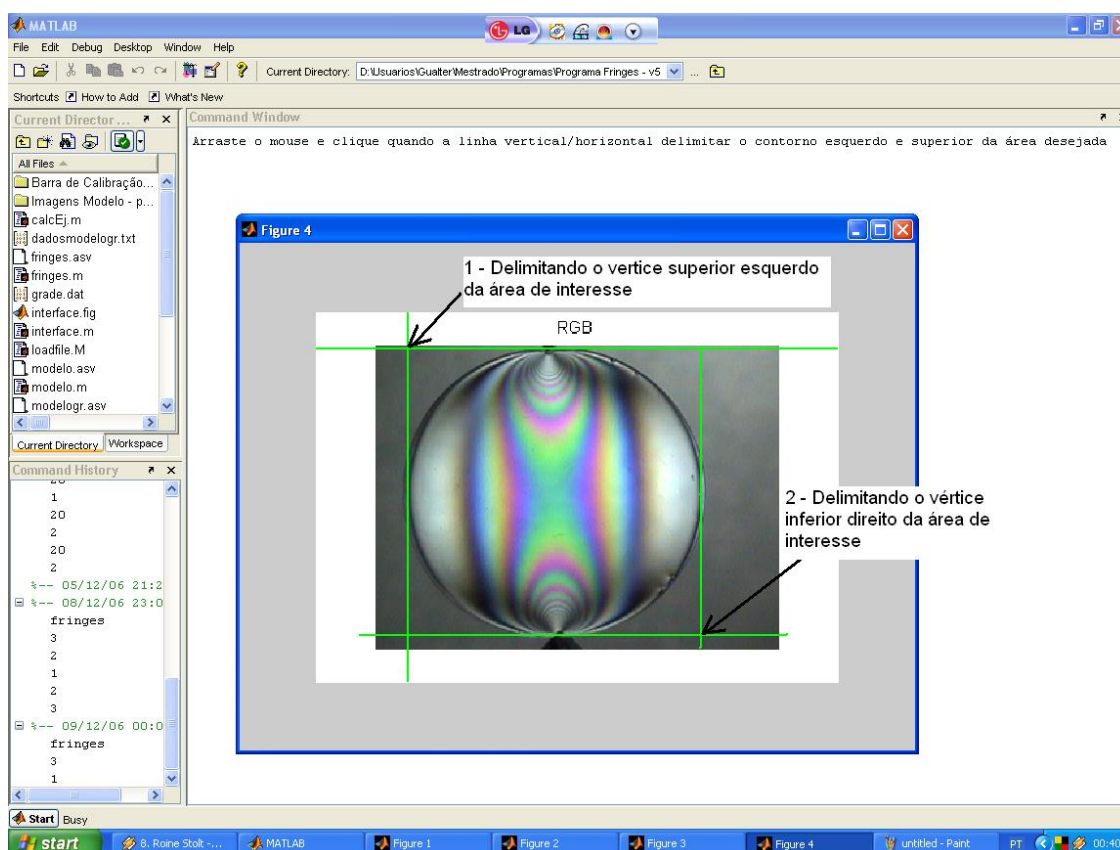


Figura 5.16 – Limitação das dimensões da imagem em pixel do disco de calibração.

A partir desse ponto, o programa “Fringes” solicitará que se selecione a imagem do modelo, semelhante ao que foi feito na Fig. 5.15, e que se delimite (Fig. 5.17) a área de interesse no modelo, que pode ser todo o modelo ou uma área definida pelo usuário. Essa área de interesse é a área que será gradeada e de onde serão calculados os resultados de ordem de franja, tensões cisalhantes e direções das tensões principais para os pontos definidos na grade.

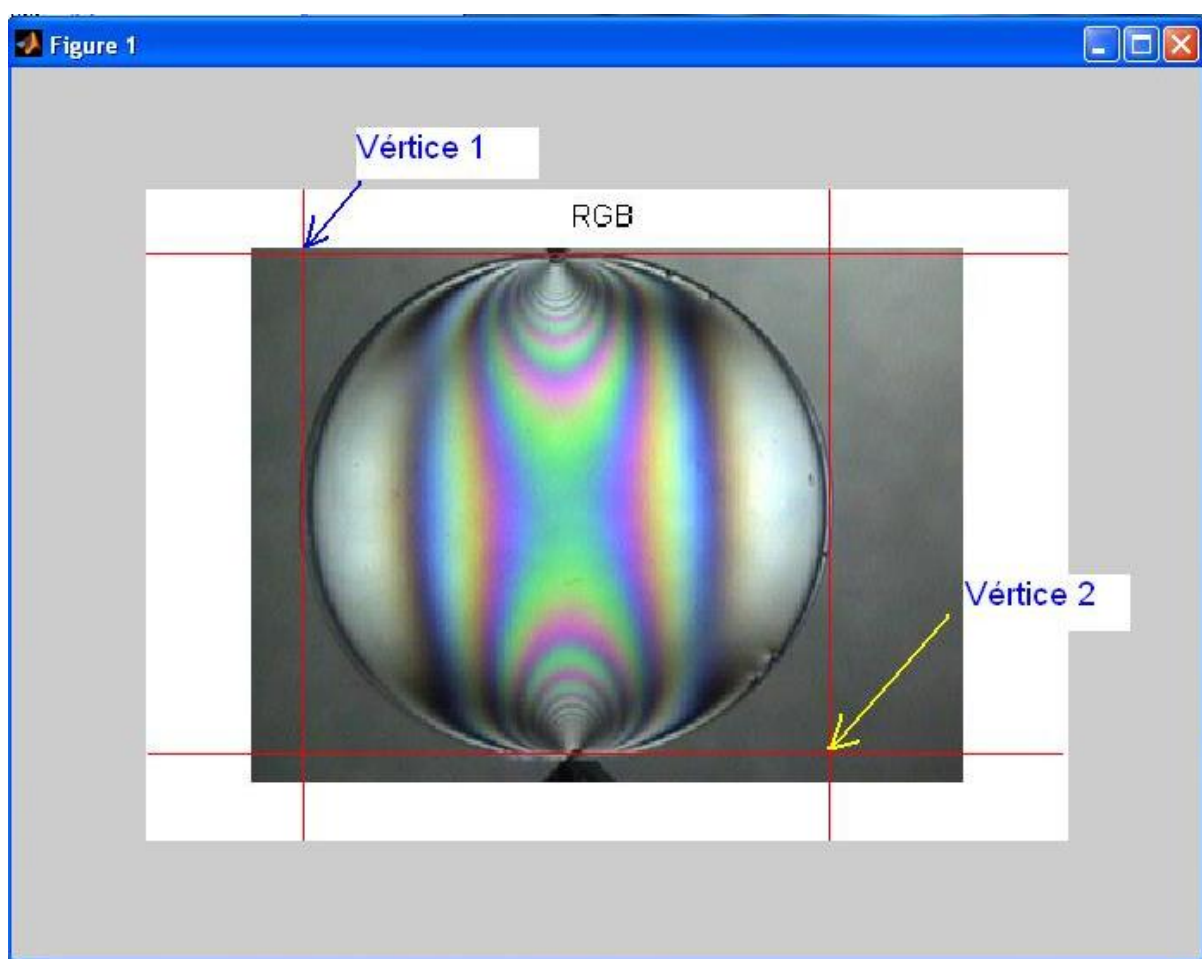


Figura 5.17 – Limitação da área de interesse no modelo.

Após a seleção da área de interesse, o programa gerará a planilha de resultados e exibirá o disco de calibração, mostrando os pontos utilizados para a calibração das direções das tensões principais, conforme a Fig. 5.18. A Tabela 5.3 exibe um exemplo de dados da planilha de resultados. A planilha de resultados é composta dos seguintes dados: número do ponto, valor da ordem de franja, tensão cisalhante e quatro valores de ângulos para os quais a Eq. 5.6 apresenta raízes. Estes quatro valores são 2 pares de ângulos da direção das tensões principais (ângulos ξ_1 e ξ_2 , correspondentes à σ_1 e σ_2 , respectivamente). Os 2 primeiros ângulos representam uma possível solução e os 2 últimos representam outra

solução possível. Essa situação ocorre porque a Eq. 5.6 é senoidal e terá, na maioria dos casos, 2 raízes, sendo estas os valores de ângulos obtidos. No estágio atual de desenvolvimento do programa, ainda não é possível automatizar a determinação de qual das 2 soluções é a aceitável, cabendo ao operador, a seleção da solução que atenda à suas necessidades.

Tabela 5.3 – Exemplo de resultados finais gerados no programa Fringes.

Número de ponto	Ordem de franja	Tensão Cisalhante (KPa)	Solução A		Solução B	
			Fi 1 (graus)	Fi 2 (graus)	Fi 1 (graus)	Fi 2 (graus)
1	1.569231	30.86154	2.445831	87.55417	14.44565	75.55435
2	1.569231	30.86154	0.833588	89.16641	12.8334	77.1666
3	1.523077	29.95385	0.711365	89.28864	12.78946	77.21054
4	1.523077	29.95385	1.18515	88.81485	13.26324	76.73676
5	1.476923	29.04615	2.643585	87.35641	14.79446	75.20554
6	2.4	47.2	1.446075	88.55392	13.65738	76.34262
7	2.123077	41.75385	0.201874	89.79813	12.77435	77.22565
8	2.030769	39.93846	0.571289	89.42871	11.98746	78.01254
9	2.076923	40.84615	0.315857	89.68414	12.90344	77.09656
10	2.215385	43.56923	2.359314	87.64069	14.83978	75.16022
11	2.769231	54.46154	2.606506	87.39349	9.53064	80.46936
12	2.353846	46.29231	0.937958	89.06204	13.22891	76.77109
13	2.261538	44.47692	1.119232	88.88077	13.55301	76.44699
14	2.353846	46.29231	1.443329	88.55667	13.73428	76.26572
15	2.630769	51.73846	0.947571	89.05243	13.01056	76.98944
16	2.169231	42.66154	0.042572	89.95743	12.48871	77.51129
17	2.030769	39.93846	1.682281	88.31772	10.87646	79.12354
18	2.030769	39.93846	1.042328	88.95767	11.51642	78.48358
19	2.076923	40.84615	0.015106	89.98489	12.60269	77.39731
20	2.307692	45.38462	3.236847	86.76315	15.60333	74.39667
21	1.384615	27.23077	0.936584	89.06342	13.21655	76.78345
22	1.430769	28.13846	0.565796	89.4342	11.651	78.349
23	1.430769	28.13846	0.050812	89.94919	12.16599	77.83401
24	1.476923	29.04615	0.907745	89.09225	13.05862	76.94138
25	1.523077	29.95385	2.665558	87.33444	14.74365	75.25635

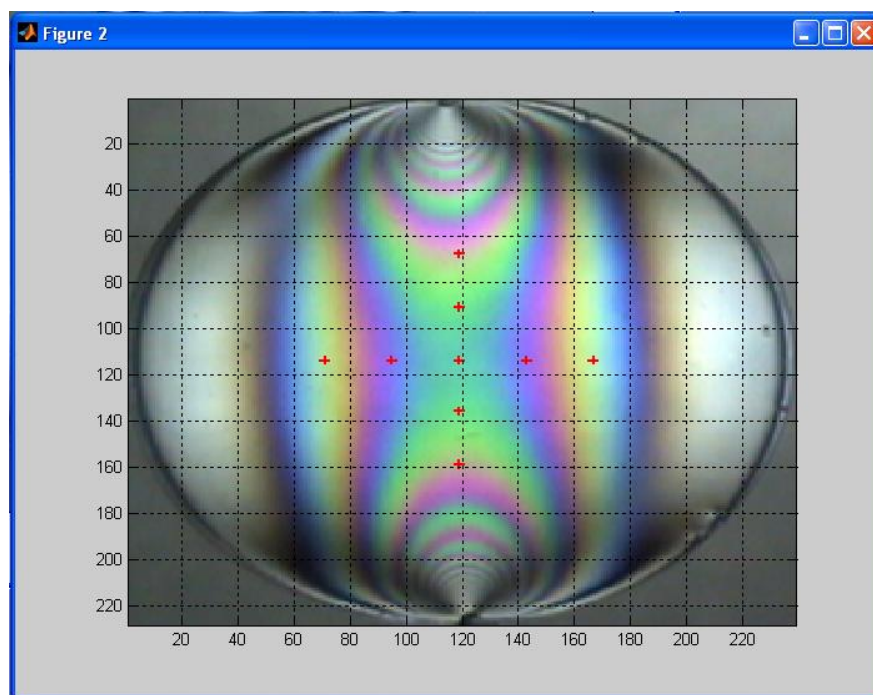


Figura 5.18 – Grade dos pontos geradores da tabela de calibração das direções principais.

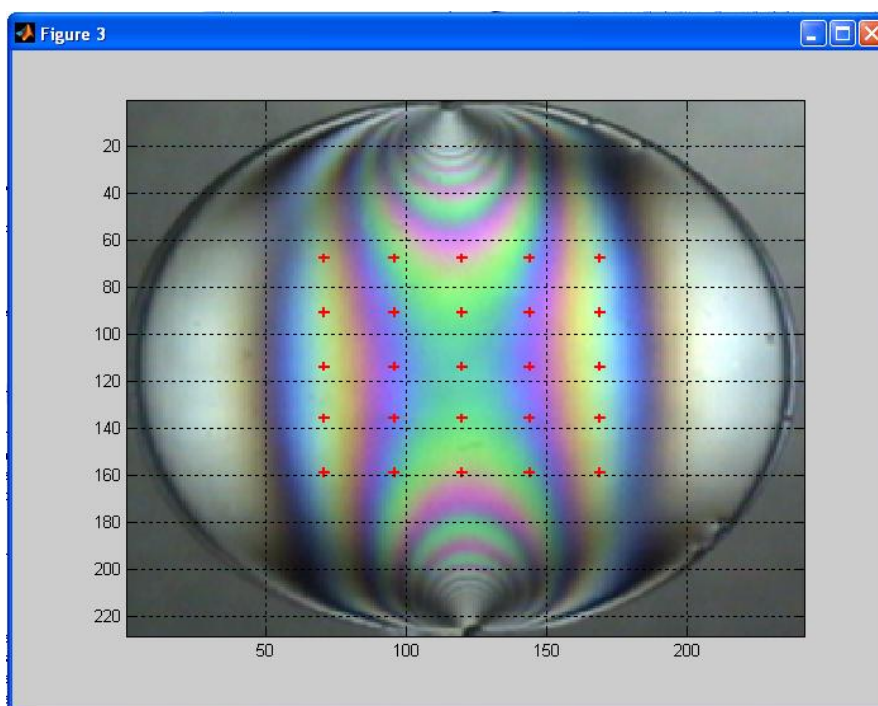


Figura 5.19 – Pontos de análise definidos no disco sob compressão.

Opção por Geração Automática da Grade de Pontos:

Se o usuário optar pela geração automática da grade, o sistema fará uso do arquivo de dados *ordemcal.dat*, que deverá ser editado previamente para ajuste dos valores dos pontos, caso se mude de imagem do disco de calibração ou a quantidade de pontos na grade de calibração.

Um exemplo de dados do arquivo *ordemcal.dat* é exibido na Tab. 5.4.

Tabela 5.4 – Exemplo de dados do arquivo *ordemcal.dat*

Conteúdo	Significado
39.5,0,0	Diâmetro do disco, 0 (não alterar), 0 (não alterar)
11.75,19.75,0	Vértice superior esquerdo (abscissa e ordenada), 0 (não alterar)
19.75,11.75,0	Vértice inferior direito (abscissa e ordenada), 0 (não alterar)
1,1,2	Ponto 1, 1 = ordem de franja 1, 2 = ordem de franja 2
2,1,2	Ponto 2, 1 = ordem de franja 1, 2 = ordem de franja 2
3,1,2	...
4,2,3	Ponto 4, 2 = ordem de franja 2, 3 = ordem de franja 3
...	
21,2,3	Ponto 21, 2 = ordem de franja 2, 3 = ordem de franja 3
22,2,3	...
23,2,3	Manter a lógica dos registros anteriores
24,2,3	
25,2,3	
....	
77,1,2	
78,1,2	Último ponto.

Nesse ponto, o programa Fringes perguntará o número de pontos que o usuário pretende gerar na grade de calibração da direção das tensões principais. O número de pontos envolverá pontos na vertical e na horizontal que passa pelo centro, aos quais são somados igual número de pontos em linhas paralelas em ambos os lados dessas duas linhas. Estas linhas estarão separadas de aproximadamente 1 mm entre si.

Os dados dos pontos da grade de calibração das direções das tensões principais são salvos em uma planilha Excel®, denominada “gradecal.xls”.

O programa solicitará que se selecione o arquivo da imagem do disco de calibração como na Fig. 5.15. Os limites da imagem deverão ser definidos como mostrado na Fig. 5.16, quando então o programa exibirá a imagem do disco com a grade dos pontos de calibração.

Essa grade de pontos (Fig 5.20) tem por objetivo corrigir imperfeições na imagem do disco de calibração, pois se utilizará uma média dos valores dos pontos para calibrar a direção das tensões principais.

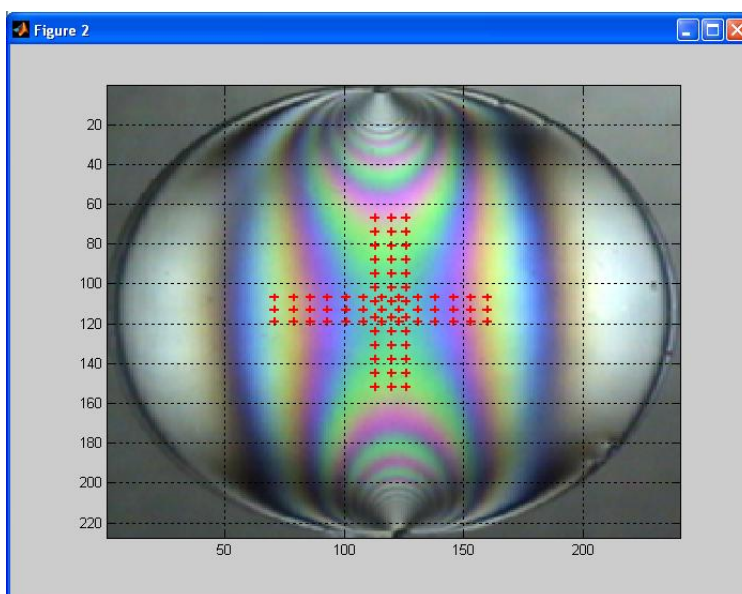


Figura 5.20 – Exemplo de grade de pontos para calibração da direção das tensões principais.

A seguir o programa Fringes solicita as dimensões horizontal e vertical do modelo ou região a ser analisada, número de pontos na grade nas direções x e y, abscissa do primeiro ponto da grade, ordenada do primeiro ponto da grade (a origem dos eixos está posicionada no vértice superior esquerdo da imagem), constante ótica do material e espessura do modelo. A grade de pontos a serem analisados será salva numa planilha Excel®, denominada “gradefinal.xls”.

No passo seguinte, o programa solicitará que se selecione a imagem do modelo e se delimite a região de interesse do modelo, na qual o programa gerará a grade de pontos, salvando os resultados em uma planilha Excel® denominada “tabelaresultados2.xls”. Esta planilha contém: número do ponto, ordem de franja, tensão cisalhante, ângulos da direção das tensões principais.

Ao final, o programa exibirá o modelo, com os pontos calculados indicados para conferência do usuário. Na Figura 5.21 é mostrado um exemplo de imagem com os pontos assinalados, quando se opta por selecionar uma região dentro do modelo. Na Tabela 5.5 é mostrado um exemplo para o conteúdo da planilha de resultados para esse mesmo caso.

Deve-se destacar que existem dois possíveis valores da direção das tensões principais obtidos da solução da Eq. 5.9, conforme mostrado na Tab. 5.5. Estas soluções devem ser levadas em consideração na comparação com os valores exatos.

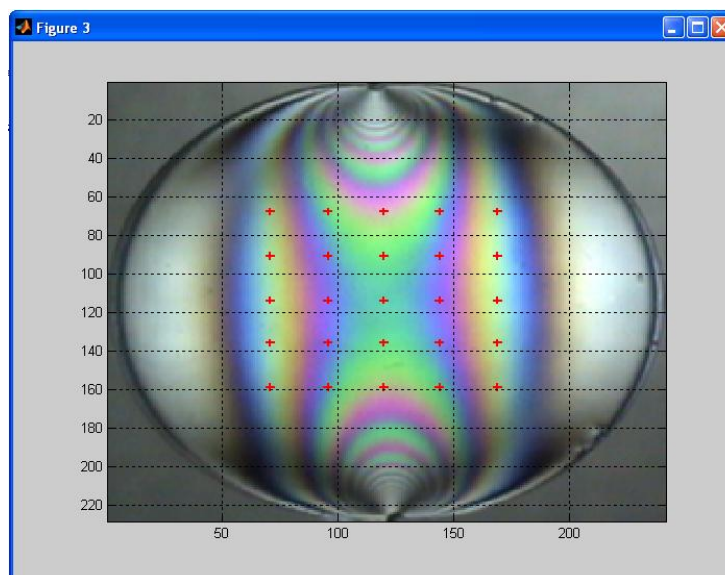


Figura 5.21 – Grade dos pontos calculados no modelo (o disco foi tomado como modelo).

Tabela 5.5 – Conteúdo do arquivo de resultados

Número Ponto	Ordem de Franja	Tensão Cisalhante (KPa)	Solução A		Solução B	
			Fi 1 (graus)	Fi 2 (graus)	Fi 1 (graus)	Fi 2 (graus)
1	1.569231	30.86154	2.409439	87.59056	14.93248	75.06752
2	1.523077	29.95385	0.793076	89.20692	13.38753	76.61247
3	1.476923	29.04615	0.593948	89.40605	13.25157	76.74843
4	1.476923	29.04615	1.102066	88.89793	13.75832	76.24168
5	1.384615	27.23077	3.304825	86.69518	16.06956	73.93044
6	1.430769	28.13846	2.770615	87.22939	15.48729	74.51271
7	1.107692	21.78462	0.254745	89.74525	13.36143	76.63857
8	1.984615	39.03077	0.637894	89.36211	12.35344	77.64656
9	1.107692	21.78462	0.709305	89.2907	13.81737	76.18263
10	1.2	23.6	3.77449	86.22551	16.80702	73.19298
11	1.8	35.4	3.295212	86.70479	9.211349	80.78865
12	1.476923	29.04615	2.089462	87.91054	14.74709	75.25291
13	1.246154	24.50769	1.923294	88.07671	14.88853	75.11147
14	1.476923	29.04615	2.430038	87.56996	15.08629	74.91371
15	1.661538	32.67692	0.963364	89.03664	13.41774	76.58226
16	1.153846	22.69231	0.265732	89.73427	13.3532	76.6468
17	1.984615	39.03077	1.456375	88.54362	11.53496	78.46504
18	1.984615	39.03077	0.901566	89.09843	12.08977	77.91023
19	1.107692	21.78462	0.328903	89.6711	13.43559	76.56441
20	1.292308	25.41538	143231	143141	143231	143141

21	1.384615	27.23077	1.008682	88.99132	13.77342	76.22658
22	1.430769	28.13846	0.473099	89.5269	12.24358	77.75642
23	1.476923	29.04615	0.154495	89.8455	12.50313	77.49687
24	1.523077	29.95385	0.606308	89.39369	13.20076	76.79924
25	1.569231	30.86154	2.637405	87.36259	15.16045	74.83955

Opção por Seleção Ponto a Ponto no Modelo:

Se a opção tomada for pela seleção visual dos pontos de análise, o programa Fringes executará a calibração das direções principais como nas opções anteriores e exibirá a imagem dos pontos usados para esta calibração.

No passo seguinte, o sistema solicitará o número de pontos que o usuário pretende analisar no modelo, a constante ótica, a espessura do modelo. Ao se concluir a entrada desses dados, o programa solicitará que se selecione a imagem do modelo, onde o usuário deverá, com o uso do mouse, selecionar a região a ser analisada.

Esta área é selecionada com dois cliques (pontos 1 e 2) sobre a imagem, com o intuito de delimitar um retângulo, assim como mostra a (Fig. 5.22). Igualmente à etapa de seleção da área na barra de calibração, as linhas azuis delimitam a área selecionada.

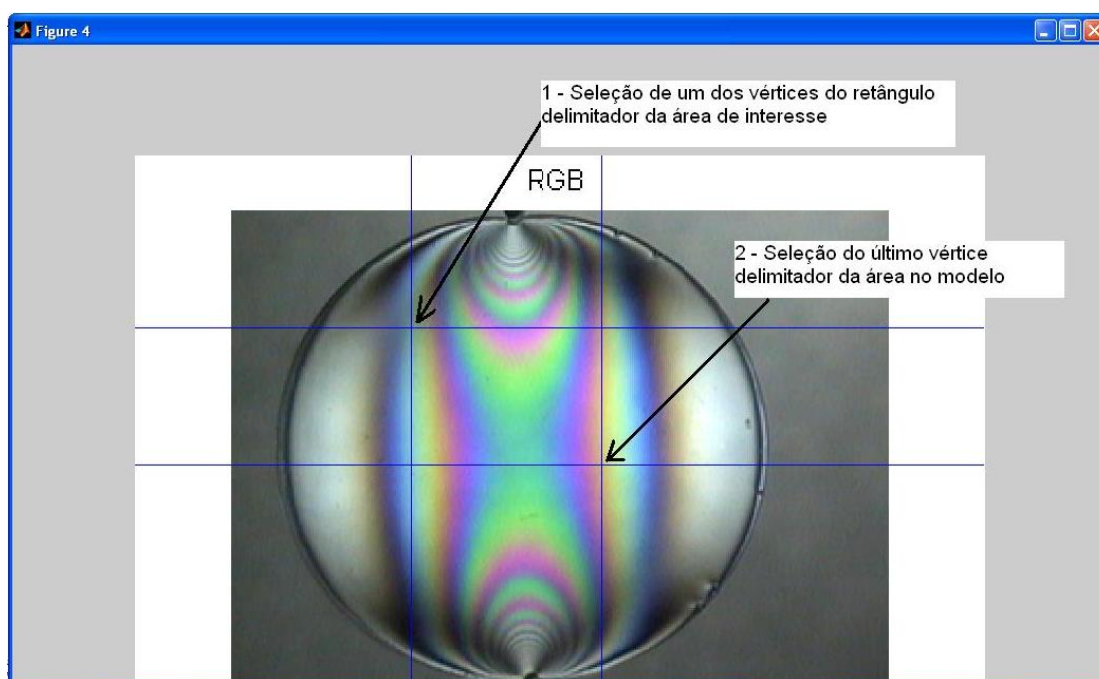


Figura 5.22 – Delimitação da área de interesse no arquivo da imagem fotoelástica do modelo

Nesse passo, o programa *Fringes* executará automaticamente um processo de filtragem dos ruídos na região selecionada. Concluída a filtragem, passará a ser exibida uma nova janela, conforme mostrado na Fig. 5.23, onde o usuário deverá clicar com o mouse nos pontos onde lhe interesse fazer a análise, conforme o exemplo mostrado na Fig. 5.17.

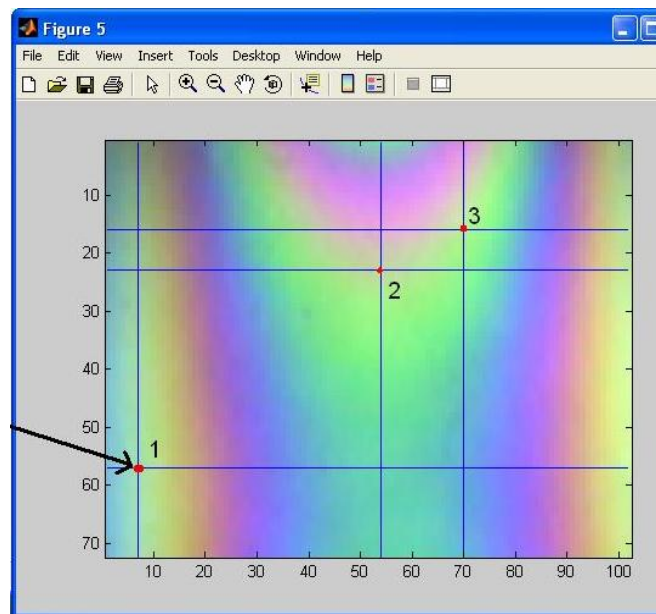


Figura 5.23 – Seleção dos pontos de interesse na imagem filtrada da área de interesse.

Após a seleção dos pontos, e em retorno à tela do prompt do Matlab®, o programa solicitará para cada ponto selecionado, que o usuário forneça as seguintes entradas de dados:

Mensagem no Prompt Matlab	Ação a ser tomada
>> Entre com a menor ordem de franja inteira no ponto de interesse =	O usuário deverá digitar o valor da menor ordem de franja mais próxima do ponto.
>> Entre com a maior ordem de franja inteira no ponto de interesse =	O usuário deverá digitar o valor da maior ordem de franja mais próxima do ponto.

Um exemplo de uma possível entrada de dados seria a mostrada abaixo.

Para o ponto 1 selecionado, tem-se:

>> Entre com a menor ordem de franja inteira no ponto de interesse = 0

>> Entre com a maior ordem de franja inteira no ponto de interesse = 1

Para o ponto 2, tem-se:

>> Entre com a menor ordem de franja inteira no ponto de interesse = 1

>> Entre com a maior ordem de franja inteira no ponto de interesse = 2

Após a entrada dos valores solicitados, o sistema obterá para cada ponto, as seguintes informações: ordem de franja do ponto, a tensão cisalhante máxima e a direção das tensões principais salvando os resultados em uma planilha Excel® denominada “tabelaresultados3.xls”.

É possível que o sistema não obtenha a saída esperada, exibindo uma tela como mostrado na Fig. 5.24. Erros dessa natureza indicam que os valores de ordem de franja selecionados no modelo excedem os valores máximos da tabela de calibração. Para se evitar esse erro, deve-se iniciar novamente o programa Fringes e selecionar uma área mais ampla para a montagem da tabela de calibração (Fig. 5.7). Caso a imagem da barra de calibração não apresente ordens de franja suficientes, será necessário obter imagens da barra de calibração com ordens de franja maiores, pois o programa “Fringes” não extrapola os valores da tabela de calibração.

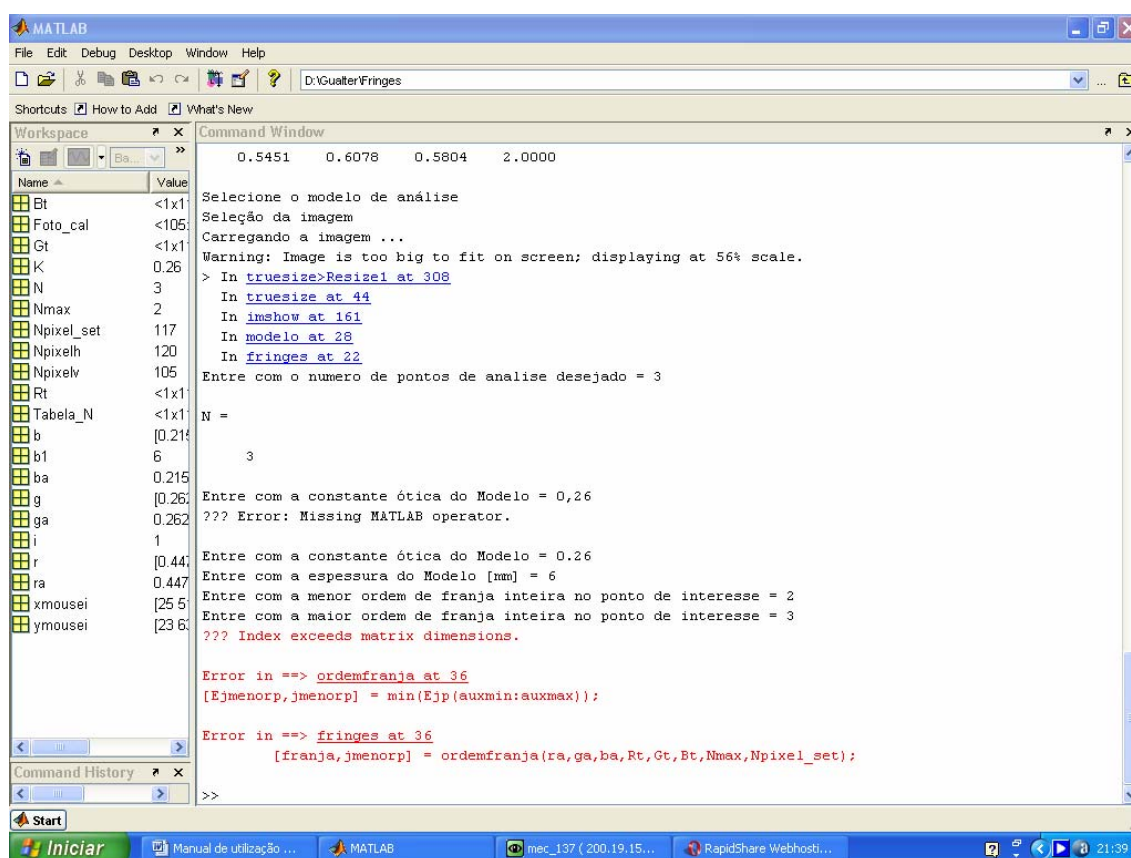


Figura 5.24 – Tela de mensagem de erro (tabela de calibração menor do que necessário).

CAPÍTULO VI

MODELAGEM EXPERIMENTAL

Neste capítulo, são descritos os materiais e métodos utilizados para a análise do gradiente de tensões no parafuso de pilar, utilizando a técnica de fotoelasticidade de transmissão plana. Também são descritos os procedimentos experimentais para a análise automatizada dos parâmetros fotoelásticos, bem como os critérios técnicos e a metodologia implementada utilizada para avaliar o programa desenvolvido.

6.1 Avaliação do Programa Computacional “Fringes”

6.1.1 *Comentários Gerais*

No capítulo 5 foi apresentado o programa computacional desenvolvido em ambiente Matlab para o cálculo dos parâmetros fotoelásticos de forma automatizada. O método implementado utiliza de luz polarizada elíptica com uma configuração pré-definida de montagem do polariscópio.

Para a determinação das ordens de franja do modelo analisado é preciso utilizar uma barra confeccionada do mesmo material fotoelástico que o modelo que está sendo submetido a uma flexão a 4 pontos.

Neste trabalho foi introduzido um novo procedimento para melhorar a precisão das direções das tensões principais identificadas. Neste caso foi utilizado um modelo de um disco submetido à compressão para calibrar os valores RGB do modelo do disco com o modelo da barra em flexão. Os valores calibrados foram avaliados em uma equação não linear cuja solução foi obtida utilizando o método numérico da bissecção. As Eqs. 5.7 a 5.9 representam esse novo critério aplicado. Sua aplicação faz com que a Eq. 5.6 alcance uma convergência e possa permitir a obtenção dos valores dos ângulos das direções principais de tensão.

6.1.2 Confeção dos Modelos Fotoelásticos

Para a validação e implementação do programa de automatização da leitura dos parâmetros fotoelásticos, foram utilizados os seguintes modelos fotoelásticos: 01 barra e 01 disco.

Os modelos fotoelásticos foram obtidos a partir de moldes confeccionados no LPM. Os moldes utilizados foram produzidos a partir de uma mistura de silicone azul e um agente catalisador, ambos fabricados pela empresa Polipox. Utilizou-se nessa mistura a proporção de 3% em volume do agente catalisador. Ao silicone, colocado num recipiente na quantidade previamente determinada, foi adicionada de forma gradual a quantidade calculada do agente catalisador. Essa mistura foi homogeneizada lentamente, evitando-se a formação de bolhas por cerca de 2 minutos, até o início de sua cura, momento no qual deve ser feita a deposição da mistura em um recipiente preparado previamente para a confecção do molde. Este recipiente consistiu de caixas retangulares de papelão com dimensões que permitissem a colocação e fixação por meio de cola comum os modelos a serem produzidos. Os modelos (disco e barra) foram fixados no fundo do recipiente, com sobras de aproximadamente 1 cm de cada lado. A mistura, após chegar ao momento adequado, foi colocada a partir do fundo do recipiente, cuidando-se para não aprisionar ar nas arestas e cantos deste. Após serem preenchidas estas partes, o resto da mistura foi distribuída igualmente no recipiente. Ao final do enchimento do recipiente foram realizados leves impactos, de forma a facilitar a liberação de possíveis bolhas de ar aprisionadas na mistura. O recipiente foi deixado em descanso, à temperatura ambiente, por um período de 3 horas, findo o qual foi feita a desmontagem deste e a retirada cuidadosa do corpo da cavidade do molde, ficando assim pronto o molde para sua utilização. As Figuras 6.1a e 6.1b mostram o molde na forma final e em sua desmontagem.



Figura 6.1a – Molde de silicone na forma final.



Figura 6.1b – Desmontagem da forma e finalização do molde de silicone.

Após a produção dos moldes, foram produzidos os modelos fotoelásticos a partir de uma mistura de resina epoxy (componente A) e o agente catalisador (componente B) do

fabricante Polipox. Utilizou-se a proporção de uma parte em volume do catalisador para duas partes em volume da resina. Os produtos utilizados são mostrados na Fig. 6.2.



Figura 6.2 – Recipientes dos Componentes A e B (Fabricante Polipox), para a produção dos modelos fotoelásticos.

Para a obtenção dos modelos fotoelásticos, foram utilizados os seguintes elementos auxiliares: recipiente para preparação da mistura, recipientes para dosagem dos produtos químicos graduados em volume, uma barra de vidro com seção circular para mistura das resinas e o molde produzido previamente. Ao molde, antes da colocação da mistura das resinas, é aplicado através de um pincel, um produto isolante (Cel-lac) utilizado para facilitar a desmontagem dos corpos de prova. A Figura 6.3 mostra o produto utilizado para esse fim.



Figura 6.3 – Isolante utilizado para facilitar a desmontagem dos corpos de prova.

No presente trabalho, foram testadas algumas proporções para a mistura dos componentes *A* e *B*. Cada uma delas apresentou características que foram avaliadas quanto às vantagens e facilidades na análise fotoelástica. As proporções foram testadas, sendo que a proporção de 2 partes do componente *A* para 1 parte do componente *B* foi a combinação que apresentou um conjunto de características mais favoráveis: boa resposta ótica, demora razoável em apresentar efeito de borda e suficiente rigidez mecânica para suportar as cargas de teste sem apresentar grandes deflexões ou torção ao longo de seu(s) eixo(s). Essa proporção foi então selecionada para a realização do trabalho.

O procedimento geral para a produção dos corpos de prova foi o seguinte:

- a) Primeiramente determinou-se o volume final necessário da resina para a produção do corpo de prova. Utilizou-se para a produção dos corpos de prova a proporção definida anteriormente. Não se constatou perda significativa de volume da mistura dos produtos na obtenção dos corpos de prova utilizados;
- b) Através de um recipiente dosador, separou-se a quantidade necessária do componente *A*, colocando-o num recipiente próprio para o preparo da mistura. Foi feita a adição gradual do componente *B*, sendo realizada a mistura dos produtos por aproximadamente 15 minutos, procurando-se evitar a formação de bolhas. O preenchimento dos moldes foi feito lentamente, na temperatura ambiente. A seguir, os moldes foram deixados em uma estufa na temperatura de 50 °C por um período de 6 horas a fim de completar a cura. Nas Figuras 6.4a e 6.4b são mostrados dois corpos de prova obtidos: a barra prismática e o disco, acima dos respectivos moldes. Deve-se destacar que os modelos foram colocados na temperatura de 50° C para acelerar o processo de cura, uma vez que não existem partes metálicas presentes nos modelos. Para modelos com partes metálicas inseridas, o processo da cura deve ser ocorrer na temperatura ambiente por 48 horas.



Figura 6.4 a) – Barra prismática e molde em silicone azul.

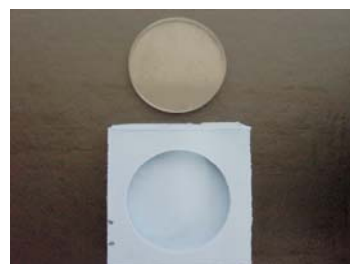


Figura 6.4 b) – Disco (modelo) e molde em silicone azul.

6.1.3 Calibração dos Modelos Fotoelásticos

A metodologia desenvolvida foi avaliada através da utilização de um disco confeccionado em material fotoelástico sujeito a uma força de compressão diametral, obtido conforme descrito no item 6.1.2.

Como mostrado no Capítulo 5, é necessária a utilização de uma barra confeccionada do mesmo material do disco para a obtenção da tabela de calibração. Neste caso, a barra prismática é sujeita a uma flexão em quatro pontos. A Figura 6.5 mostra as dimensões dos modelos utilizados na análise.

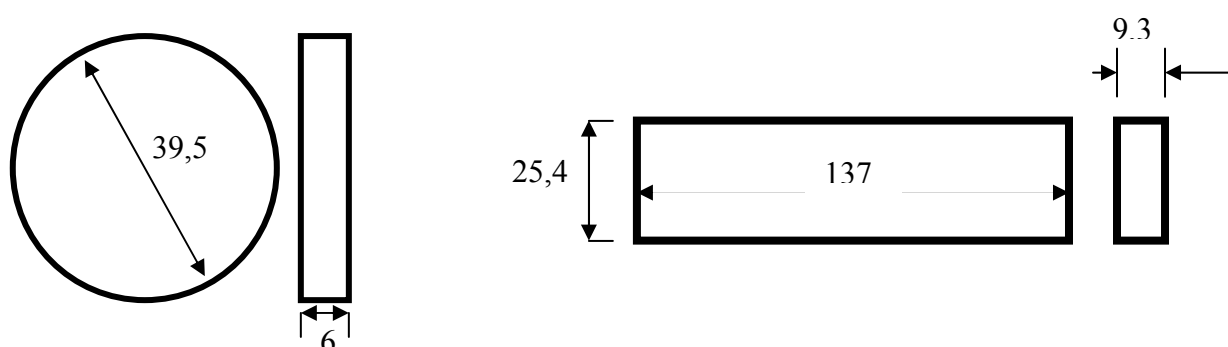


Figura 6.5 – Croqui com as dimensões dos modelos analisados: Disco e Barra. Dimensões em mm.

a) Calibração do Material Fotoelástico.

Para a realização dos experimentos, o modelo do disco foi colocado em um polariscópio desenvolvido no Laboratório de Projetos Mecânicos (LPM) da Faculdade de Engenharia Mecânica. A Figura 6.6 mostra o polariscópio e o indicador de carga Kratos (modelo IK-1A) utilizados no experimento. O disco foi posicionado em um dispositivo com pino para aplicar uma carga de compressão diametral, sendo que a carga aplicada no modelo foi controlada por uma célula de carga modelo Kratos de capacidade 50 KN incorporada ao dispositivo de aplicação da carga, conforme mostrado nas Figs. 6.6a e 6.6b. A constante ótica do material fotoelástico foi obtida por um processo convencional de calibração (ARAÚJO, NEVES E BERNARDES, 2004) utilizando um modelo de disco sob compressão. Apesar da constante ótica do material utilizado ser baixa, sua resposta ótica é excelente, mesmo para os baixos valores da carga aplicada, porque a “figura de mérito” da resina é alta (Dally & Rile, 1978).



Figura 6.6a – Polariscópio Vertical do LPM com o dispositivo de compressão diametral posicionado



Figura 6.6b – Detalhe do dispositivo de compressão diametral posicionado no modelo fotoelástico

Para a determinação da constante fotoelástica foram aplicados ao disco sob compressão diversos valores de carga. Os valores das ordens de franja para diversos valores de carga foram determinados no centro do disco, utilizando o método de compensação de Tardy. A Tabela 6.1 mostra os respectivos valores de carga e as ordens de franja determinadas pelo método de compensação de Tardy (Dally & Riley, 1978).

Tabela 6.1 – Valores de calibração do material utilizando o disco sob compressão.

Carga (F) aplicada (kgf)	0,05	0,15	0,2	0,35	0,45	0,5	0,6	0,8	0,9
Ordem de Franja (N)	0,25	0,48	0,64	1,01	1,19	1,47	1,73	1,99	2,28

Da Tabela 6.1 foi possível obter a curva de calibração para o disco do material fotoelástico utilizado, como mostrado na Fig. 6.7.

Uma reta foi interpolada aos pontos experimentais com a utilização do método dos mínimos quadrados, ou seja:

$$F = 0,3735N \quad (6.1)$$

Da Resistência dos Materiais (TIMOSHENKO, 1957), para um disco sob compressão com sistema de coordenadas cartesianas (x,y), mostrado na Fig. 6.8, tem-se que:

$$\sigma_x - \sigma_y = \frac{8F}{\pi h D} \times \frac{D^4 - 4D^2 x^2}{(D^2 + 4x^2)^2} \quad (6.2)$$

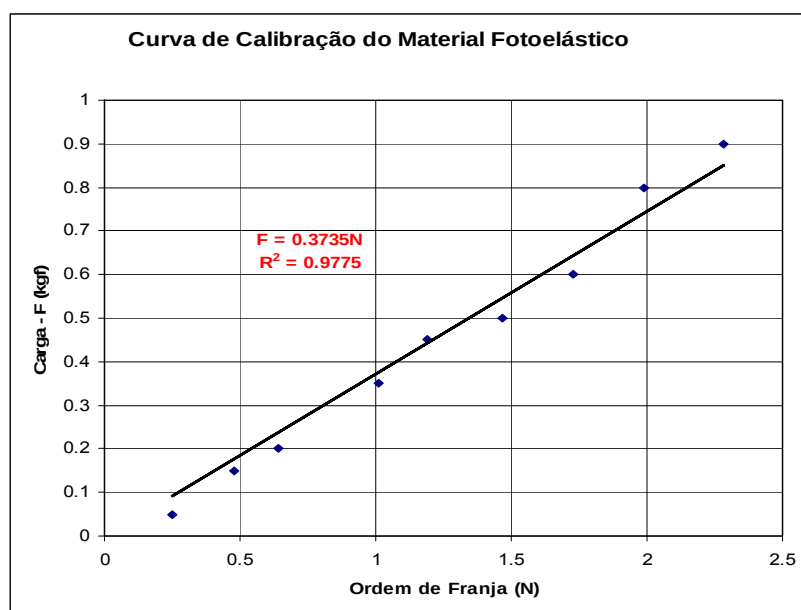


Figura 6.7 – Curva de calibração do material fotoelástico utilizado.

No centro do disco ($x = 0$) e utilizando a Lei Ótica das tensões, tem-se que:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{8F}{\pi h D} = \frac{N \cdot f_\sigma}{h} \quad (6.3)$$

Portanto,

$$f_\sigma = \left(\frac{8F}{N \pi D} \right) \quad (6.4)$$

Das Equações (6.1) e (6.4), tem-se que:

$$K_\sigma = \frac{8 \times 9,82 \times 0,3735}{\pi \times 39,5} = 0,236 \frac{N}{mm \text{ franja}} \quad (6.5)$$

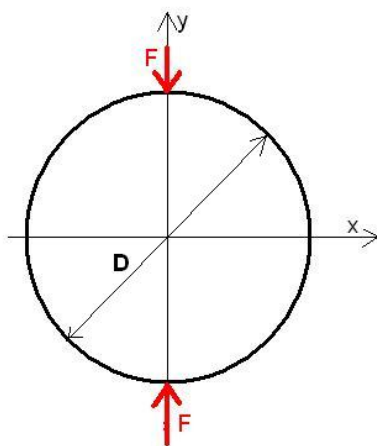


Figura 6.8 – Disco sobre compressão diametral.

b) Barra de calibração.

O modelo fotoelástico da barra de calibração foi submetido a uma flexão em quatro pontos. Este tipo de solicitação submete a seção da região central da barra a um momento fletor puro, ou seja:

$$M = P.d \quad (6.6)$$

A Figura 6.9 mostra, esquematicamente, a aplicação da força P na barra de calibração. Portanto, será observado um padrão de franjas constante ao longo da largura da barra dependendo da intensidade da carga P aplicada. Para a análise deste padrão de franjas, é necessário um dispositivo experimental adaptado a um polariscópio que possibilite uma polarização elíptica da luz. A Figura 6.10 mostra o esquema do arranjo experimental utilizado para determinar as imagens das ordens de franja da barra de calibração.

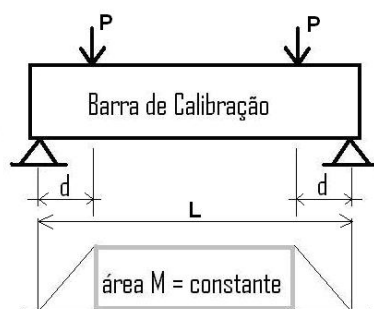


Figura 6.9 – Barra disposta no dispositivo de flexão a 4 pontos.

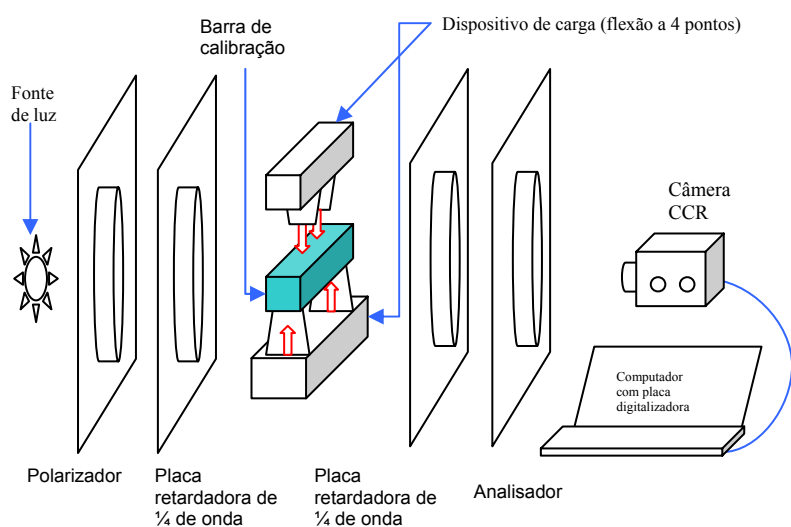


Figura 6.10 – Arranjo experimental para utilização do programa “Fringes”.

O procedimento para a obtenção dos valores consistiu em processo semelhante ao utilizado no polariscópio vertical, aplicando-se o método de compensação de Tardy. Foram geradas e armazenadas as imagens com o polariscópio ajustado para polarização circular e elíptica, visando fornecer os dados para teste e implementação do método de automatização. Para o ajuste de polarização elíptica foi adotado o ajuste dos ângulos no polariscópio indicado por Yoneyama e Takashi(1998), já mostrado na Fig. 4.5. As Figuras 6.11 a) e b) mostram a barra no dispositivo, submetida à flexão a 4 pontos.



Figura 6.11 a) – Barra de calibração montada no dispositivo de flexão a 4 pontos visualizada no polariscópio portátil do LTM.

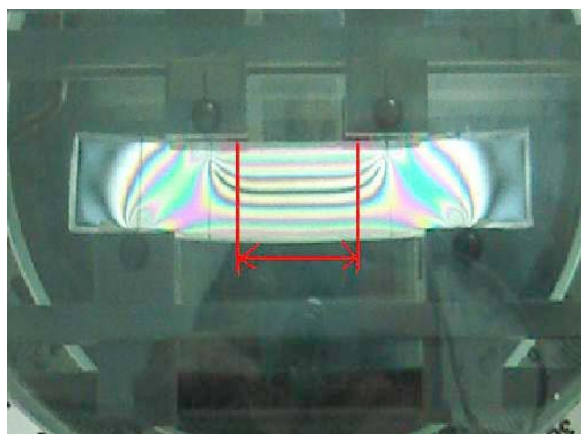
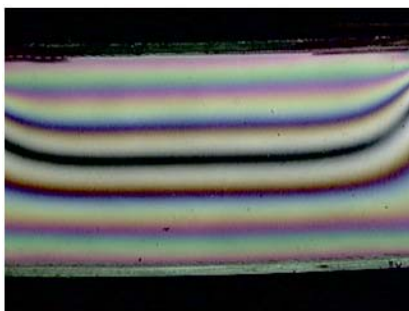
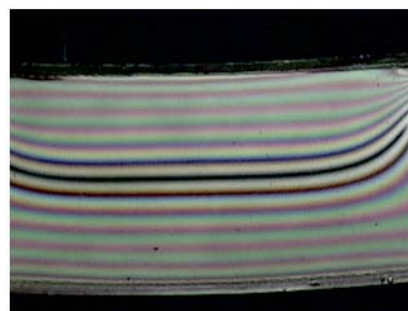


Figura 6.11 b) – A barra apresenta uma linearidade entre a posição do pixel e a ordem de franja na região indicada.

Foram realizadas aquisições de imagens da barra de calibração com o polariscópio ajustado para circular e elíptico, para ordens de franja variando de 2 a 5 na região central da barra. Algumas destas imagens estão apresentadas nas Figuras 6.12 e 6.13, que correspondem à polarização circular e elíptica, respectivamente.



N = 2



N = 5

Figura 6.12 – Barra de calibração com o polariscópio ajustado como circular

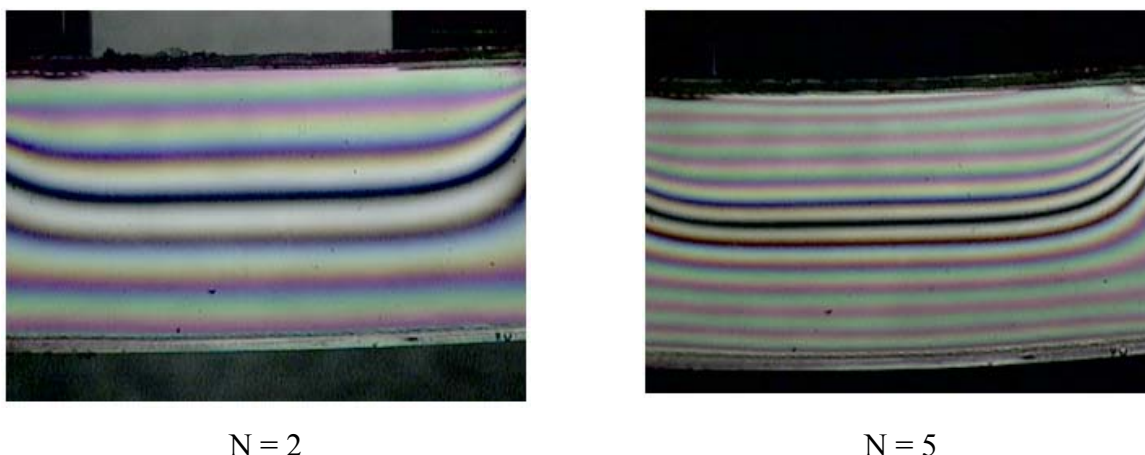


Figura 6.13 – Barra de calibração com o polariscópio ajustado como elíptico

c) Disco de Calibração

A direção das tensões principais é determinada pela Eq. 5.5, conforme discutido no Capítulo 5.

Dependendo da qualidade da imagem adquirida e da regulação do polariscópio utilizado na análise, os padrões RGB do modelo e da barra de calibração podem estar distorcidos e levar a erros na precisão dos resultados identificados, ou até mesmo à não convergência da solução final.

Neste trabalho foi proposta a utilização de um outro modelo de calibração para a direção das tensões principais. O modelo é um disco sob compressão, similar ao mostrado no item 6.1.2.

Neste caso, sabe-se que, em caso de polarização a 0 grau, a direção das tensões principais coincide com as direções x e y do sistema de coordenadas mostrado na Fig. 6.8, nos pontos ao longo dos diâmetros vertical e horizontal. Portanto, é possível utilizar este modelo de solução analítica conhecida para calibrar os parâmetros RGB do modelo do disco e da tabela de calibração.

A Figura 6.14 mostra o disco sob compressão com carga de 2,3 N.

A Tabela 6.2 mostra as coordenadas dos pontos e os valores de RGB do modelo do disco sob compressão e os respectivos valores ajustados obtidos da barra de calibração após a aplicação da metodologia descrita no Capítulo 5.