

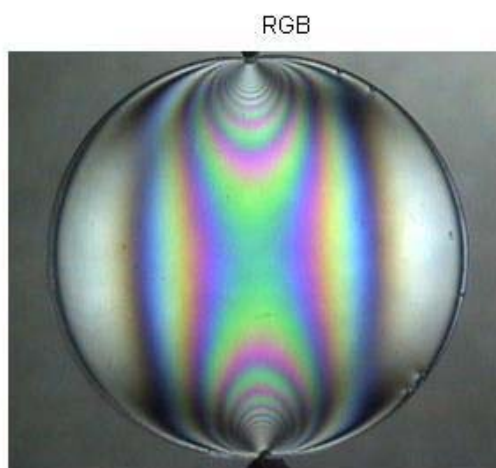


Figura 6.14 – Disco fotoelástico sob compressão diametral – carga 2,3N.

A Figura 6.15 mostra o mesmo disco analisado em 9 pontos espaçados de 4mm ao longo dos diâmetros horizontal e vertical.

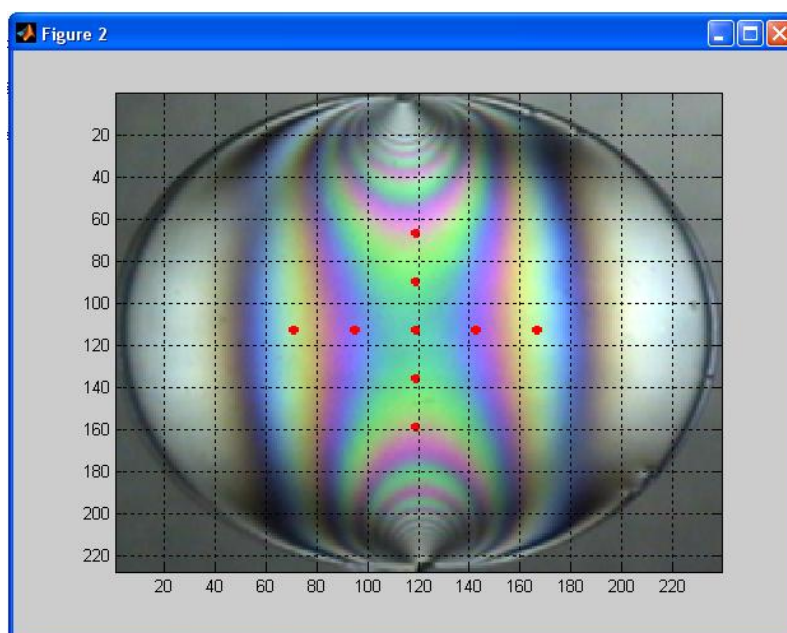


Figura 6.15 – Disco sob compressão com indicação dos 9 pontos nas linhas dos diâmetros.

Tabela 6.2 – Valores RGB

Ponto	Disco			Barra			Coordenadas (mm)	
	R	G	B	R	G	B	x	y
3	0.6863	0.8980	0.6353	0.6667	0.8980	0.6863	11.75	19.75
8	0.5098	0.4627	0.9843	0.5412	0.4549	0.9843	15.75	19.75
11	0.8863	0.7373	0.8196	0.8471	0.7569	0.7647	19.75	11.75
12	0.4549	0.9373	0.5765	0.4471	0.9373	0.5686	19.75	15.75
13	0.3765	0.8235	0.7137	0.3804	0.8196	0.7137	19.75	19.75
14	0.4314	0.8941	0.5804	0.4275	0.8941	0.5765	19.75	23.75
15	0.6941	0.6824	0.5804	0.6980	0.6902	0.5882	19.75	27.75
18	0.5961	0.4392	0.9882	0.5686	0.4510	1.0000	23.75	19.75
23	0.6980	0.9451	0.7882	0.7216	0.9569	0.7451	27.75	19.75

Utilizando as equações definidas no Capítulo 5, obtiveram-se os seguintes valores de calibração:

$$R_{aux} = 15.7476$$

$$G_{aux} = 15.8333$$

$$B_{aux} = 15.8551$$

$$G_{calt} = 1.1738$$

6.1.4 Modelo do Disco sob compressão e o programa “Fringes” desenvolvido.

O disco sob compressão foi o modelo também utilizado para avaliar o método implementado. Foram adquiridas as imagens do disco sob compressão diametral no polariscópio vertical ajustado como circular e elíptico. A Figura 6.16 apresenta algumas das imagens do disco, sob diferentes ângulos de polarização.

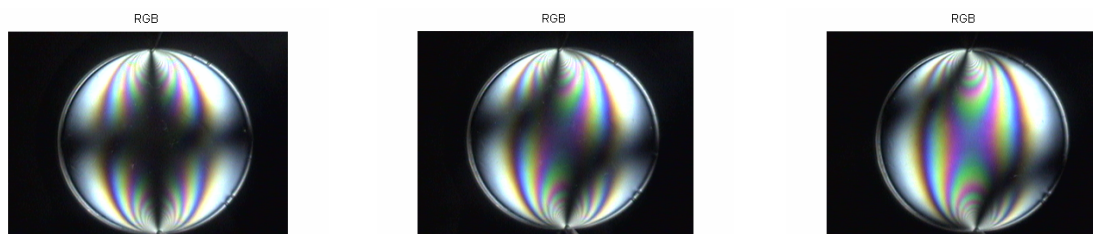


Figura 6.16 – Isoclínicas do disco com ângulo de polarização de 0, 10 e 20 graus.

Para ser feita a validação do método implementado, foi feita a leitura manual dos valores de ordem de franja e direção das tensões principais no disco sob compressão, de forma que se pudesse posteriormente comparar com os valores obtidos pelo procedimento de aquisição automatizada dos valores.

Com esse objetivo, adotou-se o seguinte procedimento: subdividiu-se o disco em uma grade de pontos separados de 4 mm no sentido vertical e horizontal, tomados a partir do centro. Foram marcados os pontos de intersecção no disco, o que resultou nos 25 pontos distribuídos conforme mostrado na Fig. 6.17.

A Figura 5.19, apresentada no Capítulo 5, mostra a grade experimental de pontos ajustada ao polariscópio vertical. As ordens de franja foram determinadas utilizando o método de compensação de Tardy.

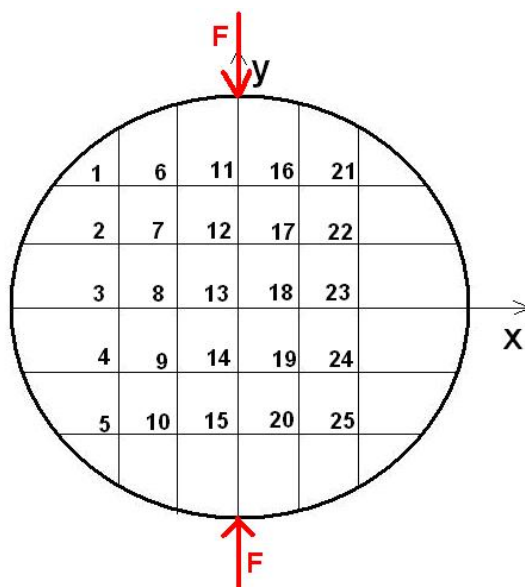


Figura 6.17 – Croqui do disco com os pontos de leitura manual definidos.

Para a aquisição das imagens dos modelos fotoelásticos, foi utilizado um polariscópio portátil desenvolvido no LPM. A este equipamento foi acoplado um indicador de sinal e uma célula de carga de 50 KN anteriormente utilizados no polariscópio vertical. A célula de carga foi conectada aos dispositivos de carga dos corpos de prova utilizados, de forma a permitir a medição dos esforços aplicados durante a aquisição das imagens.

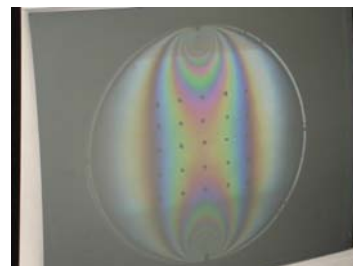
As imagens obtidas por uma câmera CCD foram adquiridas por um computador dotado de uma placa de aquisição de imagens (Proview). O arranjo resultante é apresentado nas Figs. 6.18. Na Fig. 6.19 são exibidas imagens tiradas durante a etapa da aquisição das imagens de isoclínicas e isocromáticas do disco fotoelástico, quando foi utilizado o arranjo descrito na Fig. 6.10.



Figura 6.18 – Arranjo do Polariscópio Portátil, indicador de carga, computador e câmera para aquisição da imagem dos modelos sob carga.



Isoclínicas



Isocromáticas – Pontos selecionados

Figura 6.19 - Esquema do Polariscópio Portátil na leitura do Disco.

6.2 Modelo Fotoelástico do Parafuso do Pilar

Foi confeccionado um modelo fotoelástico de um parafuso de pilar de um implante dentário da empresa Conexão Sistemas de Prótese Ltda.

Para facilitar a avaliação do gradiente de tensões no parafuso de pilar, foram utilizados modelos ampliados numa escala 3:1, conforme mostrado na Fig. 6.20.

O objetivo principal deste trabalho foi desenvolver uma ferramenta para permitir a automatização do processo de obtenção dos parâmetros fotoelásticos, segundo o método de Yoneyama & Takashi, complementando-se isso com uma avaliação do campo de tensões em um parafuso de pilar, com geometria similar ao modelo real, por meio da técnica da técnica da fotoelasticidade de transmissão plana. Para a aplicação dessa técnica, foi necessário produzir uma fatia do modelo fotoelástico 3D do pilar. A região selecionada para este caso compreendeu uma fatia compreendida entre 2 planos paralelos à linha de simetria

do parafuso e pilar (quando montados), de forma que esta estivesse entre esses planos citados. Com a fatia obtida, reproduziu-se a situação de acoplamento entre os 2 corpos de prova (o modelo do parafuso e o modelo do pilar), de forma que fosse possível a aplicação das cargas de prova e a obtenção das imagens fotoelásticas dos modelos. Este parafuso de pilar do qual foi tirada a fatia, possui dimensões conhecidas e poderá, através de técnicas de similitude, permitir obter os parâmetros para o modelo real.

O fatiamento na região central do modelo foi realizado para que se obtivesse um corpo de prova com espessura adequada à aplicação da carga. Este formato é requerido para a aplicação da técnica de fotoelasticidade utilizada no presente método. É importante que a região aproveitada na fatia possua os pontos de interesse para análise.

Devido ao baixo módulo de elasticidade da resina fotoelástica, o processo de fatiamento é extremamente trabalhoso e delicado, uma vez que a área útil de corte é muito pequena, cerca de 2 mm. Além disso, o processo de desmoldagem da resina fotoelástica, após a cura do molde de silicone, principalmente no furo interno do implante é delicado e exige experiência do usuário na preparação dessa etapa.

A produção dos modelos fotoelásticos do parafuso e do pilar revelou-se uma tarefa difícil, principalmente em decorrência das pequenas dimensões dos modelos utilizados. A geometria e as dimensões do pilar em especial, com suas roscas internas e externas, apresentaram na maioria das vezes (quando da desmontagem do molde), áreas nas quais a resina não havia completado os espaços necessários para dar a forma final do modelo, regiões onde uma bolha de ar havia sido aprisionada, etc...Isso tornava o modelo inutilizável, sendo necessário produzir outro novamente. Ocorreu também que, ao ser feita a retirada do modelo fotoelástico do molde de borracha silicone, muitas vezes este se rompia, sendo necessário que fosse feita novamente sua produção, o que demandava tempo, material e um certo grau de incerteza quanto ao produto final, pois os materiais para a produção da borracha também apresentavam alterações químicas ao longo do tempo, sendo necessário diferenciar os materiais “novos” daqueles que foram adquiridos há mais tempo, sob risco da borracha não apresentar homogeneidade nem resistência mecânica suficiente, pois em algumas situações ela não perdeu sua viscosidade, tornando-se imprestável para o fim pretendido.

Esses fatores e outros fatores afetaram a proposta inicial, que seria a de fazer a aplicação da ferramenta em uma maior quantidade de modelos produzidos. Como não foi possível ser obtida uma matriz do modelo real em escala maior e dado que muitos modelos foram perdidos pelos motivos citados no parágrafo anterior, foi utilizado apenas um modelo fotoelástico do conjunto parafuso/pilar para a validação da ferramenta computacional desenvolvida. A utilização de apenas um modelo fotoelástico (conjunto parafuso e pilar) não

permitiu a avaliação estatística dos resultados, servindo porém para fazer uma validação inicial da ferramenta desenvolvida. Assim sendo, não é possível afirmar que os resultados poderão concluir com a determinação dos valores de pré-carga diferentes dos padrões, mas é possível indicar, quando for possível obter-se uma maior quantidade de modelos testados, a forma de determinar-se estes valores. De qualquer forma, foram tomados todos os cuidados para se utilizar um dispositivo experimental que pudesse simular o comportamento dos filetes quando submetidos a uma certa pré-carga, excetuando o efeito das tensões tangenciais, devido ao torque aplicado aos filetes.

A confecção do modelo fotoelástico do parafuso de pilar foi feita da seguinte forma:

- a) Geração dos moldes 3D dos modelos do implante e do parafuso de pilar ampliados, em borracha de silicone azul. A obtenção desta borracha é descrita no item 6.1;
- b) Preparação do material fotoelástico, seguindo-se o procedimento do item 6.1;
- c) Inserção nos moldes de silicone, com preparação da resina fotoelástica e inserção nos moldes de silicone;
- d) Cura da resina: os moldes com o material fotoelástico foram deixados numa estufa, com o objetivo de agilizar o processo de cura e garantir maior rigidez mecânica da peça, de modo a facilitar sua usinagem posterior. As peças originais, os moldes gerados e os modelos fotoelásticos resultantes são mostrados na Fig. 6.20. A peça do pilar em material fotoelástico foi feita com uma extensão no comprimento da rosca, cuja função é simplesmente facilitar sua fixação para corte e, em etapa posterior, na célula de carga. Não foi considerada no presente trabalho a influência desta extensão na distribuição das tensões. A resina utilizada foi a mesma descrita no item 6.1;



Figura 6.20 – Moldes gerados, peças originais e modelos em resina fotoelástica.

- e) O parafuso de pilar foi aparafusado ao implante, conforme mostrado na Fig. 6.21;
- f) O conjunto foi fixado em um torno convencional onde foi fixado um disco de corte de aço rápido de espessura 5 mm. Utilizando alta rotação e álcool para refrigeração foi feito o processo de fatiamento da região próxima dos primeiros filetes do parafuso de pilar. Foi obtida uma fatia com 1,4 mm de espessura. De modo a facilitar o futuro tracionamento do conjunto no polariscópio, optou-se por cortar somente até 5 a 6 filetes do conjunto, deixando o resto do conjunto intacto. A Figura (6.22) mostra a etapa de corte dos modelos em resina fotoelástica;
- g) Separação das fatias das peças do conjunto, conforme Fig. (6.22);

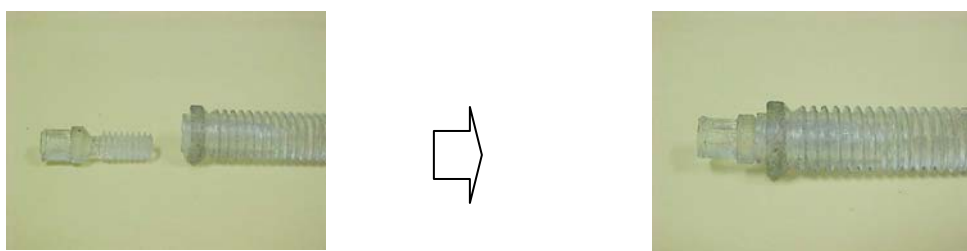


Figura 6.21 – Montagem do conjunto parafuso e pilar em resina fotoelástica.



Figura 6.22 – Corte do conjunto montado e geração das fatias das peças em resina fotoelástica.

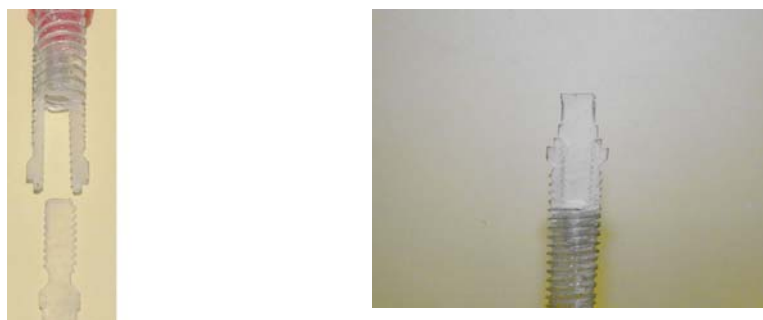


Figura 6.23 – Conjunto pilar/parafuso em resina fotoelástica, após o corte das fatias.

6.2.1 Leitura Automatizada dos Parâmetros Fotoelásticos nos Modelos do Pilar e Parafuso do Pilar.

Para simular a pré-carga aplicada ao parafuso de pilar, foi desenvolvido um dispositivo de carga capaz de fixar o implante e o parafuso de pilar e monitorar a carga aplicada. Não foram estudadas nem aplicadas cargas para simular a força de mastigação, sendo avaliado somente o efeito da pré-carga. O dispositivo é composto de uma haste em L livre, cujo vão central funciona como um anteparo para a cabeça do parafuso de pilar. Para permitir que a união dos filetes do parafuso de pilar e implantes ficassem nivelados e no plano foram adaptados anteparos laterais ao dispositivo de carga. Na outra extremidade, o implante dentário foi rosqueado a uma célula de carga de capacidade de 50 KN, que monitorava o valor de carga através de um analisador de sinais PEB-1350 da Kratos. A aplicação da carga era feita através de um parafuso adaptado à célula de carga. A Figura 6.24 a) mostra o dispositivo projetado com a célula de carga acoplada à extremidade aparafusada do pilar fotoelástico e a Fig. 6.24 b) mostra o outro extremo do dispositivo, com a haste em L retendo a cabeça do parafuso fotoelástico, com todo esse conjunto montado em um polariscópio vertical.



Figura 6.24 a) – Dispositivo de carga + célula de carga e modelos (no polariscópio vertical).

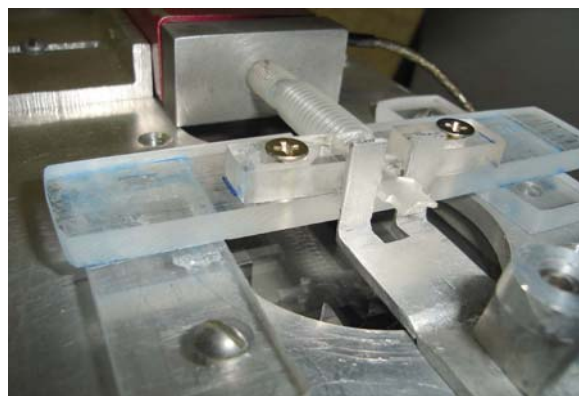


Figura 6.24 b) – Detalhe dos modelos no dispositivo de carga + haste em L (no polariscópio vertical).

Em uma união aparafusada, geralmente a região do pescoço do parafuso e os primeiros filetes são os mais solicitados, por isso, foram inicialmente definidos 11 pontos no perfil do parafuso do pilar próximos a estas regiões.

Os pontos podem ser vistos na Fig. 6.25, onde são assinalados por marcas pretas, estando o ponto 1 à esquerda, e os demais distribuídos sequencialmente à direita deste. Foi utilizada uma folha de transparência gradeada, já calibrada para leitura no polariscópio vertical, de forma que cada passo representa 1 mm.

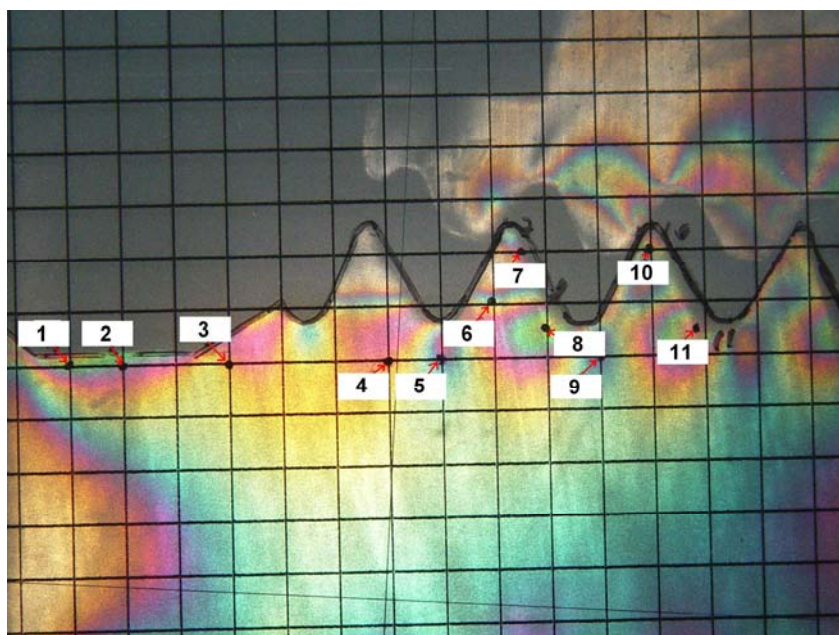


Figura 6.25 – Imagem fotoelástica do conjunto parafuso/pilar submetido à carga. Visão dos pontos de análise (indicados por números na figura).

CAPÍTULO VII

RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos das análises realizadas. Inicialmente, é feita a validação do programa computacional desenvolvido (programa “Fringes”) utilizando o modelo de um disco sob compressão, mostrado no Capítulo VI. As análises dos parâmetros fotoelásticos são feitas utilizando leituras experimentais ponto a ponto, uma formulação analítica e o programa “Fringes”.

Na sequência, é avaliado o campo de tensões no parafuso de pilar mostrado no Capítulo VI. São analisados os efeitos de pré-carga, torque máximo e os pontos críticos do modelo.

Neste trabalho a análise do gradiente de tensões foi feita em apenas um modelo fotoelástico do conjunto parafuso/pilar. Neste aspecto, a confirmação do gradiente de tensões obtido tem que ser feita utilizando uma quantidade maior de modelos. Esta análise completa será desenvolvida em futuros trabalhos, porém, os resultados permitem uma avaliação prévia do modelo.

7.1 Validação do Programa “Fringes”

7.1.1 Determinação das ordens de franja

O programa “Fringes” foi desenvolvido para determinar os parâmetros fotoelásticos de forma automatizada. O programa utiliza luz polarizada elíptica e dois modelos de calibração. O primeiro modelo de calibração é uma barra prismática confeccionada com o mesmo material do modelo a ser analisado. A Figura 7.1 mostra o modelo de uma barra de calibração submetida à flexão em quatro pontos, com ordem de franja máxima igual a 3.

A Tabela 7.1 mostra os parâmetros R, G e B para os valores de ordem de franja medidos ao longo da linha AB, a partir da franja zero, mostrada na Fig. 7.1.

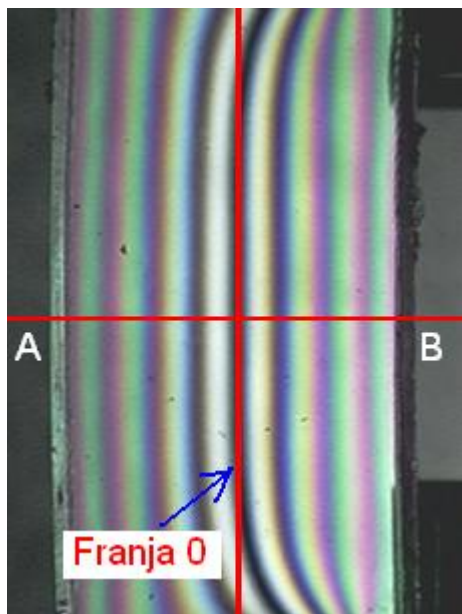


Figura 7.1 – Barra de calibração – ordem máxima útil = 3

Tabela 7.1 – Valores da Tabela de Calibração das ordens de franja, obtidos a partir da barra de calibração, com ordem de franja máxima N=3.

R	G	B	N
0.160784	0.184314	0.247059	0
0.196078	0.223529	0.262745	0.046154
0.27451	0.305882	0.317647	0.092308
0.364706	0.4	0.407843	0.138462
0.466667	0.509804	0.52549	0.184615
0.580392	0.635294	0.658824	0.230769
0.694118	0.752941	0.768627	0.276923
0.784314	0.843137	0.847059	0.323077
0.843137	0.901961	0.894118	0.369231
0.870588	0.937255	0.921569	0.415385
0.890196	0.952941	0.933333	0.461538
0.890196	0.941176	0.92549	0.507692
0.87451	0.909804	0.894118	0.553846
0.835294	0.870588	0.835294	0.6
0.768627	0.803922	0.741176	0.646154
0.666667	0.698039	0.619608	0.692308
0.572549	0.584314	0.505882	0.738462
0.498039	0.486275	0.427451	0.784615
0.431373	0.419608	0.384314	0.830769
0.388235	0.368627	0.360784	0.876923
0.364706	0.333333	0.364706	0.923077

0.356863	0.329412	0.4	0.969231
0.372549	0.368627	0.486275	1.015385
0.396078	0.423529	0.596078	1.061538
0.419608	0.490196	0.694118	1.107692
0.466667	0.580392	0.768627	1.153846
0.521569	0.682353	0.819608	1.2
0.576471	0.764706	0.843137	1.246154
0.635294	0.823529	0.854902	1.292308
0.698039	0.862745	0.854902	1.338462
0.733333	0.882353	0.831373	1.384615
0.733333	0.878431	0.784314	1.430769
0.717647	0.854902	0.713725	1.476923
0.701961	0.819608	0.643137	1.523077
0.701961	0.784314	0.584314	1.569231
0.698039	0.733333	0.537255	1.615385
0.666667	0.65098	0.501961	1.661538
0.631373	0.556863	0.470588	1.707692
0.596078	0.482353	0.443137	1.753846
0.556863	0.419608	0.439216	1.8
0.521569	0.384314	0.470588	1.846154
0.494118	0.368627	0.509804	1.892308
0.466667	0.368627	0.54902	1.938462
0.443137	0.380392	0.603922	1.984615
0.427451	0.4	0.647059	2.030769
0.415686	0.435294	0.662745	2.076923
0.411765	0.498039	0.666667	2.123077
0.419608	0.580392	0.682353	2.169231
0.423529	0.643137	0.666667	2.215385
0.427451	0.690196	0.631373	2.261538
0.45098	0.729412	0.615686	2.307692
0.490196	0.760784	0.603922	2.353846
0.529412	0.776471	0.580392	2.4
0.552941	0.772549	0.564706	2.446154
0.568627	0.752941	0.54902	2.492308
0.576471	0.713725	0.537255	2.538462
0.592157	0.662745	0.533333	2.584615
0.603922	0.619608	0.537255	2.630769
0.611765	0.584314	0.541176	2.676923
0.603922	0.52549	0.537255	2.723077
0.580392	0.466667	0.529412	2.769231
0.560784	0.427451	0.517647	2.815385
0.54902	0.407843	0.513725	2.861538
0.517647	0.388235	0.513725	2.907692
0.482353	0.376471	0.509804	2.953846
0.462745	0.376471	0.509804	3

Os parâmetros R, G e B, mostrados na tabela 7.1 são determinados de acordo com a imagem obtida através da câmera CCD e do método apresentado no Capítulo V.

A Figura 7.2 mostra o disco sob carga de compressão. A obtenção deste modelo foi discutida no Capítulo VI. Observam-se na Fig. 7.2, os 25 pontos analisados. A Tabela 7.2 mostra as coordenadas e os parâmetros R, G e B de cada ponto analisado.

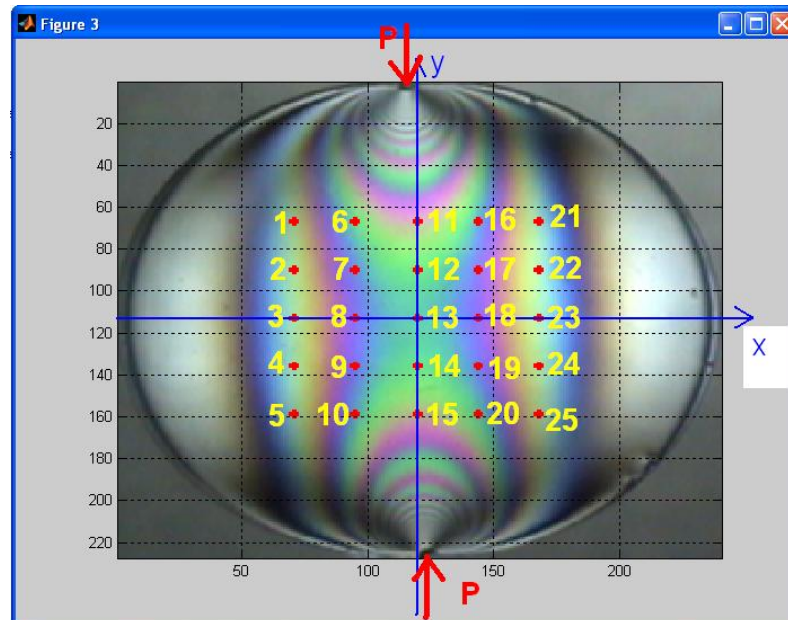


Figura 7.2 – Modelo do disco fotoelástico – 25 pontos de análise.

A carga aplicada no disco foi de 2,3 N e gerou ordens de franja máximas igual a 3 na faixa de análise (região central do disco).

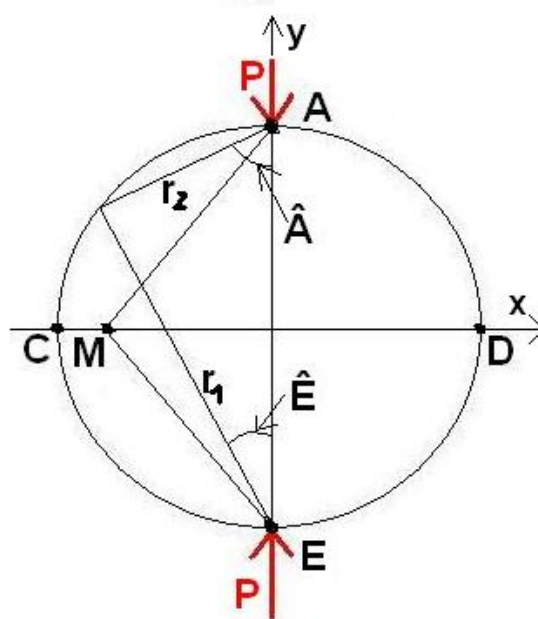


Figura 7.3 – Modelo de um disco com carga compressiva diametral (TIMOSHENKO,1957)

Tabela 7.2 – Valores RGB da tabela de calibração para os 25 pontos analisados

Ponto	Disco			Coordenadas (mm)	
	R	G	B	x	y
1	0.6353	0.7098	0.4784	11.75	11.75
2	0.6902	0.8549	0.5725	11.75	15.75
3	0.6863	0.8980	0.6353	11.75	19.75
4	0.6471	0.8510	0.6078	11.75	23.75
5	0.5412	0.7176	0.5804	11.75	27.75
6	0.4784	0.8706	0.5647	15.75	11.75
7	0.4353	0.6196	0.8784	15.75	15.75
8	0.5098	0.4627	0.9843	15.75	19.75
9	0.4510	0.4902	0.9098	15.75	23.75
10	0.3412	0.6667	0.6431	15.75	27.75
11	0.8863	0.7373	0.8196	19.75	11.75
12	0.4549	0.9373	0.5765	19.75	15.75
13	0.3765	0.8235	0.7137	19.75	19.75
14	0.4314	0.8941	0.5804	19.75	23.75
15	0.6941	0.6824	0.5804	19.75	27.75
16	0.4392	0.6627	0.8980	23.75	11.75
17	0.6078	0.5137	1.0000	23.75	15.75
18	0.5961	0.4392	0.9882	23.75	19.75
19	0.4706	0.4902	0.9529	23.75	23.75
20	0.3490	0.6784	0.5882	23.75	27.75
21	0.5725	0.8431	0.7765	27.75	11.75
22	0.7020	0.9765	0.8784	27.75	15.75
23	0.6980	0.9451	0.7882	27.75	19.75
24	0.6549	0.8667	0.6784	27.75	23.75
25	0.5922	0.7451	0.5373	27.75	27.75

O modelo do disco sob compressão possui solução analítica. A Figura 7.3 mostra o modelo de um disco sujeito a cargas de compressão (P) aplicadas na direção y .

O gradiente de tensões agindo nas direções x e y relativos a r_1 e r_2 mostrados na Fig. 7.3 é dado por Timoshenko (1957), ou seja:

$$\sigma_x = -\frac{2 \cdot P}{b_m \cdot \pi} \cdot \left[\frac{(R-y) \cdot x^2}{r_1^4} + \frac{(R+y) \cdot x^2}{r_2^4} - \frac{1}{D} \right] \quad (7.1)$$

$$\sigma_y = -\frac{2 \cdot P}{b_m \cdot \pi} \cdot \left[\frac{(R-y)^3}{r_1^4} + \frac{(R+y)^3}{r_2^4} - \frac{1}{D} \right] \quad (7.2)$$

$$\tau_{xy} = -\frac{2 \cdot P}{b_m \cdot \pi} \cdot \left[\frac{(R-y)^2 \cdot x}{r_1^4} - \frac{(R+y)^2 \cdot x}{r_2^4} \right] \quad (7.3)$$

Sendo,

$$r_1^2 = x^2 + (R-y)^2 \quad (7.4)$$

$$r_2^2 = x^2 + (R+y)^2 \quad (7.5)$$

onde,

R_d - Raio do disco

D - Diâmetro

r_1 - Direção onde se quer medir as tensões

r_2 - Direção perpendicular a r_1

y - Coordenada na direção y do ponto de interesse

x - Coordenada na direção x do ponto de interesse

Para a solução analítica do problema foi desenvolvido um programa em Matlab, que calcula os valores das tensões principais e a direção destas em pontos determinados pelo operador, para um disco sob compressão diametral, com duas forças alinhadas e opostas, passando pelo centro do disco.

Da Resistência dos Materiais é possível obter as tensões principais e as respectivas direções principais, com relação ao sistema de referência xy , ou seja:

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2 \right)} \quad (7.6)$$

$$\xi_1 = \arctan \left(\frac{\tau_{xy}}{\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}} \right) \quad (7.7)$$

Utilizando a lei ótica das tensões, é possível estimar as ordens de franja do modelo analítico, ou seja:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{NK_\sigma}{b_m} \rightarrow N = \frac{b_m}{K_\sigma}(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (7.8)$$

A Tabela 7.3 mostra as ordens de franja obtidas pelo modelo analítico, pelo programa “Fringes” desenvolvido e através de leitura experimental utilizando o método de compensação de Tardy. As 3 colunas relativas ao programa Fringes, representam os valores de ordem de franja obtidos quando foram utilizados barras de calibração com ordens de franja de ordem 3, 4 e 5 para a montagem da tabela de calibração.

Tabela 7.3 – Valores das Ordens de Franja nos pontos analisados, para uma carga compressiva de 8 N.

Ponto	Método	Programa Fringes			Leitura
	Analítico	N = 3	N = 4	N = 5	Experimental
1	1,3255	1,569	1,607	1,630	1,42
2	1,3485	1,523	1,551	1,595	1,34
3	1,3481	1,477	1,533	1,522	1,33
4	1,3485	1,477	1,514	1,558	1,3
5	1,3255	1,401	1,439	1,450	1,34
6	2,1825	2,330	2,374	2,392	2,25
7	1,9927	2,071	2,112	2,138	2
8	1,9338	2,010	2,056	2,065	1,97
9	1,9927	2,025	2,056	2,065	1,99
10	2,1825	2,208	2,243	2,247	2,15
11	2,6143	2,711	2,729	2,717	2,65
12	2,2788	2,345	2,393	2,428	2,3
13	2,1854	2,239	2,280	2,283	2,2
14	2,2788	2,330	2,393	2,355	2,4
15	2,6143	2,619	2,654	2,645	2,62
16	2,1825	2,147	2,168	2,210	2,15
17	1,9927	2,010	2,056	2,065	2
18	1,9338	2,010	2,000	2,065	1,95
19	1,9927	2,056	2,056	2,065	1,95

20	2,1825	2,284	2,337	2,355	2,15
21	1,3255	1,371	1,383	1,413	1,28
22	1,3485	1,416	1,439	1,485	1,39
23	1,3481	1,462	1,495	1,485	1,33
24	1,3485	1,508	1,495	1,558	1,28
25	1,3255	1,553	1,570	1,630	1,39

Os valores mostrados na Tab. 7.3 e obtidos experimentalmente foram determinados ponto a ponto, utilizando o método de compensação de Tardy. Os valores obtidos pelo programa “Fringes” foram determinados utilizando 3 médias de análise para os 25 pontos, considerando 3 barras de calibração ajustadas com ordens de franja máxima (N) de 3, 4 e 5 respectivamente. Observa-se na Tab. 7.3 que o erro relativo máximo obtido nas ordens de franja na região de interesse ficou abaixo dos 5%, quando comparado com os métodos analítico e experimental.

A Figura 7.4 mostra graficamente como variam as ordens de franja dos 25 pontos analisados para os três métodos. Conforme observado por (YONEYAMA & TAKASHI, 1998), os valores de ordem de franja mais baixos apresentam dificuldades de obtenção automática dos seus valores. Nos resultados obtidos no programa Fringes, é possível perceber (pontos extremos do gráfico da Fig. 7.4) a presença de distorções entre os modelos para valores de ordem de franja mais baixos ($N_{\max}=3, 4$ e 5), quando em comparação com a leitura manual (experimental) e o método analítico.

Os valores obtidos para as ordens de franja apresentaram bons resultados quando comparados com os obtidos experimentalmente e analiticamente. Deve-se destacar que na etapa na qual é selecionada uma linha a partir da qual será gerada a tabela de calibração, o programa “Fringes” aproxima o valor da ordenada da linha horizontal, trazendo a linha para o valor inteiro mais próximo.

A correta aquisição dos valores RGB para a tabela de calibração dependerá da atenção do usuário, de forma a evitar selecionar uma posição da linha horizontal que possa passar por pontos de ruído na imagem, principalmente se estes estiverem entre as franjas limites da tabela de calibração.

Quando a linha selecionada coincidir com ruídos, podem ocorrer alterações na imagem dos padrões RGB. Um exemplo dessa situação é mostrado na Fig. 7.5, onde se indica uma região próxima à ordem de franja 3 com presença de ruído, situação já abordada no Cap. 5, letra (e). Esta é uma das imagens exibidas pelo programa “Fringes” durante sua execução.

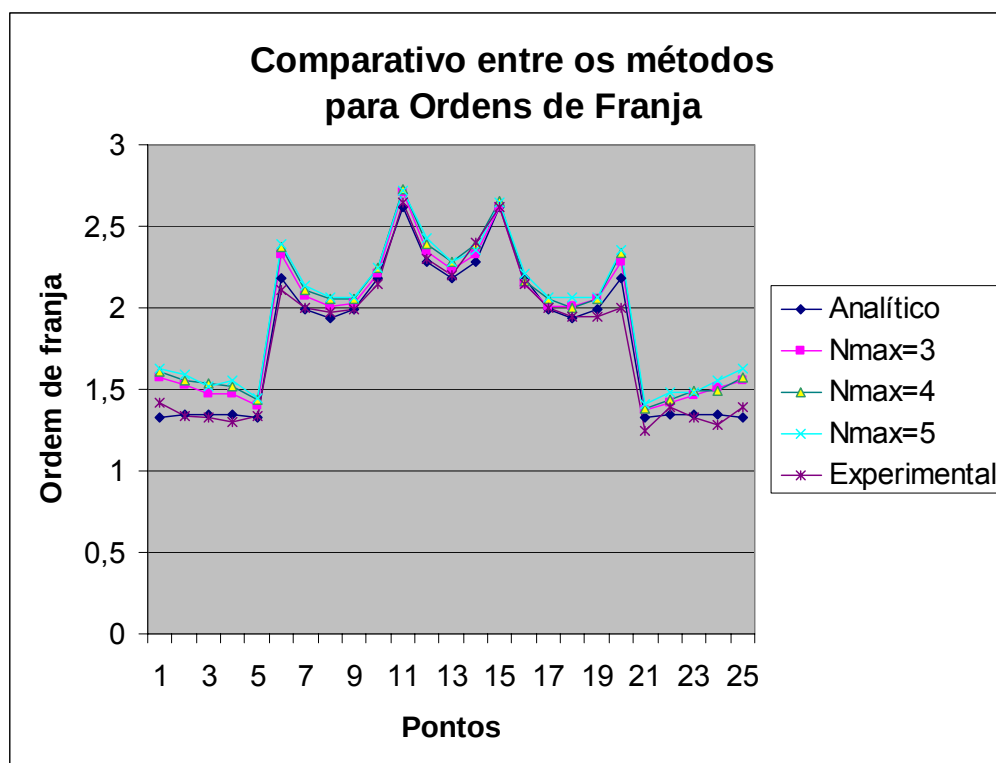


Figura 7.4 – Ordens de franja para os métodos analítico, programa Fringes e experimental, considerando 3 barras de calibração diferentes: Nmax = 3, 4 e 5.

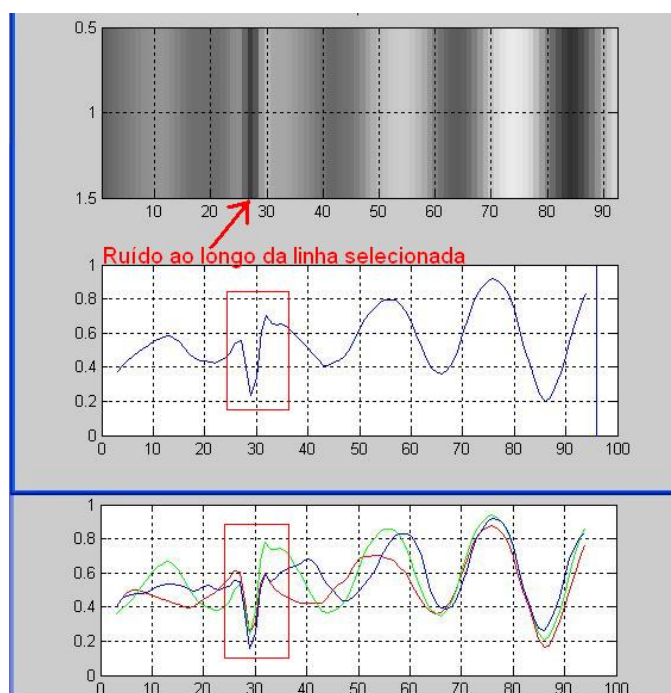


Figura 7.5 – Presença de ruídos na área selecionada para montagem da tabela de calibração.

Os valores obtidos pelo programa Fringes apresentaram boa repetibilidade e apresentaram desvio-padrão na ordem de 2%, quando usada uma imagem com $N = 3$, e de 1,6% para imagens com $N = 4$ e $N = 5$.

7.1.2 Determinação da Direção das Tensões Principais

A direção das tensões principais é obtida através de solução numérica da Eq. (5.4), por meio do método da bissecção, como indicado por Yoneyama & Takashi (1998). A Figura 7.6 mostra a imagem fotoelástica do disco sob compressão.

Este modelo foi obtido com ajustes no polariscópio considerando-se polarização a 0° . Pequenas distorções nos eixos de referência podem ocorrer e são devidas principalmente à imprecisões dos filtros e do próprio equipamento. Um exemplo dessa condição é mostrado na Fig. 7.6, onde a linha de aplicação da força F não coincide exatamente com a direção vertical. Estas condições podem levar à imprecisões na obtenção dos parâmetros R , G , B do modelo quando comparados aos valores da tabela de calibração, o que afeta diretamente a solução da Eq. 5.4.

Para minimizar este efeito foi proposta a utilização de outro modelo de calibração para melhorar a precisão dos resultados da direção das tensões principais. Este novo modelo de calibração faz uso dos pontos da grade que estejam situados nos diâmetros vertical e horizontal de um disco submetido a uma carga de compressão.

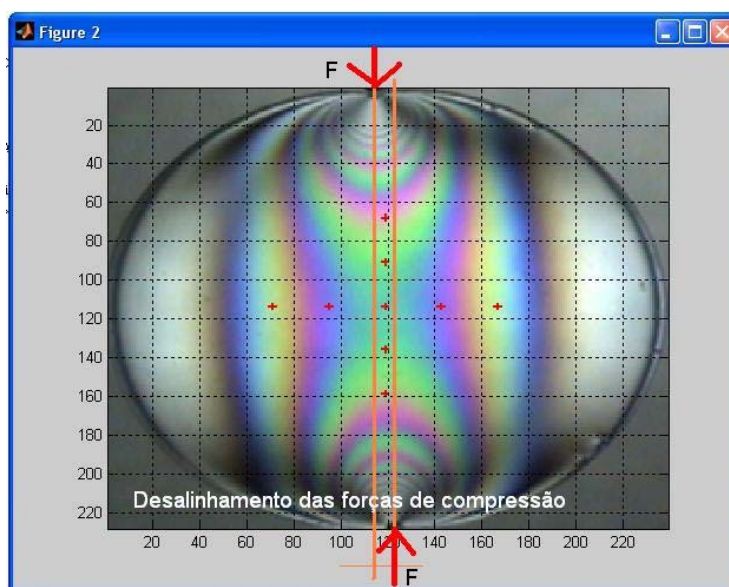


Figura 7.6 – Desalinhamento entre as forças de compressão observado no disco de calibração utilizado para determinar a direção das tensões principais.

Os pontos posicionados ao longo da linha que une os pontos de aplicação da carga e sua perpendicular possuem o ângulo das direções das tensões principais igual a 0° . Esta característica foi utilizada na nova metodologia para calibrar as direções principais, de forma a contornar as imprecisões anteriormente citadas.

A Figura 7.7 mostra o modelo do disco de calibração utilizado na análise das direções das tensões principais. Observa-se nesta figura, que foram analisados 9 pontos ao longo dos diâmetros horizontal e vertical. Nestes, as direções das tensões principais é 0° com relação ao sistema de referência x-y, e são estes pontos que são utilizados na metodologia proposta para a calibração dos parâmetros RGB.

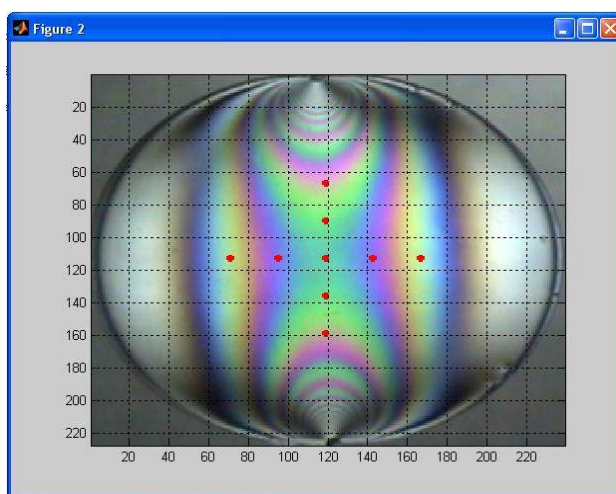


Figura 7.7 – Disco de calibração das direções principais.

A Tabela 7.4 mostra as direções das tensões principais para os 25 pontos mostrados na Fig. 7.2, calculadas pelo uso do modelo analítico, experimental e o programa “Fringes”.

Tabela 7.4 – Valores das Direções das Tensões Principais dos pontos de interesse, obtidos de forma analítica, via programa Fringes e Leitura Experimental – carga compressiva de 8N.

Ponto	Método Analítico	Programa Fringes			Leitura Experimental
		N = 3	N = 4	N = 5	
1	18,167	14,515	15,70	NC	22
2	8,312	13,090	13,970	13,227	10
3	0	0,957	0,678	0,521	0
4	8,312	13,434	14,371	13,659	11
5	18,167	15,470	NC	NC	18
6	10,597	13,718	14,882	14,668	12

7	4,690	12,674	13,545	13,488	5
8	0	0,275	0,634	0,375	0
9	4,690	12,999	13,787	13,659	5
10	10,597	15,368	NC	NC	9
11	0	1,895	1,783	1,412	0
12	0	-1,183	1,318	1,227	0
13	0	-1,209	1,179	1,490	0
14	0	-1,561	1,713	1,046	0
15	0	-0,981	0,999	1,015	0
16	10,597	12,514	13,268	12,990	8
17	4,690	11,246	11,916	11,754	5
18	0	0,586	1,366	12,307	0
19	4,690	12,687	13,324	13,165	3
20	10,597	15,567	NC	NC	11
21	18,167	13,383	14,096	13,641	16
22	8,312	11,87	12,504	11,983	10
23	0	0,224	0,095	0,162	0
24	8,312	12,950	14,036	13,315	12
25	18,167	14,830	16,366	NC	22

(*) NC = não convergiu

Observa-se na Tabela 7.4, que há valores de direção principal para os quais a metodologia aplicada não obteve convergência das raízes da Eq. 5. Estes pontos estão indicados nesta tabela por “NC”. Nota-se que os pontos nos quais isso ocorreu foram os da parte inferior da grade de pontos, principalmente quando foram utilizadas imagens da barra de calibração para franjas de ordem máxima igual a 5. Na Figura 7.8 é mostrado uma comparação dos resultados das direções principais para os 25 pontos da grade do disco fotoelástico, obtidas pelo método analítico, pelo programa Fringes e por leituras experimentais.

Observou-se que a metodologia de calibração utilizada para o cálculo da direção das tensões principais aproxima os valores encontrados dos valores analítico e experimental, com um desnível constante. Este aspecto observado poderá ser avaliado em trabalhos futuros, principalmente quando forem utilizadas imagens com maior definição e montagens experimentais mais precisas.

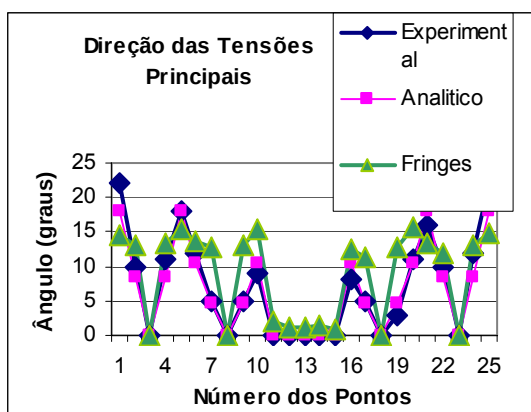


Figura 7.8 – Comparação entre os métodos experimental, analítico e pelo programa Fringes (barra de calibração com ordem de franja 3).

Também foi observada uma perda de intensidade luminosa nas imagens a partir da ordem 3, conforme já previsto por Yoneyama e Takashi (1998). Esta perda de intensidade luminosa pode ser observada na Fig. 7.9 (no padrão do Azul). Esta imagem é um exemplo de utilização do programa, rodado para 66 pontos, onde é possível perceber que ocorre uma alteração do comportamento senoidal dos perfis nas intensidades dos valores RGB. Uma alternativa a ser explorada em trabalhos futuros seria a extrapolação das curvas, gerando-se uma tabela de calibração estendida para trabalhar com dados adicionais.

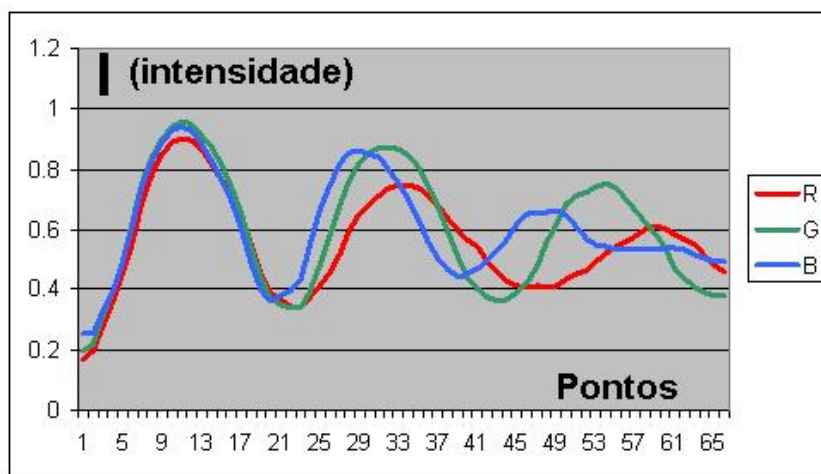


Figura 7.9 – Curva RGB da tabela de calibração – forma senoidal alterada a partir de N = 3.

7.2 Parafuso do Pilar

Os modelos de implantes possuem vários tipos de geometria com tamanhos e diâmetros variados. Um implante dentário pode estar sujeito a várias condições de carga externa devido ao efeito da mastigação. A fixação do implante é feita diretamente no osso,

sendo que o parafuso de pilar é fixado diretamente no implante. Neste sistema biomecânico, na união pilar/implante, o parafuso primeiramente é apertado produzindo uma força inicial de pré-carga (F_p) que gera uma compressão na interface pilar/implante.

Forças externas de compressão axial aplicadas aos implantes tendem a diminuir a pré-carga e aumentar o efeito de compressão entre a “coroa” e o implante. Portanto, a tensão normal atuante no parafuso deve levar em conta os efeitos de compressão. Efeitos de flexão podem ocorrer nos implantes dentários, bem como, efeitos cisalhantes devido ao atrito entre os filetes, porém, tais fatores não serão considerados neste trabalho. A Figura 7.10 mostra carregamentos de compressão e flexão que podem ocorrer em implantes dentários devido a uma força deslocada do eixo principal do implante.

A aplicação do torque no parafuso de pilar fornece tensões de tração no parafuso que deve ser suficiente para resistir às tensões normais impostas pela compressão e pela flexão do implante. O torque aplicado ao parafuso possui duas finalidades. Cerca de 90% dele será usado para vencer o atrito entre os filetes do parafuso e apenas 10% restantes serão utilizados para produzir tração no parafuso. De acordo com a literatura, o torque aplicado ao implante é da ordem de 40 Ncm e no parafuso de pilar é de 20 Ncm.

O parafuso de pilar, em função do torque aplicado, fica sujeito a uma pré-carga e a uma tensão de cisalhamento originada pelo atrito entre os filetes de rosca. Estes efeitos são aumentados devido ao torque aplicado ao parafuso de fixação da coroa que recebe a prótese. No modelo avaliado, foram considerados apenas carregamentos estáticos axiais.

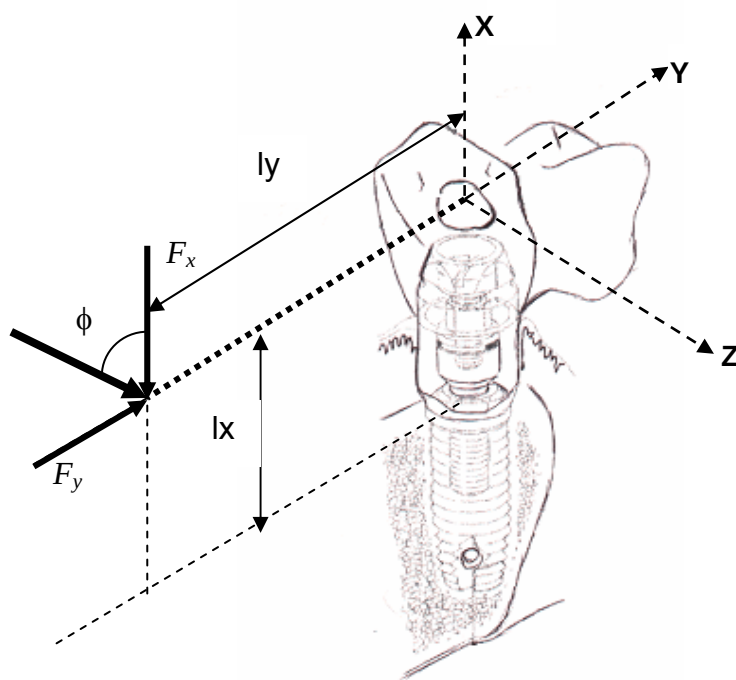


Figura 7.10 - Carregamento em um implante dentário padrão. Extraído de Garcia, 2006.

Para a estimativa dos níveis de tensões no modelo analítico foram considerados os seguintes valores para as propriedades mecânicas dos materiais utilizados na análise:

- Limite de escoamento da liga de titânio Ti6Al4V: $S_y = 882 \text{ Mpa}$
- Limite de ruptura da liga de titânio Ti6Al4V : $S_{ut} = 950 \text{ Mpa}$
- Modulo de elasticidade da liga de titânio Ti6Al4V : $E \cong 113.7 \text{ Gpa}$

Em uma união aparafusada comum, o ideal seria apertar o parafuso de pilar até próximo ou mesmo um pouco acima do limite de escoamento teórico. No entanto, não é possível aplicar torques desta ordem, pois poderia comprometer a osseointegração entre o implante e o osso. A literatura indica níveis de torque máximo para o parafuso pilar variando de 50 Ncm a 100 Ncm. Como normalmente aplicam-se torques na faixa de 20 Ncm, pode ocorrer, por ação dos carregamentos externos, ocorra o desaperto do parafuso de pilar.

A utilização de união parafusada em implantes dentários, e não uma união definitiva é a opção decorrente da necessidade de abertura para uma eventual manutenção ou troca da prótese, limpeza, etc. É também importante numa eventualidade de substituição do parafuso, pois evita que os filetes internos do implante danifiquem-se.

Em contrapartida, quanto menor o nível de torque, maior a possibilidade de desaperto do parafuso. Além disso, um torque menor poderia levar a micro-aberturas entre o pilar e o implante podendo ocorrer a entrada de bactérias. A Figura 7.11 mostra um desenho esquemático de um parafuso de pilar padrão da empresa Conexão Sistemas de Prótese Ltda. As dimensões deste parafuso foram consideradas as mesmas do modelo utilizado na análise fotoelástica a menos de um fator de escala.

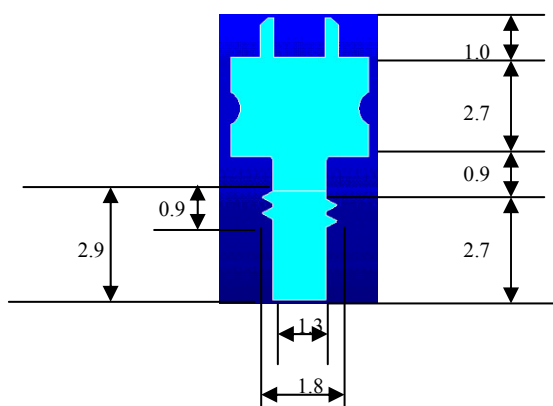


Figura 7.11 : Dimensões de um parafuso de pilar padrão representado com apenas 02 filetes de rosca. Cotas em mm. Extraída de Garcia, 2006.

A força atuante no parafuso de pilar é influenciada pelo nível de pré-carga imposto pelo torque aplicado. Em parafusos convencionais de estruturas, a pré-carga é estimada como cerca de 90% da carga de prova, que por sua vez, é obtida a partir da tensão de prova de acordo com as seguintes equações:

$$A_{pr} = \frac{\pi \cdot d_m^2}{4} = \frac{\pi \cdot 1,5795^2}{4} = 1,959 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_{pr} \cong 0,9 \cdot S_y$$

$$\sigma_{pr} = \frac{F_{pr}}{A_{pr}} \Rightarrow F_{pr} = \sigma_{pr} \cdot A_{pr} \Rightarrow F_{pr} = 0,9 \cdot S_y \cdot A_{pr} \quad (7.9)$$

Onde S_y é o limite de escoamento do material. Supondo esta aproximação aplicada ao parafuso de pilar em estudo e considerando o limite de escoamento de 882 MPa para a liga de titânio Ti 6Al 4V, tem-se que:

$$F_{pr} = 0,9 \times 882 \times 1,959 = 1.555,05 \text{ N}$$

No parafuso de pilar devido às particularidades do aperto (20 N cm), a pré-carga no parafuso será bem inferior ao previsto pela Eq. (7.9). Portanto, deve-se estimar um valor mais apropriado para a pré-carga. Isto pode ser feito através da utilização de uma expressão analítica para o torque aplicado a parafusos de potência desprezando atrito no colar (SHIGLEY, 1989), ou seja:

$$T_q = F_{pr} \cdot \frac{d_m}{2} \cdot \left(\frac{l_p + \pi \cdot d_m \cdot \sec(\rho)}{\pi \cdot d_m - \mu \cdot l_p \cdot \sec(\rho)} \right) \quad (7.10)$$

Onde:

T_q - torque

ρ - ângulo da rosca.

F_{pr} - Pré-carga.

d_m - diâmetro efetivo.

μ - coeficiente de atrito.

l_p - avanço ou passo do parafuso.

Considerando um parafuso de pilar padrão como o mostrado na Fig. 7.11, tem-se que:

$$l_p = p = 0,4327 \text{ mm}$$

$$d_m = 1,5795 \text{ mm}$$

$$\rho = 60^\circ$$

$$\mu = 0,5$$

Supondo um torque padrão de 20Ncm, tem-se da Eq. (7.10) que:

$$200 = F_{pr} \cdot \frac{1,5795}{2} \cdot \left(\frac{0,4327 + \pi \cdot 1,5795 \cdot \sec(60^\circ)}{\pi \cdot 1,5795 - 0,5 \cdot 0,4327 \cdot \sec(60^\circ)} \right) \rightarrow F_{pr} \cong 111 \text{ N}$$

Portanto, observa-se que a pré-carga estimada no parafuso de pilar é cerca de 7% do valor referente à carga de prova que supostamente o parafuso suportaria, desprezando efeitos de concentração de tensão.

Para a pré-carga, definida na equação 7.9, aplicada ao parafuso pode-se estimar uma tensão média aplicada ao parafuso como,

$$\sigma_1^{pr} = \frac{F_{pr}}{A_{pr}} \cong \frac{111}{1,959} \cong 56,7 \text{ MPa} \quad (7.11)$$

Forças mastigatórias são complexas, ou seja, são aplicadas em várias direções e na literatura são observados valores que podem chegar a 150 N. A tensão normal no parafuso considerando uma carga axial externa de compressão (F_x) atuando no implante após a aplicação da pré-carga é dada por:

$$\sigma_1^p = \frac{F_p}{A_{pr}} \quad (7.12)$$

Onde:

A_{pr} – área de prova medida no diâmetro médio

F_p – Força aplicada ao parafuso

Considerando uma carga axial e o efeito da pré-carga, a parcela de força transferida ao parafuso de pilar é dada por:

$$F_p = F_{pr} - \alpha.F_x \quad (7.13)$$

No trabalho de Garcia (2006) o valor de α foi otimizado utilizando um modelo tridimensional de elementos finitos. O valor de α obtido neste trabalho foi de 0.15, ou seja, 15% da carga externa é transferida ao parafuso. Portanto, a Eq. (7.13) pode ser re-escrita como:

$$F_p = F_{pr} - 0,15.F_x \quad (7.14)$$

Para a carga de prova de 111 N (GARCIA, 2006), relativa ao torque padrão de 20 Ncm e das Eqs. (7.13) e (7.14), tem-se para uma carga externa aplicada de 40 N, um nível estimado de tensão aplicada ao parafuso em termos da tensão principal, ou seja:

$$\sigma_1^p = \frac{105}{1,959} \cong 53,6 \text{ MPa} \quad (7.15)$$

Portanto, uma carga externa de compressão da ordem de 40 N reduz as tensões médias no parafuso em torno de 5%. À medida que a carga externa de compressão aumenta, as tensões no parafuso diminuem. No trabalho de Garcia (2006) foi definida uma condição eminente de desaperto quando os níveis de tensão se aproximassem de 50% do valor original. Nesta condição, tem-se que a força externa deve ser da ordem de:

$$28,35 = \frac{F_p}{1,959} \rightarrow F_p = 55,54 \text{ N} \rightarrow F_x = 369,73 \text{ N} \quad (7.16)$$

7.2.1 Modelo fotoelástico do parafuso de pilar

O capítulo 6 apresentou a metodologia para a obtenção do modelo fotoelástico do parafuso de pilar. Conforme mostrado, partiu-se de um modelo tridimensional ampliado de um implante padrão da empresa Conexão Sistemas de Prótese Ltda, numa escala aproximada de 3,5:1.

Para a análise do modelo pelo método da fotoelasticidade de transmissão plana, a união parafuso de pilar/implante foi fatiada numa espessura aproximada de 1.4 mm. Devido às limitações do modelo, apenas a pré-carga foi estimada utilizando um dispositivo de carga

que simulava o pilar efetuando tração no parafuso. O parafuso se apoiava nos filetes do implante, que foi fixado em uma célula de carga, como mostrado na figura 6.24.

A Figura 7.12 mostra as tensões no conjunto parafuso de pilar/implante para uma carga de 2,8 N utilizando luz polarizada circular e a Fig. 7.13 mostra detalhes das tensões cisalhantes atuando nos primeiros filetes do modelo fotoelástico.

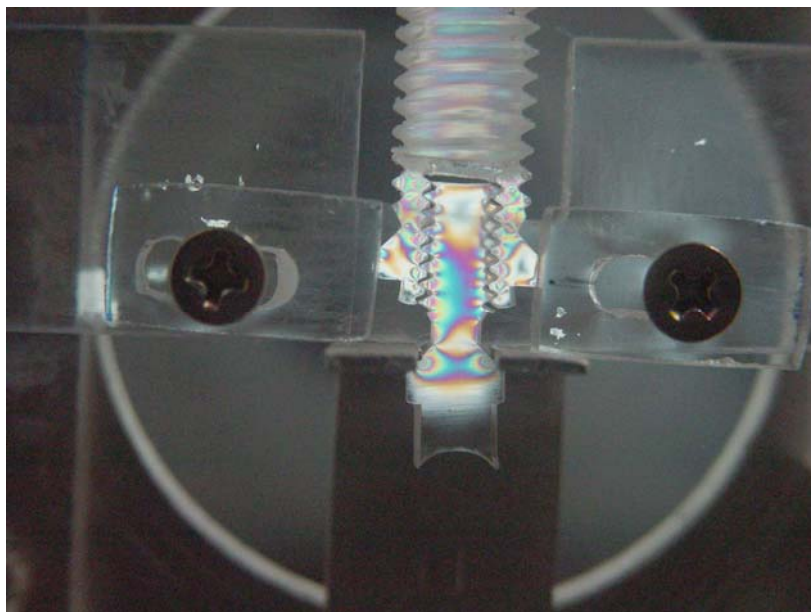


Figura 7.12 – Gradiente de tensões atuando no conjunto parafuso pilar/implante para uma carga de 2,8 N.

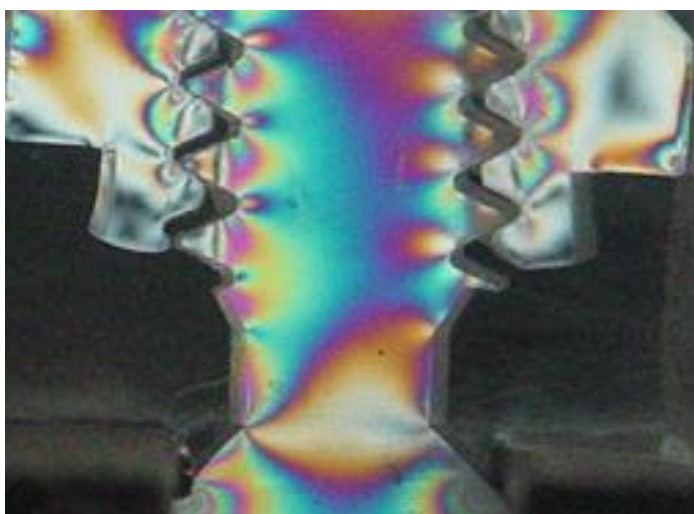


Figura 7.13 – Detalhe dos níveis das tensões atuando no parafuso de pilar para uma carga de 2,8 N.

As Figuras 7.14 e 7.15 mostram este mesmo modelo sujeito ao mesmo nível de força (2,8 N) sujeito a luz polarizada elíptica nas condições mostradas no Capítulo IV.

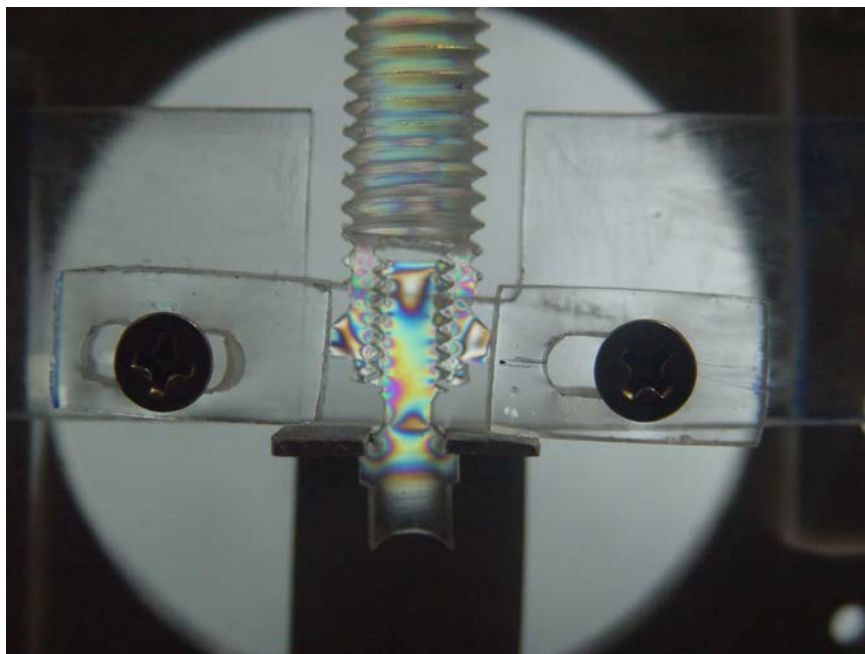


Figura 7.14 - Gradiente de tensões atuando no conjunto parafuso pilar/implante para uma carga de 2,8 N, com luz polarizada elíptica.

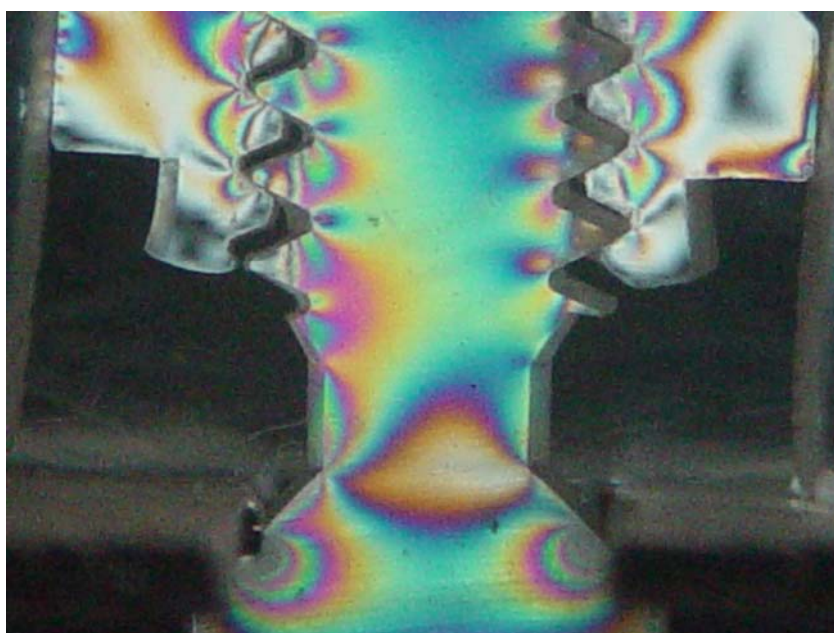


Figura 7.15 – Detalhe dos níveis das tensões atuando no parafuso de pilar para uma carga de 2,8 N, com luz polarizada elíptica.

Deve-se destacar que os níveis de força aplicados aos modelos fotoelásticos são baixos devido ao baixo módulo de elasticidade da resina empregada. Porém, a sensibilidade ótica é boa, uma vez que, a constante ótica também é pequena, da ordem de 0,24 N/ mm fr.

Observam-se, nos modelos fotoelásticos, que os três primeiros filetes do parafuso de pilar são os mais solicitados. Os pontos mais críticos são os vales dos filetes opostos ao contato com os ápices do implante. Nestes pontos, observam-se intensidades de tensões em níveis da 3ª ordem de franja.

Para avaliar o gradiente de tensões no parafuso de pilar em função de uma pré-carga aplicada foi definida uma grade de pontos de análise que varia de regiões próxima ao pescoço do parafuso até o final do vale do segundo filete de rosca. No trabalho de Garcia (2006) uma grade de pontos similar foi proposta, porém com uma quantidade maior de nós utilizando um modelo de elementos finitos. Observou-se naquele trabalho que esta grade simulava com razoável precisão a pré-carga aplicada ao parafuso. A grade de pontos utilizada neste trabalho é mostrada na Fig. 6.25.

Foram aplicados 3 níveis de carga no conjunto parafuso/pilar (2.82, 4.3, e 5.78 N). O conjunto parafuso/pilar, montado no dispositivo de carga foi levado ao polariscópio vertical do LPM para leitura manual dos valores das ordens de franja para os 11 pontos, sob os 3 níveis de carga. A Tabela 7.5 mostra as coordenadas e as ordens de franja superior e inferior mais próximas dos 11 pontos analisados.

Tabela 7.5 – Coordenadas e ordens de franja mais próximas dos 11 pontos analisados (conteúdo do arquivo de dados de entrada)

Ponto	Coordenadas (mm)		Ninf	Nsup
	x	y		
1	0.35	1.16	2	3
2	0.95	1.18	2	3
3	1.95	1.20	1	2
4	3.35	1.28	2	3
5	3.90	1.30	2	3
6	4.40	0.80	1	2
7	4.65	0.35	0	1
8	4.80	1.05	2	3
9	5.35	1.35	2	3
10	5.95	0.32	1	2
11	6.25	1.11	2	3

7.2.2 Escalonamento do modelo

Como mostrado no Capítulo IV, o modelo fotoelástico do parafuso do pilar avaliado possui uma geometria ampliada comparativamente ao modelo original fabricado em titânio. Para avaliar os valores no parafuso original é preciso utilizar a teoria de modelos e utilizar os fatores de escala para avaliar os níveis de tensão aplicada (DALLY & RILLEY, 1978).

Para a tensão cisalhante, tem-se:

$$\tau_p = \tau_m \times \frac{P_p}{P_m} \times \frac{c_m}{c_p} \times \frac{b_m}{b_p} = \tau_m \times n_p \times n_c \times n_b \quad (7.17)$$

Onde n_p , n_c e n_b são fatores de escala relativos à carga, comprimento e largura, respectivamente.

Na Eq. 7.17, a tensão cisalhante no parafuso (τ_p) é igual a tensão cisalhante no modelo fotoelástico multiplicada pelos fatores de escala em termos de força (n_p), de comprimento (n_c) e largura (n_b). Se forem consideradas as dimensões do modelo do parafuso de pilar mostradas na Fig. 7.11 e as dimensões do modelo fotoelástico, tem-se que:

$$\begin{aligned} n_p &= 1 \\ n_c &= 3,5 \\ n_b &= 3,5 \end{aligned}$$

Portanto, a Eq. 7.17 resulta em:

$$\tau_p = 12.25 \tau_m \quad (7.18)$$

Utilizando uma ordem de franja média para os 11 pontos analisados em cada valor de pré-carga, foram calculadas as correspondentes tensões cisalhantes médias. A Tabela 7.6 mostra os valores obtidos e a Fig. 7.16 mostra o gráfico e a equação de calibração entre a pré-carga e a tensão cisalhante.

Tabela 7.6 – Valores de ordem de franja e tensão cisalhante relativos às pré-cargas aplicadas.

Ordem de Fanja Média	Carga (N)	Tensão Cisalhante
		Modelo (KPa)
0	0	0
1,61	2,82	135,7
1,66	4,3	139,9
2,45	5,78	206,5

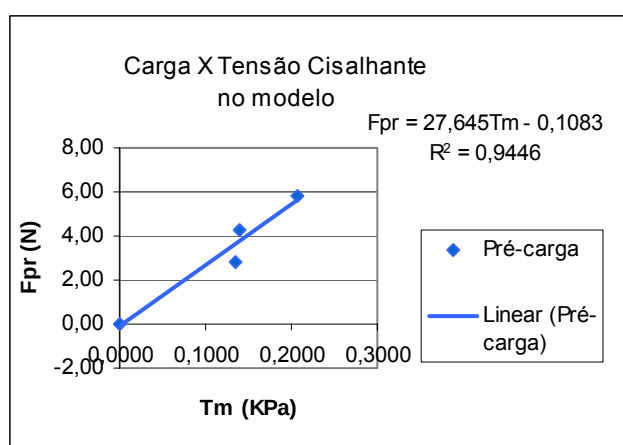


Figura 7.15 – Relação entre a pré-carga e tensão cisalhante

A Tabela 7.7 mostra os níveis de carga utilizados e as correspondentes ordens de franja dos pontos obtidos experimentalmente e a Fig. 7.16 mostra o gráfico correspondente, para cada valor de pré-carga.

Tabela 7.7 – Ordens de Franja dos 11 pontos do parafuso, obtidos experimentalmente.

Pontos	Carga aplicada (N)		
	2.82	4.3	5.78
1	2,32	2,13	2,91
2	1,99	2,01	2,77
3	1,61	1,54	2,43
4	1,69	1,8	2,43
5	0,81	1,15	2,47
6	0,93	1,65	2,32
7	1,32	0,9	1,13

8	2,3	2,34	3,17
9	0,77	1,13	2,41
10	1,66	1,16	1,6
11	2,27	2,43	3,31

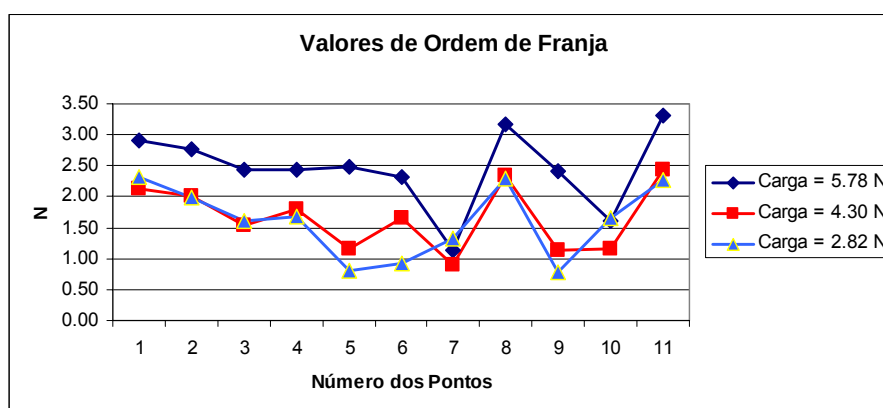


Figura 7.16 – Relação entre a pré-carga e ordens de franja obtidas para os 11 pontos.

A se utilizar os resultados da Tab. 7.6, obteve-se uma equação de interpolação que relaciona os valores da pré-carga no modelo fotoelástico com a tensão cisalhante média ao longo dos 11 pontos analisados, ou seja,

$$F_{pr} = 27,645\tau_m - 0,1083 \quad (7.19)$$

Aplicando a Eq. 7.18 na Eq. 7.19, é possível estimar a tensão cisalhante no parafuso de pilar real em função da pré-carga estimada, ou seja,

$$F_{pr} = 2,2642\tau_p - 0,1083 \quad (7.20)$$

Portanto, para uma pré-carga relativa ao torque de 20Ncm estimada em torno de 111 N, tem-se que a tensão cisalhante no parafuso de pilar será:

$$\tau_p = 49MPa$$

No trabalho de Garcia (2006) as tensões principais obtidas (σ_1) para este nível de pré-carga foi da ordem de 70 MPa. Observa-se que o resultado obtido neste trabalho é compatível ao trabalho de Garcia (2006) pois, considerando-se que:

$$\tau_p = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \quad (7.21)$$

e desprezando a tensão principal σ_2 , tem-se que:

$$\sigma_1 = 2\tau_p \cong 98MPa$$

Portanto, supondo uma condição de desaperto como 50% da pré-carga estimada (55,5N), a tensão cisalhante no parafuso e a tensão principal serão aproximadamente:

$$\tau_p = 24,5MPa$$

$$\sigma_1 \cong 49MPa$$

Portanto, as condições de torque máximo no parafuso de pilar obtidas no trabalho de Garcia (2006) poderiam ser utilizadas, ou seja, na faixa de 40 a 50 Ncm. Tais resultados necessitam de uma confirmação através da utilização de um número maior de modelos. Deve-se destacar que tais níveis são sempre limitados ao nível de osseointegração entre o implante e o osso.

7.2.3 Obtenção dos parâmetros fotoelásticos do parafuso de pilar pelo programa Fringes.

A utilização do programa Fringes para a análise do campo de tensão do parafuso de pilar seguiu os procedimentos descritos no Capítulo 5. Foi utilizada uma imagem fotoelástica do modelo do parafuso sob carga de 5,8N. Para uma maior definição da região dos filetes, foi utilizado o zoom digital. Essa opção foi aplicada em função da não disponibilidade de lentes macro adequadas à necessidade de aproximação para o tamanho do modelo estudado.

O programa Fringes gera uma planilha de resultados, cujo conteúdo é, na seqüência: número do ponto, ordem de franja, tensão cisalhante e as direções das tensões principais calculadas pela Eq. 5.9. Na Tabela 7.8 são apresentados os valores médios para as ordens de franja e direção das tensões principais de 10 análises diferentes. Essa média é comparada com os valores obtidos experimentalmente. As diferentes análises feitas pelo Programa Fringes, foram feitas com a imagem da barra de calibração com ordem de franja 3, a partir de diferentes posicionamentos da linha de origem da tabela de calibração, escolhidos aleatoriamente dentro da região central. Os valores da tabela correspondem aos

11 pontos indicados na Fig. 7.17, cuja imagem foi gerada pelo Programa Fringes e indica graficamente o posicionamento dos pontos analisados no modelo.

Tabela 7.8 – Valores de ordem de franja e direção das tensões principais obtidos pelo Programa Fringes e por Leitura Experimental – Carga de 5.8N.

Pontos	FRINGES			Experimental		Erro Relativo (%)
	N	ξ_1	ξ_2	N	ξ_1	
1	2.6	NC	NC	2.91	5	10.7
2	2.52	NC	NC	2.77	0	9.2
3	2.5	4.1	16.2	2.43	5	38.3
4	2.3	2	14.5	2.43	14	5.5
5	2.2	3.5	15.8	2.47	13	10.7
6	2.55	1.2	13.4	2.32	12	33
7	1.37	NC	NC	1.13	32	21.4
8	2.67	1.2	13.5	3.17	11	15.7
9	2.21	1.7	14.4	2.41	12	8.2
10	1.39	NC	NC	1.6	49	13.1
11	2.72	1.3	13.6	3.31	17	17.9

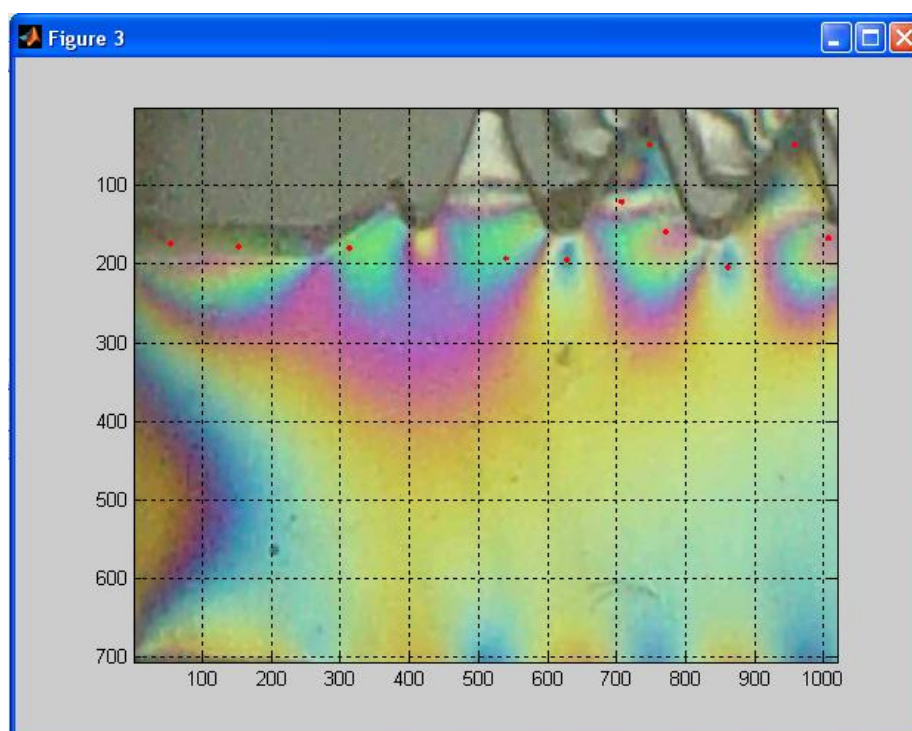


Figura 7.17 – Imagem da região de interesse no parafuso – 11 pontos indicados.

Como se pode verificar na Tab. 7.8, existem valores para os quais o Programa Fringes não consegue convergir para o cálculo da direção das tensões principais (Eq. 5.9). Quando a convergência dos valores dos ângulos não ocorre, o programa Fringes exibe no campo correspondente valores muito acima de 90 (graus). No exemplo mostrado na tabela, os pontos 1, 2, 7 e 10 não alcançaram a convergência para uma solução na faixa entre 0 e 90 graus.

Verificou-se em outros testes do programa que a seleção visual de uma região da imagem da barra de calibração com menor presença de ruído, em alguns casos contribuiu para convergir pelo menos uma das raízes (ξ_1 ou ξ_2).

Foi realizada uma avaliação estatística dos resultados das planilhas geradas pelo programa Fringes. Verificou-se que todos os pontos apresentaram um coeficiente de variação (CV) abaixo de 3% para os valores de ordem de franja e tensão cisalhante. Quanto maior o valor de CV, maior será a variação dos valores avaliados em relação à média. O coeficiente de variação é expresso pela relação:

$$CV = \frac{\text{Desvio_padrão}}{\text{Media}}$$

Apesar do baixo valor de CV encontrado, verificou-se que estes pontos apresentaram um erro relativo médio em torno de 16,7% em relação aos valores de ordem de franja e tensão cisalhante obtidos experimentalmente.

Quanto ao cálculo da direção das tensões principais, tem-se que o ponto 3 não convergiu em 5 dos 10 resultados, o ponto 5 não convergiu em 6 dos 10 resultados e os pontos 1, 2, 7 e 10 não convergiram em nenhum resultado. Os demais pontos convergiram em todos os resultados. Como os valores dos ângulos variam muito, a análise por meio do coeficiente de variação não seria a melhor forma de análise, porém uma comparação direta dos valores leva a variações máximas de 3,4° para estas imagens analisadas.

Espera-se que ajustes experimentais e imagens de entrada com maior resolução e intensidade de luz possam levar a maior quantidade de pontos com convergência e valores mais precisos de N e ξ .

Da análise visual dos pontos nos quais não se está alcançando a convergência (1, 2, 7 e 10) verifica-se que a aproximação digital utilizada para a geração da imagem do modelo do parafuso, tal como visto na Fig. 7.17, pode ter provocado uma distorção nos padrões RGB a serem adquiridos da imagem do modelo. Na Fig. 7.17 é exibido um detalhe da região dos pontos 7 e 10 onde se pode perceber que a imagem apresenta-se muito granulada e com baixa intensidade luminosa.

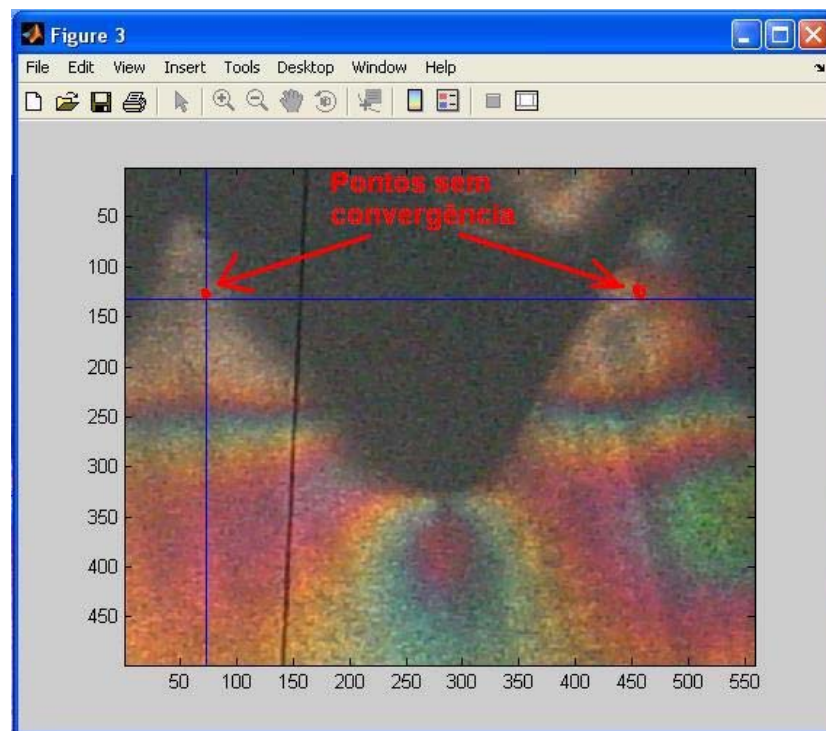


Figura 7.17 – Detalhe da aproximação da imagem com os pontos 7 e 10 nos quais a solução da Eq. 5.9 não convergiu.

CAPÍTULO VIII

CONCLUSÕES

A reabilitação dentária utilizando implantes dentários, iniciada por Branemark, ganhou um grande impulso com a consolidação e o sucesso dos implantes osseointegrados, que utilizam, basicamente, o princípio de uma união biologicamente compatível entre um elemento metálico com a estrutura óssea.

Graças a este princípio, existe um amplo relacionamento entre os aspectos mecânicos do sistema com a eficiência e a funcionalidade biológica. Neste aspecto, várias investigações e propriedades mecânicas destes implantes ainda necessitam ser avaliadas e normalizadas, principalmente, para os sistemas de implantes nacionais. Esta estratégia visa principalmente uma substituição gradual dos implantes importados por aqueles de fabricação nacional, ou apenas recomendar e referenciar a possibilidade da utilização destes implantes através da confirmação de sua qualidade final. Finalmente, esta recomendação também tem o objetivo de reduzir os custos do tratamento para o paciente, uma vez que os custos dos sistemas importados são relativamente altos. Fundamentalmente, as empresas que utilizam os resultados de pesquisas nesta área, poderão reduzir os custos dos tratamentos com implantes odontológicos.

O parafuso do pilar é um elemento essencial nas próteses aparafusadas porque é o elemento que fornece a estabilidade da união entre o pilar osseointegrado e a prótese em si. A sua utilização reduz o desgaste dos dentes vizinhos, oferece a possibilidade de reutilização da prótese, quando houver necessidade de substituição e pode impedir a degradação do tecido ósseo. Tais vantagens podem ser diminuídas nos casos de falha por desaperto do parafuso, pois passa a ser ele o elemento provocador da falha. Diversas geometrias, materiais e níveis de torque na pré-carga têm sido utilizados visando atingir o melhor desempenho desse sistema. A adaptação passiva do pilar ao implante ou do cilindro protético ao pilar podem também influenciar a estabilidade do parafuso. Neste caso, o parafuso pode ser apertado na tentativa de melhorar o ajuste, podendo ocorrer danos nas

roscas internas, o que poderá provocar o afrouxamento futuro destes e a conseqüente fratura. Estudar as condições de máxima pré-carga possível e avaliar a influência das diversas geometrias utilizadas passou a ser um objetivo de relevância para as empresas e profissionais envolvidos.

Particularmente na biomecânica, na qual as geometrias dos implantes são diversas e o comportamento mecânico dos sistemas de fixação dos implantes merece uma maior atenção, a técnica da fotoelasticidade vem sendo utilizada com frequência. Ao possibilitar a obtenção do campo de tensão dos modelos estudados, a fotoelasticidade é uma “ferramenta” que possibilita a visualização e avaliação do campo de tensões, de forma a fornecer subsídios para a otimização de seus sistemas. Um dos aspectos que diminui a penetração dessa técnica é a falta de equipamentos e profissionais familiarizados com a sua utilização. Neste sentido, desenvolver equipamentos mais práticos e desenvolver técnicas que facilitem sua operação, pode tornar essa técnica ainda mais acessível, principalmente se sua aplicação puder ser automatizada.

Neste trabalho, foi desenvolvido um programa computacional que pode fornecer informações, não só aos profissionais envolvidos com o estudo das propriedades mecânicas de elementos dos implantes odontológicos, mas também aos ligados a outras áreas interessadas pelo estudo do campo de tensão e/ou deformação presente em diversos tipos de elementos ou equipamentos. A utilização deste programa permite a obtenção dos valores da ordem de franja e direção das tensões principais em diversos pontos pré-determinados pelo usuário ou em outros selecionados visualmente nas imagens fotoelásticas do modelo.

Outra vantagem de sua utilização é que os usuários poderão diminuir seu tempo de análise e conhecimentos aprofundados na operação do polariscópio e técnica fotoelástica, pois necessitarão fundamentalmente da imagem da polarização elíptica da barra de calibração, do disco de calibração e do modelo fotoelástico, nas condições de teste. Em sua utilização, deverão fazer uso de polariscópios portáteis para a aquisição das imagens dos modelos fotoelásticos ajustados conforme descrito neste trabalho.

O método implementado possui algumas limitações, como por exemplo, quando ocorrem ordens de franja maiores do que 4, porém vale lembrar que é possível avaliar modelos fotoelásticos submetidos a valores menores de carga. Ou seja, devido à possibilidade da utilização da teoria de modelos, através da utilização de relações entre protótipo/modelo, as análises podem ser efetuadas em menores níveis de tensão, ou seja, em menores ordens de franja.

A análise do parafuso de pilar foi feita utilizando o modelo de um implante nacional padrão do fabricante Conexão Sistemas de Prótese Ltda. O modelo utilizado possuía as

dimensões ampliadas, que correspondem a uma proporção de 3,3 e 3,7, na largura e comprimento respectivamente, em relação ao original.

De acordo com as análises efetuadas e dentro de suas limitações as principais conclusões deste trabalho são:

- O programa desenvolvido denominado “Fringes” apresenta bons resultados no cálculo das ordens de franja, quando dentro da faixa de 0 a 3. Valores muito próximos a zero tendem a apresentar uma defasagem em relação aos valores teóricos, conforme também observado por Yoneyama & Takashi (1998);
- A utilização do programa “Fringes” para cálculo da direção das tensões principais ainda merece um maior aprofundamento, visto que ainda há vulnerabilidade do método quanto às imprecisões de montagens experimentais e possíveis erros na produção dos modelos (ruídos na imagem);
- A utilização do programa para ordens de franja acima de 3 é possível, porém é necessário que se utilizem equipamentos de aquisição da imagem com lentes que possuam boa intensidade luminosa e zoom de alta resolução. Neste caso, é indicada a utilização de programas que possam melhorar a nitidez e luminosidade da imagem, já que a atenuação é aumentada e pode tornar difícil a leitura automatizada dos padrões RGB;
- O efeito das placas retardadoras induziu a um erro de aproximadamente $2,5^\circ$ na região de interesse, e deve ser considerado;
- A utilização de modelos em escala aumentada possibilita maiores facilidades na produção dos modelos fotoelásticos, principalmente em protótipos reduzidos;
- A presença de ruídos na imagem insere valores na tabela de calibração que podem induzir a resultados com algum grau de imprecisão. O tratamento estatístico desses dados e seu ajuste, quando necessário, poderiam fornecer uma maior confiabilidade nos valores da tabela de calibração afetando positivamente os resultados finais;

- As regiões mais críticas do parafuso de pilar foram na transição entre a cabeça do parafuso e os vales dos dois primeiros filetes. Devido às imprecisões nos filetes, a distribuição de tensões não é simétrica em relação aos filetes superiores e inferiores;
- Os níveis de torque foram previstos por uma expressão analítica. Para a pré-carga estimada de 111 N, o valor de tensão cisalhante simulada foi de 49 MPa. Portanto, os valores estimados de torque máximo de 40 Ncm podem ser utilizados como referência para o projeto do parafuso de pilar, como recomendado no trabalho de Garcia (2006). Para que este resultado seja confirmado é necessário a utilização de uma quantidade maior de modelos fotoelásticos. Este modelo, no entanto, serviu para fazer uma validação inicial do programa computacional desenvolvido.
- É importante salientar que as cargas aplicadas nos modelos fotoelásticos analisados visavam apenas simular a pré-carga. Dessa forma, cargas cíclicas (mastigatórias) não fizeram parte dos aspectos avaliados.

8.1 Sugestões de Trabalhos Futuros

Este trabalho apresenta uma avaliação do parafuso de pilar de um implante dentário nacional, sendo desenvolvido paralelamente um programa para cálculo das ordens de franja e direções das tensões principais. O trabalho pode servir como referência para outros trabalhos e/ou refinamentos do método. Como sugestão para trabalhos futuros ou melhorias do atual, cita-se as seguintes propostas:

- Desenvolvimento de um trabalho que permita avaliar as tensões de contato entre a cabeça do parafuso com o pilar, quando é dada a pré-carga ou outras situações de manutenção do conjunto. Tais condições não foram avaliadas neste trabalho;
- Desenvolvimento de uma interface única e amigável, utilizando o recurso Guides, do Matlab, que possa unificar a área de trabalho, as imagens fotoelásticas, mensagens de saída do programa, etc., adicionando-se tratamento estatístico dos dados de entrada, visando ampliação da tabela de

calibração por extrapolação dos valores da tabela de calibração das ordens de franja nas regiões onde a atenuação afeta a qualidade da imagem adquirida;

- Os valores de direção das tensões principais obtidos pelo programa Fringes apresentaram alguma imprecisão em relação aos outros dois métodos em decorrência da necessidade de imagens de boa qualidade e condições de carga melhor controladas . Percebe-se a necessidade de se trabalhar mais o método proposto, de forma a refinar mais sua busca por convergência das raízes. Verifica-se que a metodologia proposta aproxima os valores obtidos a um patamar determinado, conforme se pode notar na Fig. 7.8. Trabalhar com, imagens de melhor qualidade e ajustes mais precisos na montagem experimental são pontos necessários para o desenvolvimento futuro dessa nova metodologia;
- Desenvolvimento de um programa, que permita o cálculo das ordens de franja e direções das tensões principais de forma dinâmica e contínua, tal como o que é utilizado em inspeções da indústria vidreira. Essa ferramenta exigiria capacidade de processamento dinâmico de imagens e poderia ser útil em estudos de mastigação, desempenho dinâmico de implantes ou elementos mecânicos, avaliação de esforços em estruturas dinâmicas, etc.;
- Avaliação do campo de tensões ao longo de uma linha de interesse;
- Avaliação das tensões envolvendo o campo completo numa região de interesse;
- Avaliação do comportamento mecânico do modelo de osso com o implante instalado, frente a diversas situações de carga;
- Avaliação de outros sistemas, geometrias ou elementos de implantes dentários utilizando o programa proposto;
- Aplicação da metodologia na área da mecânica da fratura.

CAPÍTULO IX

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADELL, R. et al., "A 15 years study of osseointegrated implants in the treatment of edentulous jaw". **J. Oral Surg.**, v.10: p. 387-416, 1981.

ADELL, R., LEKHOLM, U., BRÅNEMARK, P.I., Surgical procedures. In: Brånemark PI, Zarb GA, Albrektsson T (eds.): Tissue integrated prostheses. Osseointegration In Clinical Dentistry, **Chicago: Quintessence Public Co.**, 1985.

AJOVALASIT, A.; BARONE, S.; PETRUCCI, G., Towards RGB Photoelasticity: Full-field Automated Photoelasticity in White Light, **Experimental Mechanics**, p.193-200, Sep.1995a.

AJOVALASIT, A.; BARONE, S.; PETRUCCI, G., Automated Photoelasticity in White Light: Influence of Quarter-Wave Plates, **The Journal of Strain Analysis for Engineering Design**, London, v.30, n.1, p.29-34, Sep.1995b.

AJOVALASIT, A.; BARONE, S.; PETRUCCI, G., A Review of automated methods for the collection and analysis of photoelastic data, **Journal of Strain Analysis**, v.33, p.75-91, Sep.1998a.

AJOVALASIT, A.; BARONE, S.; PETRUCCI, G., A Method for Reducing the Influence of quarter-wave plate errors, **The Journal of Strain Analysis for Engineering Design**, London, v.33, p.207-216, Sep.1998.

AJOVALASIT, A.; BARONE, S.; PETRUCCI, G., ZUCARELLO, B., The Influence of the quarter-wave plate in automated photoelasticity, **Optics and Lasers in Engineering**, v.38, p.31-56, Sep.2002.

ALBREKTSSON, T., A multicenter report on Osseointegrated Oral Implants, **J. Prosthet Dent**, v.6(1), p.75-84, 1988.

ALBREKTSSON, T., SENNERBY, L., Direct Bone Anchorage of Oral Implants: Clinical and Experimental Considerations of the Concept of Osseointegration, **The International Journal of Prosthodontics**, v.3, n.1, p.30-41, 1990.

ALBREKTSSON, T., ZARB, G., WORTHINGTON, P., ERIKSSON, A.R., The long term efficacy of currently used dental implants: A review and proposed criteria of success. **Int J Oral Maxillofac Implants**, v.1, p.11-25, 1986.

ANDERSSON, B. et al., Mechanical testing of superstructures on the CeraOne Abutment in the Branemark System, **Int. Journal Oral Maxillofac. Implants**, v.9, n6, p665-672, 1994.

ARAÚJO, C. A., NEVES, F. D.; BERNARDES, S. R., Stress analysis in dental implants using the photoelasticity technique. **Proceedings of the 3th National Congress of Mechanical Engineering**, Belém, Brazil, 2004.

ARAÚJO, C. A., Notas de aula. **Análise Experimental de Tensões**, FEMEC/UFU, Universidade Federal de Uberlândia, MG, Brazil, 2006.

BARONE, S.; BURRIESCI, G.; PETRUCCI, G., Computer Aided Photoelasticity by an Optimum Phase Stepping Method, **Experimental Mechanics**, v.42, n.2, p.132-139, Jun. 2002.

BINON, P. et al, The Role Of Screws In Implant Systems, **Int. J. Oral Maxillofac. Implants**, v.9, p.48-63, 1994 (Supplement).

BINON, P., The Effect of Implant/abutment hexagonal misfit on screw joint stability, **Int. J. Prosthodont.**, v.9, n.2, p.149-160, 1996.

BINON, P., Evaluation of the Effectiveness of a Technique to Prevent Screw Loosening, **J. Prosthet. Dent.**, v.79, p.430-432, 1998.

BINON, P., The External Hexagonal Interface and screw-joint stability: A primer on threaded fasteners in implant dentistry, **Quint. Dent. Technolog.**, p.91-105, 2000.

BODINE, R.L., YANASE, R.T., BODINE, A., Forty Years of Experience with Subperiosteal implant dentures in 41 edentulous patients, **Journal of Prosthetic Dentistry**, v.75, p.33-44, 1996.

BRANEMARK, P., *Proteses tecido-integradas. La Osseointegracion em la odontologia clinica*, Alemanha, Berlin, 1987.

BRANEMARK, P.I., HANSSON, B.O., ADELL, R., BREINE, U., LINDSTROM, J., Osseointegrated implants in the treatment of the edentulous jaw. Experience from a 10-year period. **Scand J Plast Reconstr Surg Suppl**, v.16, p.1-132, 1977.

BRANEMARK, P.I., Osseointegration and its experimental background, **J Prosthet Dent.**;n.50, v.3, p.399-410, 1983 Sep.

BREEDIN, G. et al., Torque Required to loosen single-tooth implant abutment screws before and after simulated function. **Int. J. Prostodont.**, v.6, n.5, p.435-439, 1993.

BURGUETE, R. et al., Tightening Characteristics for screwed joints in osseointegrated dental implants, **J. Prosthet. Dent.**, v.71, n.6, p.592-599, 1994.

CALVERT, G., LESNIAK, K., HONLET, M., Applications Of Modern Automated Photoelasticity To Industrial Problems, **Insight**, v.44, n.4, p.1-3, Apr.2002.

CAVAZOS, E., BELL, F., Preventing loosening of implant abutment screws, **J. Prosthet. Dent.**, v.75, n.5, p.566-569, 1996.

CESCHIN, J. R., *O Implante na Reabilitação Bucal*, 1a. ed., São Paulo: **Panamed Editorial**, p. 68-69, 1984.

CHEN, T. Y. and LIN, C.H., Whole-field Digital Measurements of Principal Stress Directions in Photoelasticity, **Optics and Lasers in Engineering**, v. 30, n. 279, p. 527-537, Ago. 1998.

CORTE-REAL, J. M., APARÍCIO, C., Complicações em pacientes desdentados totais com implantes: Um estudo retrospectivo seguido num prazo de 5 a 7 anos, com próteses completas de cimento / aparafusadas metalocerâmicas na maxila, **Portugal Implantologia**, Lisboa, n.1, p.56-57, Dez. 2002.

D'ACQUISTO, L., PETRUCCI G., ZUCCARELLO, B., Full Field Automated Evaluation of the Quarter Wave Plate Retardation by Phase Stepping Techique, **Optics and Lasers in Engineering**, v. 37, n. 279, p. 389-400, 2002.

DALLY, J. W.; RILEY W. F. **Experimental Stress Analysis**, McGraw-Hill, 2a. ed.; 1975.

EMBRACHER FILHO, A., A Natureza e a Osseointegração, disponível em: < http://www.emfils.com.br/emfils/eng/artigos/detalhe.asp?id=5&cat_id=6>, Brasil, Acesso em: 15.abr.2006.

EKFELDT, A., CARLSSON, G., BORJESSON, G., Clinical Evaluation of Single-tooth restorations supported by osseointegrated implants: A retrospective study, **Int. J. Oral Maxillofac. Implants**, v.9, p.179-183, 1994.

ERICSSON, I., PERSSON, L.G., BERGLUNDH, T., MARINELLO, C.P., LINDHE, J. & KLINGE, B., Different types of inflammatory reactions in peri-implant soft tissues. **Journal of Clinical Periodontology**, v.22, p.255-276, 1995.

FABRICIUS, L., DAHLÉN, G., ÖHMAN, A.E. & MÖLLER, A.J.R, Predominant Indigenous Oral Bacteria Isolated From Infected Root Canals After Varied Time Of Closure. **Scandinavian Journal of Dental Research**, v. 90, p.134-144, 1982.

FERNANDES, C. P., GLANTZ, P. J., SVENSSON, S. A., BERGMARK, A., Reflection photoelasticity: a new method for studies of clinical mechanics in prosthetic dentistry, **Dental Materials**, vol. 19, pag. 106-117, 2001.

FERREIRA JUNIOR, A. F. G., HORIKAWA, O., Photoelastic Fringe Pattern Analysis by Image Processing, **18th International Congress of Mechanical Engineering**, Ouro Preto, MG, Brasil, Nov. 2005.

GARCIA, J. D. O., **Parafusos De Pilar Utilizados Em Implantes Dentários Nacionais**, 2006, 122 folhas, Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.

GOODACRE, C.J., KAN, J.Y., RUNGCHARASSAENG K., Clinical Complications Of Osseointegrated Implants, **J. Prosthet Dent.**, v.81, n.5, p.537-52, 1999.

GRATTON, D., AQUILINO, S., STANFORD, C., Micromotion and dynamic fatigue properties of the dental implant-abutment interface. **J. Prosthet. Dent.**, v.85, n.1, p.47-52, 2001.

GREENWOOD, N,N; EARNSHAW, A; "**Chemistry of the Elements**"; 2ª edição; Leeds, U.K. Butterworth Heinemann, 1998.

GROSS, M. et al. Manual closing torque in five implant abutment systems: An in vitro comparative study. **J. Prosthet. Dent.**, v. 81, n. 5, p. 574-578, 1999.

HECKER, M. M., MORCHE, B., Computer-aided Measurement of Relative Retardations in Plane Photoelasticity", In: WIERING, H. Editor. **Experimental Stress Analysis**. The Netherlands: Martinus Hijhoff Publishers, p. 535-542, 1986.

HAAKE, S.J. and PATTERSON, E. A., Photoelastic Analysis Using a Full Field Spectral Contents Analyser, **Int. Conf. On Photoelasticity: New Instrumentation, Materials and Data Processing Techniques**, v.33, n.1, p.1-15, 1993.

HOBBS, J. W., GREENE, R. J., PATTERSON, E. A., A Novel Instrument for Transient Photoelasticity, **Experimental Mechanics**, v.43, n.4, p.403-409, Dec. 2003.

JEMT, T., LEKHOLM, U., ADELL, R., Osseointegrated implants in the treatment of partially edentulous patients. A preliminary study on 876 consecutively installed mixtures. **INT. JOURNAL OF ORAL AND MAXILLOFACIAL IMPLANTS**, v. 4, p.211-217, 1989;

JEMT, T. ET AL. Osseointegrated Implants For Single Tooth Replacement: A 1-Year Report From A Multicenter Prospective Study. **INT. J. ORAL MAXILLOFAC. IMPLANTS**, v. 6, p. 29-36, 1991.

JEMT, T., JOHS, R.B., HERRMANN, I., HEATH, M.R., HUTTON, J., JOHNS, R.B., A 5-Year Prospective multicenter follow-up report on overdentures supported by osseointegrated implants, **Int. Journal Oral Maxillofac. Implants**, v.11, p.291-298, 1996.

LANEY, W. et al. Osseointegrated implants for single-tooth replacement: Progress report from a multicenter prospective study after 3 year. **Int. J. Oral Maxillofac. Implants**, v. 9, p. 49-54, 1994.

LEE, J. et al., Wave analysis of implant screw loosening using an air cylindrical cyclic loading device, **J. Prosthetic. Dent.**, v.88, n.4, p.402-408, 2002.

LINDQUIST, L.W., CARLSSON, G.E. & JEMT, T., Association between marginal bone loss around osseointegrated mandibular implants and smoking habits: a 10-year follow-up study. **Journal of Dental Research**, n. 76, p.1667-1674, 1997.

KALLUS T, BESSING C., Loose gold screws frequently occur in full-arch fixed prostheses supported by osseointegrated implants after 5 years, **Int J Oral Maxillofac Implants**. v.9, n.2, p. 169-78, 1994 Mar-Apr

KAPUR, K.K., Veterans Administration Cooperative Dental Implant Study-Comparison Between Fixed Partial Denture Supported by Blade Vent Implant and Removable Part Dentures. Part II – Comparison of Success Rates and Periodonthal Health Between Two Treatment Modalities, **Journal of Prosthetic Dentistry**, v.62, p.685-703, 1989.

KIHARA, T., Photoelastic Model Measurement with Rotated Principal Axes by Scattered-Light Photoelasticity, **Experimental Mechanics**, v.44, p.455 - 460, Oct 2004.

KIHARA, T., An Arctangent Unwrapping Technique of Photoelasticity Using Linearly Polarized Light at Three Wavelengths, **The Journal of Strain Analysis for Engineering Design**, v. 39, n.2, p.65-71, May. 2003.

KIHARA, T., A Measurement Method of Scattered Light Photoelasticity Using Unpolarized Light, **Experimental Mechanics**; v.37, n.1, p.39-44, Mar.1997.

KIHARA, T., Automatic Whole-field Measurement of Principal Stress Directions Using Three Wavelengths, Lisbon, **Proc. 10th. Int. Conf. Exp. Mech.**; v.1, p.95-99, 1995.

McGLUMPHY, E.; MENDEL, D.; HOLLOWAY, J. Implant screw mechanics. **Dent. Clinics North. Am.**; v. 42, n. 1, p. 71-89, 1998.

McGLUMPHY, E., KERBY, E, ELFERS, C., A Comparison of Screw Preload for the Single Tooth Implant, **J. Dent. Res.**, v. 73, p.202, 1994. /Abstract n. 809.

MENGES, H. J., 1940: Z. angew . Math. Mech 20, 210.

MILLER, R., McGLUMPHY, E., KERBY, E, Comparison of Abutment Screw Preload in Different Implant Designs, **J. Dent. Res.**, v. 73, p.202, 1994. /Abstract n. 807.

MOLANDER, A., REIT, C. & DAHLÉN, G. Microbiological Evaluation Of Clindamycin As A Root Canal Dressing In Teeth With Apical Periodontitis. **International Endodontic Journal**, v.23, p.113-118, 1990.

MÖLLER, A.J.R., FABRICIUS, I., DAHLÉN, G. ÖLMAN, A.E. & HEYDEN, G., Influence On Periapical Tissues Of Indigenous Oral Bacteria And Necrotic Pulp Tissue Im Monkeys. **Scandinavian Journal of Dental Research**, v.89, p.475-484, 1981.

NAERT, I., QUIRYNEN, M., van Steenberghe D., A Study of 589 consecutive implants supporting complete fixed prostheses. Part II: prosthetic aspects. **J. Prosthet Dent.**, v. 68, p. 949-956, 1992;

NEVES, F. D.; FERNANDES NETO, A. J. Utilização de implante para resolução de uma perda dental individual posterior – discussão do planejamento de quarto casos. **BCI**, v.5, n.4, p.43-49, 1998.

NEVES, F. D.; FERNANDES NETO, A. J. Resolução protética para reabilitação de uma paciente desdentada total superior. **Rev. Bras. Prot. Clin. Lab.**, v.1, n.1, p.15-20, 1999.

NEVES, F. D.; FERNANDES NETO, A. J.; OLIVEIRA, M.; LIMA, J. H. F., Seleção de intermediários para implantes Bränemark-compatíveis – Parte I: Casos de implantes múltiplos, **Rev. Bras. Prot. Clin. Lab.**, v.2, n.5, Jan-Fev. 2000.

PAPPALETTERE, C., LAMBERTI, L., A Brief Review of Expertises and Applications of Experimental Mechanics in Italy, Disponível em: <<http://www.aiasonline.org/ExperimentalMechanicsinItaly1.pdf>>, Italy, Acesso em: 15.jan.2006.

PATTERSON, E, JHONS, M., Theoretical Analysis Of The Fatigue Life Of Fixture Screws In Osseointegrated Dental Implants. **Int. J. Oral Maxillofacial Implants**, v. 7, p. 26-34, 1992.

PATTERSON, E. A, Digital Photoelasticity: Principles, Practice and Potential: Measurements Lecture, **Strain**, v.38, p.27-39, 2002.

PATTERSON, E. A.; WANG, Z. F., Simultaneous Observation Of Phase-Stepped Images For Automated Photoelasticity, **The Journal of Strain Analysis for Engineering Design**, v.33, n.1, p.1-15, 1998.

PATTERSON, E. A.; WANG, Z. F., Towards Full-Field Automated Photoelastic Analysis of Complex Components, **The Journal of Strain Analysis for Engineering Design**, v.27, n.2, p.49-56, 1991.

PETRUCCI G., Full-field Automatic Evaluation of an Isoclinic Parameter in White Light, **Exp. Mech.**, v.37, n.4, p.420-426, Dec.1997.

PEREIRA, A. P. V., VASCONCELOS, W. L., ORÉFICE, R. L., Novos Biomateriais: Híbridos Orgânico-Inorgânicos Bioativos, **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, p.104-109, Out-Dez.1999.

PINDER, J.T., CLOUD, G., On Dispersion of Birefringence of Photoelastic Materials, **Experimental Mechanics**, p.470-480, Sep.1966.

PLOUZENEC, N., DUPRÉ, J.-C., LAGARDE, A., Whole Field Determination of Isoclinic and Isochromatic Parameters, **Experimental Techniques**, p. 30, Jan/Feb-1999.

QUIROGA, J. A., GONZALÉZ-CANO, A., Automatic Determination of isostatics in two dimensional photoelasticity, **Meas. Sci. Technol.**, London, n.11, p. 259-265, 2000.

RAMESH, K. and DESHMUKH, S. S., Three Fringe Photoelasticity - Use Of Colour Image Processing Hardware To Automate Ordering Of Isochromatics, **Strain**, v.32, n.3, p.79-86, Aug.1996.

RANGERT, B.; JEMT, T.; JÖRNEUS, L.; forces and moments on Brånemark Implants. **Int. J. Oral Maxillofac. Implants**, v4, n.3, p.241-7, 1989.

SIEGMANN, P., BACKMAN, D., PATTERSON, E. A., A Robust Approach to Demodulating and Unwrapping Phase-stepped Photoelastic Data, **Experimental Mechanics**, London, v.45, n.3, p.278 - 289, Jun.2005.

SILVA, M. H. P., **Apostila de Biomateriais**, CBPF – Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, 2004.

SHIGLEY, J. E., **Mechanical Engineering Design** – 5th ed. McGraw Hill Book Co., 1989

SKYDAN, O. A., LALOR, M. J., BURTON, D. R., Using Coloured Structured Light In 3-D Surface Measurement, **Optical and Lasers Engineering**, London, v.43, p.801-814, 2005.

SMITHLOFF M, FRITZ ME. The use of blade implants in a selected population of partially edentulous patients: A ten year report. **J. Periodontol**, v.53, p.413-418, 1982.

SMITH, D.E., ZARB, G.A., Criteria For Success Of Osseointegrated Endosseous Implants, **Journal Prosthet Dent**, v.62, n5, p.567-72, 1989.

SOUZA, G. A. A., ARAÚJO, C. A., 2005, Automatized Processing for Photoelastic Parameters, **COBEM 2005**, p.535-545.

STOKES, G. G., 1852: Trans. **Cambridge Phil. Soc.** 9, 399.

SUTTER, F., WEBER, H. SORENSEN, J., The New Restorative concept of the ITI dental implant system: Design and Engineering. **Int. J. Periodont. Rest. Dent.**, v.13, n.5, p.409-431, 1993.

SUTTER, F., The Role of Screws in Implant Systems, **Int. J. Oral Maxillofac. Implants**, v.9, p.48-63, 1994 (Supplement).

TAN, K.; NICHOLLS, J. Implant-abutment screw joint preload of 7 hex-top abutment systems. **Int. J. Oral Maxillofac. Implants**, v. 16, n. 3, p. 367-377, 2001.

TAN, K.; NICHOLLS, J. The effect of 3 torque delivery systems on gold screw preload at the gold cylinder abutment screw joint. **Int. J. Oral Maxillofac. Implants**, v. 17, n. 2, p. 175-183.2002.

TAVAREZ, R. R. J., **Análise Comparativa das Interfaces de Implantes de Conexão Externa e Interna em Restaurações Unitárias Cimentadas e Parafusadas, Antes e Após Ensaio de Fadiga**, 2003, 273 folhas, Tese de Doutorado – Faculdade de Odontologia de Bauru da Universidade de São Paulo.

TAVAREZ, R. R. J., BONACHELA, W.C., Torque Produzido de 4 torquímetros diferentes em próteses sobre implantes, **Rev. Pesquisa Odontológica Brasileira**, nov. 2002.

THEOCARIS, P. S.; GDOUTOS, E.E., **Matrix Theory of Photoelasticity**, New York: Springer-Verlag, ed.1; 1979;

TIMOSHENKO, S., **Resistencia de los Materiales**, 1ª parte, Madrid: Espasa-Calpe S. A., 1957;

TZENAKIS, G., NAGY, W. W., FOURNELLE, R.A., DHURU, V.B., The effect of repeated torque and salivary contamination on the preload of slotted gold implant prosthetic screws, **J. Prosthet. Dent.**, v.88, n.2, p.183-191, 2002.

UMEZAKI, E., KAWAKAMI, T., Measurement of Principal-Stress Directions from Photoelastic Experiment Using Generalized Phase-Shift Method, **Optical Review**, v.4, n.2, p.249-252, 1997.

VAN NOORT, R.; TITANIUM: Titanium: the Implant Material of Today. **Int. J. of Material Scienc**, v. 22, 1987.

VOLOSHIN, A. S., BURGER, C. P., Half-fringe photoelasticity: a new approach to whole-field stress analysis, **Exp. Mech.**, v.23, p.304-313, 1983.

WEINBERG, L.; KRUGER, B. A comparison of implant/prosthesis loading with four clinical variables. **Int. J. Prosthodont.**, v. 8, n. 5, p. 421-433, 1995.

YONEYAMA, S.; TAKASHI, M., 1998, A new method for photoelastic fringe analysis from a single image using elliptically polarized white light, **Optics and Lasers in Engineering**, v. 30, p.441-459;

YONEYAMA, S.; MORIMOTO, Y. and MATSUI, R., Photoelastic fringe pattern analysis by real-time phase-shifting method, **Optics and Lasers in Engineering**, vol. 39, pp 01-13, 2003;

YAO, X.; JIAN, L.; XU W. JIN, G.; YEH, H., Digital shifting photoelasticity with optical enlarged unwrapping technology for local stress measurements, **Optics and Lasers Technology**, v.37, n.1, p.582-589, 2005.

ZARB, G.A., Oral motor patterns and their relation to oral prostheses, **J Prosthet Dent.**, n.47, v.5, p.472-8., 1982 May.