

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM POLARISCÓPIO PLANO E CIRCULAR DE TRANSMISSÃO PARA UTILIZAÇÃO NO LABORATÓRIO DE ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES DA PUC-MINAS.**

**Perrin Smith Neto** – psmith@pucminas.br  
**José Luiz Silva Ribeiro** – jlui@pucminas.br  
**Cristiano Antônio de Andrade** - cristiano@antonio.com.br  
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais  
Departamento de Engenharia de Mecânica  
Av. Dom José Gaspar, 500  
30535-610 – Belo Horizonte - MG

**Resumo:** *Este trabalho descreve a técnica fotoelástica como método experimental para análise de tensões em engenharia mecânica. A fotoelasticidade é uma técnica experimental para análise de tensão e deformação que é particularmente útil para peças que possuem complicada geometria, complicadas condições de carga ou ambas. Para tais casos, os métodos analíticos são inviáveis e análise experimental fornece a única solução realística. Aplicada há mais de 50 anos esta técnica experimental só se desenvolveu no Brasil, a níveis consideráveis, a partir da década de setenta. A fotoelasticidade usando o método de congelamento das tensões, fotoelasticidade tridimensional, é provavelmente um dos mais poderosos métodos para a análise experimental de tensões. O presente trabalho mostra também alguns tipos de polariscópios para a realização da técnica fotoelástica e descreve o projeto de um polariscópio de bancada em construção na Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.*

**Palavras-chave** *Fotoelasticidade, Polariscópios, Análise Experimental de Tensões.*

## 1. INTRODUÇÃO – A técnica Fotoelástica

A Fotoelasticidade é um método experimental para análise de tensões ou deformações em mecânica. Relaciona-se com os efeitos na luz de tensão e /ou deformação. A medida que a luz atravessa certos materiais transparentes, a fotoelasticidade infere tensões de seu efeito ótico. Enquanto as áreas tradicionais de aplicação da fotoelasticidade tem sido largamente substituídas por técnicas numéricas, os mesmo computadores que tornaram isto possível estão agora sendo usados para estender a faixa de atuação da fotoelasticidade em novas e excitantes direções. Desenvolvimento de laser, fibra ótica, e procedimentos digitais para reconhecimento de padrões, análise de imagens, aquisição de dados, e análise de dados estendem a faixa de problemas para os quais fotoelasticidade é o meio mais adequado de pesquisa. O resultado é que em vez de diminuir, está aumentando a importância do método fotoelástico em mecânica pura e aplicada.

A fotoelasticidade é uma técnica experimental para análise de tensão e deformação que é particularmente útil para peças que possuem complicada geometria, complicadas condições de carga ou ambas (Budynas, Richard G,1999). Para tais casos, os métodos analíticos são inviáveis e análise experimental fornece a única solução realística. Aplicada há mais de 50 anos esta técnica experimental só se desenvolveu no Brasil, a níveis consideráveis, a partir da década de setenta. A fotoelasticidade usando o método de congelamento das tensões, fotoelasticidade tridimensional, é provavelmente um dos mais poderosos métodos para a análise experimental de tensões. Este método consiste na fixação de uma anisotropia ótica no material sob a aplicação de uma carga e mediante um tratamento térmico especial. A anisotropia fixada ou congelada no modelo não muda mesmo quando a carga é removida, permitindo o corte do modelo em fatias ou planos para serem posteriormente analisados. A análise fotoelástica é também largamente utilizada para problemas em que se necessita de informação sobre tensão ou deformação em grandes regiões da estrutura uma vez que a fotoelasticidade é um método de campo completo que fornece uma fotografia geral da distribuição de tensão ao invés de informação ponto a ponto. O método portanto pode ser utilizado para áreas altamente tensionadas, avaliar tensões de pico na superfície e pontos interiores da estrutura, e também localizar áreas de baixa tensão onde o material está sendo utilizado ineficientemente. Problemas envolvendo geometrias bi e tridimensionais, cargas estáticas e dinâmicas e materiais elásticos e inelásticos são possíveis de serem analisados pelos métodos fotoelásticos.

### Fotoelasticidade Bidimensional

A propriedade fundamental ótica necessária que uma refração dupla temporária que certos materiais transparentes exibem quando sujeitos a tensão ou deformação. Quando o estudo é conduzido, cargas que simulam as do protótipo a ser avaliado são aplicadas no modelo. Os efeitos óticos no modelo resultantes destas cargas são então visualizados em um campo da luz polarizada que é obtida por um instrumento conhecido como polariscópio. Com uma fonte de luz branca, os efeitos óticos são manifestados como bandas coloridas cobrindo a faixa do espectro visual. Com fonte de luz monocromática, os efeitos óticos são manifestados como uma série de franjas alternadas clara escuras que são ordenadas de acordo com o número de ciclos claro-escuro que ocorrem em um ponto no modelo a medida que a carga é incrementada de zero até o seu valor final. As ordens de franja são comumente relacionadas a tensão no modelo por meio de uma relação conhecida como lei

ótica da tensão. Se modelo do material exhibe os efeitos viscoelásticos, a relação pode envolver tensões, deformações ou ambas, juntas com suas derivadas de tempo.

No caso de campos de tensão bidimensionais, as franjas isocromáticas são o lugar dos pontos de máxima tensão cisalhante constante no plano do corpo de prova. Pelo processo de contar as franjas e multiplicar suas ordens por uma constante de calibração, pode-se determinar a distribuição da máxima tensão cisalhante ( ou diferença de tensão principal) através do corpo de prova. Nas superfícies livres e em qualquer outro ponto onde o campo de tensão é uniaxial, a tensão cisalhante máxima é igual a metade da tensão principal. Uma vez que as tensões críticas em um corpo bidimensional freqüentemente ocorrem em superfície livre (furos, entalhes, ou filetes), o método fotoelástico fornece um excelente meio para a determinação de distribuição de tensões e fatores de concentração de tensões associados com tais formatos.

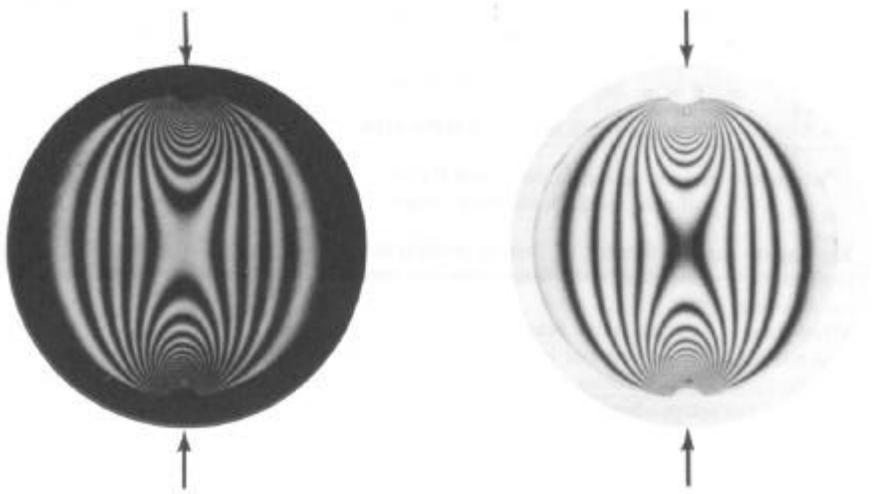


Figura 1 - Imagens isocromáticas de campo escuro e claro em um disco submetido a compressão diametral.

### Fotoelasticidade Tridimensional

Historicamente, os métodos fotoelásticos foram, por muitos anos, limitados a problemas estáticos, bidimensionais. Nos últimos anos com as técnicas de congelamento de tensões e de propagação de luz desenvolvidas foi possível estender o uso do método para problemas tridimensionais.

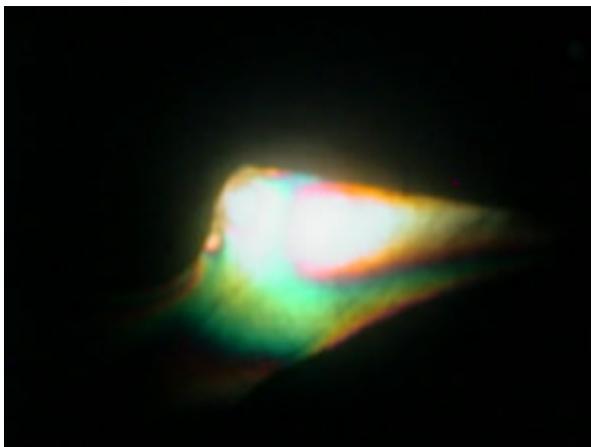


Figura 2 - Modelo fatiado, obtido por congelamento de tensões para análise de Tensões utilizando a técnica Fotoelástica tridimensional – Corte de um Maxilar humano

## Camadas Fotoelásticas

O método de camadas fotoelásticas representa uma extensão de procedimentos de fotoelasticidade de transmissão para a determinação de deformações superficiais em corpos opacos bi e tridimensionais. A camada é uma folha fina de material fotoelástico que é colado na superfície da peça a ser analisada. A camada é espelhada na interface para prover uma superfície de reflexão para a luz. Quando o protótipo é carregado, os deslocamentos na sua superfície são transmitidos para o lado espelhado da camada onde ela produz um campo de deformação através da espessura da camada. Os padrões óticos, que são relacionados com as diferenças de deformação principal na camada, são observados com um polariscópio de reflexão de luz.

## 2. POLARISCÓPIOS

**2.1 O Polariscópio Plano :** O polariscópio plano é o mais simples dos sistemas óticos usados em fotoelasticidade; consiste em dois polarizadores lineares e uma fonte de luz disposta como ilustrado na figura 3 (Dally e Riley.,1991)

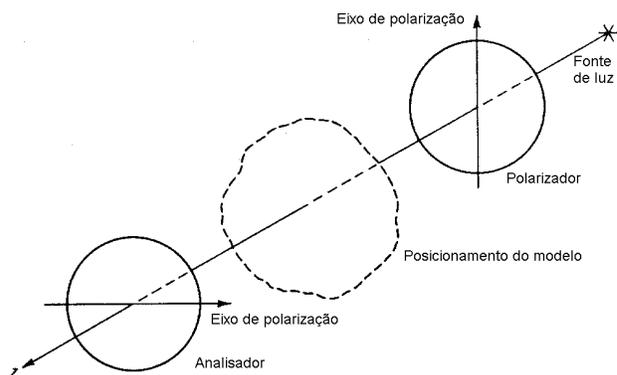


Figura 3 – Disposição dos elementos óticos num polariscópio plano

O linearizador mais próximo da fonte de luz é denominado polarizador e o mais afastado analisador. Neste tipo de polariscópio os eixos de polarização são sempre cruzados, nenhuma luz é transmitida através do analisador e esta montagem produz o chamado campo escuro. Em operação, um modelo fotoelástico é posicionado entre os dois elementos e observado através do analisador.

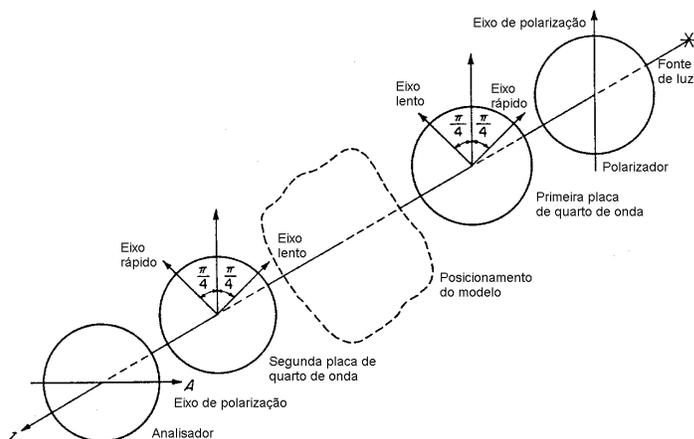


Figura 4 – Disposição dos elementos óticos num polariscópio circular

**2.2 O Polariscópio Circular** : O polariscópio circular emprega a luz circularmente polarizada. O equipamento dispõe então de quatro elementos óticos e uma fonte de luz, como mostrado na figura 4.

O primeiro elemento à partir da fonte de luz é o polarizador. Ele converte a luz comum em luz plano polarizada. O segundo elemento é uma placa de quarto de onda posicionada em ângulo  $\lambda = \pi / 4$  em relação ao eixo de polarização. Esta placa de quarto de onda converte a luz plano polarizada em luz circularmente polarizada. O terceiro elemento, a segunda placa de quarto de onda, é posicionada com o seu eixo rápido paralelamente ao eixo lento da primeira. O motivo da presença deste elemento é converter a luz circularmente polarizada em plano polarizada novamente, vibrando no plano vertical. O último elemento é o analisador, com o seu eixo de polarização posicionado na horizontal, com o objetivo de extinguir a luz. Esta série de elementos óticos constitui a disposição padrão de um polariscópio circular, produzindo um campo escuro. Mais três arranjos destes elementos óticos são possíveis, dependendo tanto do posicionamento dos polarizadores como das placas de quarto de onda. A Tab. 1 descreve estes arranjos.

Arranjo	Placas de Quarto de Onda	Polarizador e Analisador	Campo
A	Cruzadas	Cruzados	Escuro
B	Cruzadas	Paralelos	Claro
C	Paralelas	Cruzados	Claro
D	Paralelas	Paralelos	Escuro

Tabela 1 - Quatro Disposições de Elementos Óticos num Polariscópio Circular

Os arranjos A e B são normalmente recomendados para uso de campos claro e escuro do polariscópio, uma vez que o erro introduzido por uma placa de quarto de onda imperfeita (isto é, ambas as placas diferindo de  $\lambda / 2$  por um pequeno valor) será minimizado. Uma vez que as placas de quarto de onda apresentam freqüentemente baixa qualidade, torna-se importante a seleção deste arranjo ótico (Cloud, Gary L.,1995)

### **2.3 Detalhes Construtivos de Polariscópios de Luz Difusa e com uso de Lentes**

Polariscópio de Luz Difusa : A disposição dos elementos óticos discutidos previamente não são suficientemente completas ou detalhadas para a visualização de um polariscópio de trabalho. O grau de complexidade de um polariscópio varia bastante com o tipo de análise e faixas, de sistemas lentes de alta complexidade com servo mecanismos aplicados aos quatro elementos óticos até disposições bastante simples sem o uso de lentes e sem utilização de rotação automática de nenhum elemento.

O polariscópio de luz difusa descrito anteriormente é um dos mais simples e menos caros disponíveis; ainda que possa ser empregado para produzir resultados fotoelásticos de qualidade muito alta. Este tipo só necessita das lentes; entretanto, seu campo pode ser bem grande uma vez que seu diâmetro depende somente do tamanho dos polarizadores e placas de quarto de onda disponíveis. Podem ser construídos polarizadores de luz difusa com campos de diâmetros maiores que 450 mm.

Uma ilustração esquemática pode ser vista na figura 5.

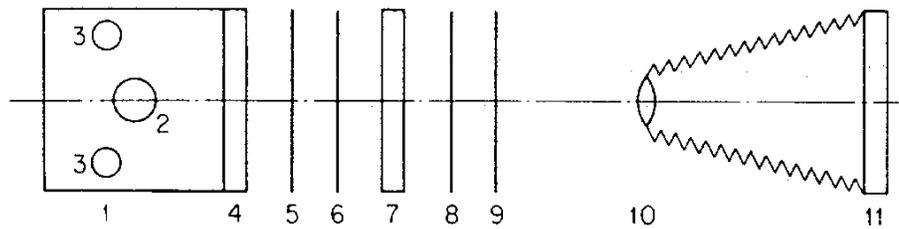


Figura 5 – Esquema de um polariscópio circular de luz difusa com fontes de luz branca e luz monocromática : 1) fonte de luz (pintada internamente em branco liso); 2) fonte de luz monocromática – lâmpada de sódio de baixa pressão ( 12 pol. de comprimento e 3 pol. de diâmetro, 10.000 lm); 3) fonte de luz branca – lâmpadas de filamento de tungstênio de 300 W, posicionadas de cada lado da fonte; 4) placa difusora – vidro opaco brilhante; 5) polarizador; 6) placa de quarto de onda; 7) sistema de carga; 8) placa de quarto de onda; 9) analisador; 10) ponto de mirada ou posicionamento de câmara fotográfica ou vídeo (Polaroid, digital, CCD, etc.)

Polariscópio com uso de Lentes : Nos primeiros anos do uso da fotoelasticidade, os prismas de Nicol (disponíveis somente em diâmetros pequenos) eram usados quase que exclusivamente como elementos polarizadores. Conseqüentemente foi necessário o uso de sistemas de lentes para ampliação do campo de visão para que determinados modelos pudessem ser estudados. Entretanto, com a criação de placas de grandes diâmetros e alta qualidade, não é mais necessário aumentar muito o diâmetro do campo com o uso de sistemas de lentes múltiplas. Em vez disso, os polariscópios de lentes devem ser empregados somente onde a luz paralela sobre todo o campo se faz necessária. Situações onde a luz paralela é importante incluindo aplicações onde a definição precisa de todo o limite do modelo é crítica e onde reflexos parciais são usados em toda a área fotoelástica (para multiplicação e/ou apuração de franjas).

Os efeitos da luz espalhada pelo modelo podem ser minimizados pelo posicionamento de um diafragma com um furo no ponto de foco do segundo campo de lentes. Como o diâmetro do furo do diafragma é pequeno, o paralelismo da luz é aumentado; entretanto, a intensidade da luz atingindo o fundo da câmara é diminuído e o tempo de exposição do filme tem que ser aumentado.

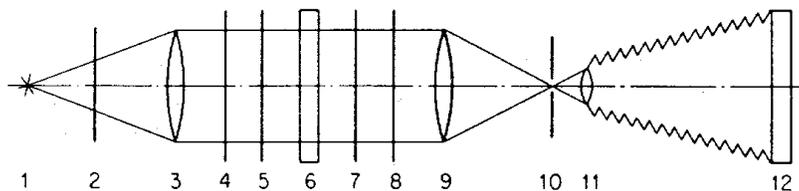


Figura 6 – Detalhe de construção de um polariscópio circular com uso de lentes : 1) fonte de luz (pequeno arco de mercúrio); 2) filtro de cor; 3) primeiro conjunto de lentes; 4) polarizador; 5) placa de quarto de onda; 6) sistema de carga; 7) placa de quarto de onda; 8) analisador; 9) segundo conjunto de lentes; 10) diafragma c/ furo; 11) ponto de mirada ou posicionamento de câmara fotográfica ou vídeo (Polaroid, digital, CCD, etc.)

## 2.4 Diferentes Tipos de Polariscópios

O Polariscópio de reflexão utiliza o método de camadas fotoelásticas birrefringentes. Determina as deformações superficiais em corpos opacos bidimensionalmente. A camada fotoelástica é uma folha fina de material birrefringente, usualmente um polímero, que é colada na superfície do protótipo a ser analisado. A resina fotoelástica que cobre o modelo provê uma superfície reflexiva para a luz que incidirá sobre ela. Quando o protótipo é carregado, os deslocamentos na superfície são transmitidos para o lado espelhado da camada para a produção de campo de deformação através da espessura da camada depositada. A distribuição do campo de deformação sobre a superfície do protótipo em termos de diferenças de deformação principal, é determinada pelo emprego de um polariscópio de reflexão de luz para gravar as franjas. A figura 7 mostra um polariscópio de reflexão, importado.



Figura 7 - Polariscópio de Reflexão 030 da Measurements Group,2000.

Polariscópios de transmissão permitem visualizar todo o campo de tensões no modelo e a leitura da ordem de franjas é feita pelo operador do equipamento. Essa leitura da ordem de franja é visual. Na figura 8, temos um polariscópio de bancada no Laboratório de Comportamento Mecânico dos Materiais da Universidade Federal de Uberlândia.



FIGURA 8 - Polariscópio de Bancada – Universidade Federal de Uberlândia - Laboratório de Comportamento Mecânico dos Materiais

O Polariscópio da figura 9, também da Universidade Federal de Uberlândia, é um polariscópio de transmissão adaptado a um projetor de Perfil, onde peças fatiadas de componentes tridimensionais são analisadas em um projetor de perfil, para facilidade de análise de leitura de ordem de franjas.



Figura 9 - Polariscópio adaptado a um Projetor de Perfis  
Laboratório de Comportamento Mecânico dos Materiais  
Universidade Federal de Uberlândia

Para uma melhor visualização dos resultados e diminuição dos erros de leituras visuais, alguns polariscópios são adquiridos com máquinas fotográficas ou câmaras CCC ou de vídeo, evitando com isto que erros visuais possam interferir nos resultados

## 2.5 PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM POLARISCÓPIO DE TRANSMISSÃO

O objetivo principal deste projeto foi o de obter um polariscópio de transmissão para análise de tensões em peças bi e tridimensionais. A técnica fotoelástica tem sido bastante



Figura 10 - Sistema de Carga convencional para tração e compressão simples  
Fabricante: Measurements. Group ,USA

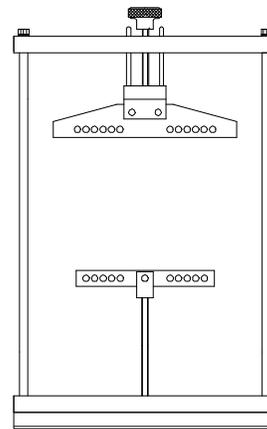


Figura 11 – Sistema de carga do polariscópio da PUC Minas

usada na solução de problemas de engenharia civil, mecânica, odontológica, médica e especialmente na obtenção de distribuição de tensões em peças e equipamentos industriais. Atualmente nenhuma firma nacional produz equipamentos para análise experimental de tensões usando a técnica fotoelástica. Este equipamento não é produzido no Brasil, e o custo de um polariscópio de transmissão é da ordem de trinta e seis mil reais. O custo deste equipamento sairá na faixa de seis mil reais, portanto um sexto do preço de um similar, importado. Como tarefas iniciais foram projetados o sistema de carga para o polariscópio de transmissão. Vários sistemas de carga foram analisados (Neto, Perrin Smith,1976). A figura 10 mostra um sistema de cargas convencional para tração e compressão simples.

A figura 11 mostra o sistema de carga projetado para o Polariscópio da PUC-Minas. Acoplado ao sistema de carga, montou-se uma célula de carga para obtenção precisa do valor do carregamento aplicado no modelo. Os sistemas de montagem dos filtros analisador e polarizador também foram obtidos. Foram analisados vários sistemas de montagem de filtros. A figura 12 mostra o projeto final do Polariscópio da PUC-Minas, já com especificações de materiais.

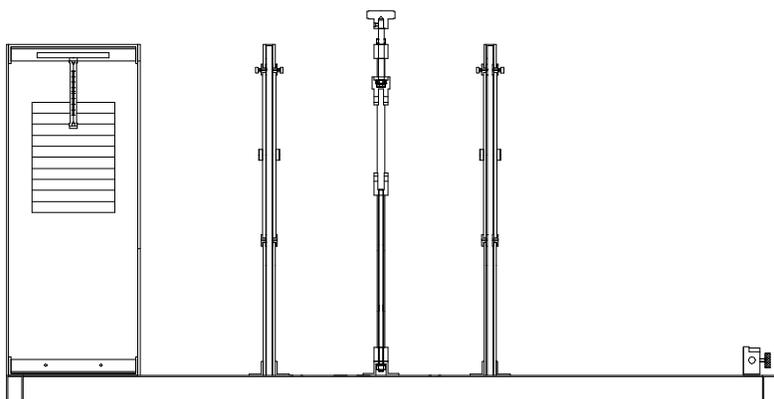


Figura 12 – Polariscópio da PUC Minas (em construção)

### Projeto do Sistema de Montagem dos filtros analisador polarizador e Placas de $\frac{1}{4}$ de onda

Foram analisados vários sistemas de fixação dos filtros. A figura 13 mostra a montagem de filtros analisador/placa de  $\frac{1}{4}$  com anel marcador de variação angular para análise de franjas isocromáticas/isoclínicas. O sistema foi projetado para filtros adquiridos da Measurement Group, USA.



Figura 13 - Sistema de montagem para filtros de um polariscópio de transmissão da UFU

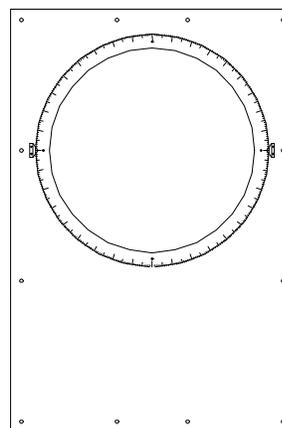


Figura 14 – Placa para filtros polariscópio da PUC Minas

Entre as placas analisador/  $\frac{1}{4}$  de onda e polarizador/  $\frac{1}{4}$  de onda foram colocados vidros de 2mm de espessura para proteção destes filtros. Pretende-se terminar a construção do polariscópio neste segundo semestre de 2000. Para a rigidez do conjunto foram adquiridos aços inoxidáveis e alumínio comum. O atual projeto deverá servir para auxílio em aulas didáticas dos cursos de engenharia mecânica e civil, além de ser útil na obtenção de análise de tensões em modelos de peças automotivas. Os desenhos foram todos feitos em escala 1:1 em AutoCAD 2000 e a descrição detalhada do projeto faz parte de uma dissertação de mestrado a ser apresentada no Curso de Mestrado de Engenharia Automotiva da PUC-Minas.

## **2.5 Referencias**

1. Budynas, Richard G. : "Advanced Strength and Applied Stress Analysis", 2ª edição, McGraw-Hill, Boston, 1999.
2. Cloud, Gary L. : "Optical Methods of Engineering Analysis", 1ª edição, Cambridge University Press, New York, 1995.
3. Dally, James W. e William F. Riley : "Experimental Stress Analysis", 3ª edição, McGraw-Hill, New York, 1991.
4. Neto, Perrin Smith : "Análises de Tensões em Placas com Entalhes em U, Submetidas à Tração e Flexão Puras", Dissertação para Obtenção ao Título de Mestre, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia Mecânica, São Carlos, SP, Brasil, 1976
5. Website da empresa Measurements Group, Inc. ([www.measurementsgroup.com](http://www.measurementsgroup.com)) , Raleigh, NC , USA, 2000