

**Análise qualitativa de tensões em estruturas sólidas acopladas a amostras de resina fotoelástica**

Análisis cualitativo de esfuerzos en estructuras sólidas, junto a muestras de resina fotoelástica

*Qualitative analysis of stresses in solid structures coupled in samples of photoelastic resin*

Sidney L. da Silva<sup>1</sup>; Antônio V. Lima; Luan N. da Silva; Charles R. da Silva; Carlos Gomes; Esther G.R. Santos; Henrique S. Batista; Lindaci A. Ta Gein

**Resumo:** Apresenta-se, nesse trabalho, estudo de amostras de resina fotoelástica pela técnica de fotoelasticidade, envolvendo dois tipos de materiais: alumínio e cobre. As franjas de interferência observadas em amostras fotoelásticas contendo esses materiais, foram comparadas e contrastadas com as de uma amostra padrão, livre de materiais. O instrumento utilizado para captura dos dados foi um polariscópio linear. Realizou-se uma análise qualitativa de dados em função das observações feitas com os dados colhidos através de uma câmera fotográfica. Verificou-se que houve mudanças nos padrões das franjas nas duas amostras contendo os materiais. As principais diferenças foram: (i) nitidez nas cores; (ii) curvatura e (iii) quantidade de franjas. Com essas observações, concluiu-se que é possível estudar determinadas propriedades desses materiais, como densidade, dureza e concluir sobre suas resistências e fraturas mecânicas, porém através de processos que envolvem análises quantitativas das observações, apontando, assim, para uma continuidade desse trabalho.

**Palavras-chave:** óptica; birrefringência; fotoelasticidade; polariscópio.

**Resumen:** Se presenta en este trabajo, estudios de muestras de resina fotoelástica con dos tipos del materiales, aluminio y cobre. Se observaron franjas de interferencia. Las franjas eran compararon y contrastaron con una muestra estándar. El instrumento utilizado para la captura de datos fue un polariscopio lineal. Se realizó un análisis cualitativo de los datos sobre la base de observaciones realizadas con los datos recogidos a través de una cámara. Se encontró que hubo cambios en los patrones de franjas en todas las muestras. Las principales diferencias son: (i) nitidez de los colores; (ii) la curvatura y (iii) el número de franjas. Con estas observaciones, se concluyó que es posible estudiar ciertas propiedades de estos materiales. Por ejemplo, la resistencia mecánica, sino por procesos que implican el análisis cuantitativo de las observaciones, indicando así una continuidad a este trabajo.

**Palabras-clave:** óptico; birrefringencia; fotoelasticidad, polariscopio.

**Abstract:** It is presented in this work, Photoelastic resin samples were studied by the employment of the Photoelasticity's technique and adopting two types of materials: Aluminum and Copper. The fringes of the interferences observed in the Photoelastic samples containing the aforementioned materials were compared and contrasted with the fringes of a pattern sample, deprived from these materials. A linear polariscope was the instrument employed for the gathering of data. A qualitative analysis of the data obtained was made by observing the data collected by a camera. It was observed that, in relation to sample's pattern, changes occurred in the fringes' pattern of the two samples containing the materials—Aluminum and Copper. The main differences observed were (i) distinctness in colors; (ii) curvature of the fringes and (iii) quantity of fringes. From these observations, one can be seen to accept that it is possible to study some of the properties from the aforementioned materials, e.g., density, hardness, thus being able to assert conclusions on their resistance and mechanics fractures. Furthermore, these processes still involve the quantitative analysis of the observations made, thus indicating the demand of the continuity of this work.

**Key-words:** Optics; Birefringence; Photoelasticity; Polariscopes.

<sup>1</sup>Bacharel em Física Aplicada e Instrumentação, Mestre em Ciências (Física), Doutorando em Ciências (Física), pelo Instituto de Física da Universidade de São Paulo; Professor e Pesquisador da Fatec de Itaquera Prof. Miguel Reale. <mailto:fatec.professor.sidney@gmail.com>

## **1. Introdução**

Há basicamente dois tipos de tensões: (i) elásticas e (ii) residuais. As tensões elásticas são temporárias, desaparecendo com a retirada das solicitações externas, que produzem suas aparições. As tensões residuais são permanentes, mesmo após a retirada das solicitações externas (YOUNG e FREEDMAN 2008).

As áreas de construção civil, automobilística, aeronáutica, naval e odontológica são exemplos onde as tensões aparecem. Medir essas tensões é importante e muitas técnicas foram elaboradas para suprir as necessidades. Porém, a maior parte dessas técnicas é destrutiva, ou seja, danificam o componente em teste. Uma das técnicas teóricas, não destrutivas, que evoluiu ao longo do tempo foi a de Elementos Finitos, com limitações quando os fatores segurança e complexidade da peça é decisivo. A técnica experimental de Fotoelasticidade, também não destrutivo, surgiu para validar e complementar a de Elementos Finitos, com a vantagem de obtenção de resultados de toda, ou grande área, da peça modelada.

A Fotoelasticidade iniciou antes da década de 70, porém o seu desenvolvimento só foi possível no final desta década com a utilização do processamento de imagens, automatizando a análise das imagens obtidas. A grande vantagem da técnica de Fotoelástica, além do fato de ser não destrutiva, está na possibilidade análise qualitativa e quantitativa do campo de deformações, causado por tensão mecânica, a partir das franjas que surgem no plano paralelo ao da aplicação da carga externa, quando a amostra está entre polarizadores com estados ortogonais de polarizações, incluindo a facilidade de montagem da configuração experimental.

Neste trabalho, utilizando a técnica Fotoelástica a partir das franjas observadas em amostras de resinas fotoelásticas com peças de alumínio e cobre inseridas no interior delas, fez-se uma análise qualitativa por comparação e contrastação da possibilidade de estudo do campo de deformações nas resinas durante um esforço externo realizado sobre a amostra.

## **2. Visualização de Tensões e Deformações**

Birrefringência é o fenômeno da dupla refração, natural em alguns materiais anisotrópicos (exemplo: cristal de calcita), ou provocados por tensões externas em materiais isotrópicos (exemplo: resina fotoelástica). A birrefringência provocada é denominada temporária (QUINAN, 2005).

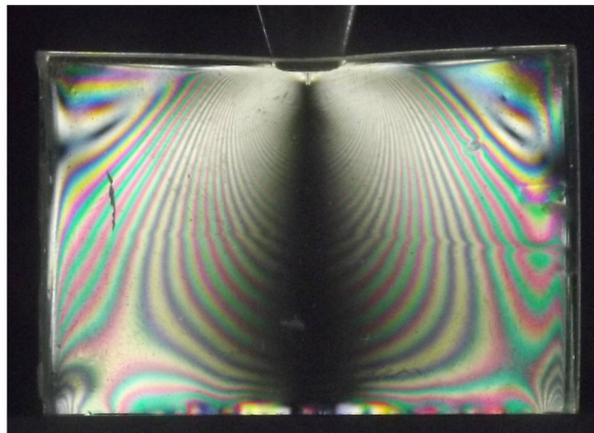
Fotoelasticidade é a técnica óptica para medir as diferenças de tensões no interior de materiais birrefringentes temporários, a partir das ordens de franjas observadas num polariscópio (EUGENE, 2002).

A intensidade luminosa resultante de um padrão de franja depende das características dos componentes da montagem experimental. Dentre essas características destacam-se a transmitância do material, desconsiderando efeitos de polarização (FERREIRA, 2003), a distribuição espectral de radiação da fonte luminosa, o fator de conversão do sinal luminoso em sinal elétrico da câmera e o efeito de birrefringência temporária causado pela aplicação de tensão no material. Logo, os materiais birrefringentes submetidos a carregamentos e observados através de luz polarizada, exibem o campo de tensões/deformações na forma de faixas coloridas denominadas franjas isocromáticas e faixas pretas denominadas franjas isoclínicas (MEYER *et al*, 2002).

## 2.1. Polariscópio

Polariscópio é o instrumento que possibilita visualizar a birrefringência temporária através de franjas de interferência. A partir do estado de polarização obtém-se o padrão de interferência das ondas luminosas, que é utilizado para determinação do estado de tensão do material. Se a amostra é uma resina fotoelástica, quando a fonte de luz incidente, no polariscópio, é branca, observam-se franjas coloridas. Se a luz incidente é monocromática, observam-se franjas na cor utilizada na luz incidente (RIBEIRO, 2001).

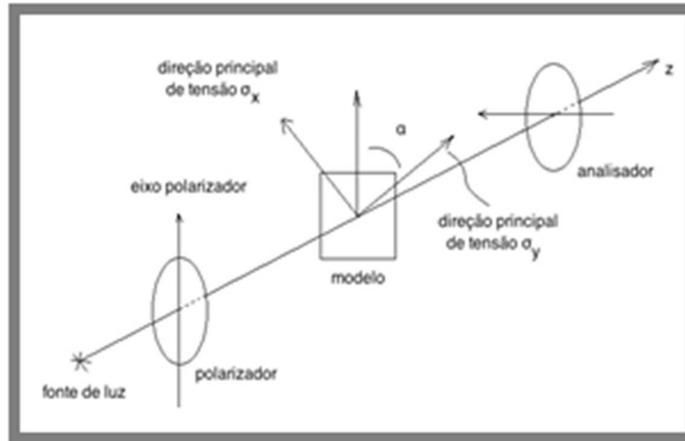
A figura 1 apresenta um exemplo de visualização das franjas de interferência isocromáticas numa amostra de resina fotoelástica, submetida a uma carga  $P \cong (5,89 \pm 0,01)$  N no centro superior, através de um polariscópio.



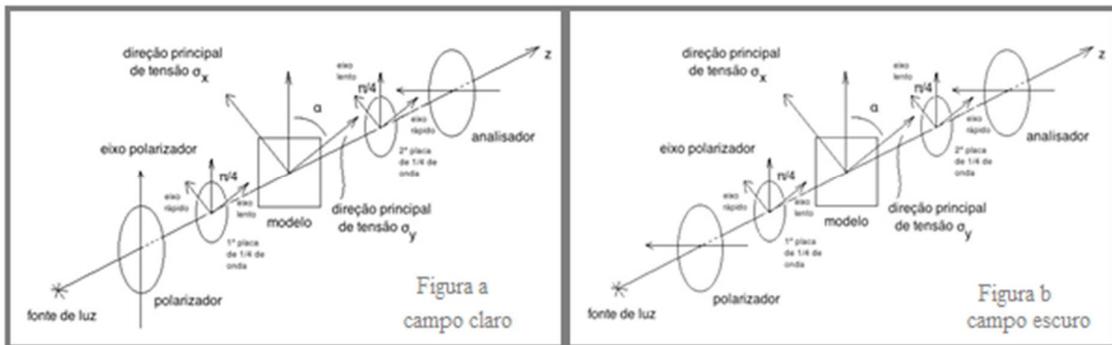
**Figura 1: Imagem colorida de uma amostra de resina fotoelástica submetida a um carregamento.**  
Fonte: autor.

Os dois tipos mais usuais de polariscópio são: polariscópio plano, que utiliza dois polarizadores com estados de polarizações ortogonais, e o polariscópio circular/elíptico, que utiliza dois polarizadores, com estados de polarizações ortogonais, ou não, e duas placas de  $\frac{1}{4}$  de onda.

As ilustrações das figuras 2 e 3, mostram os esquemas gerais dos dois polariscópios, respectivamente, citados (JUNIOR, 2003).

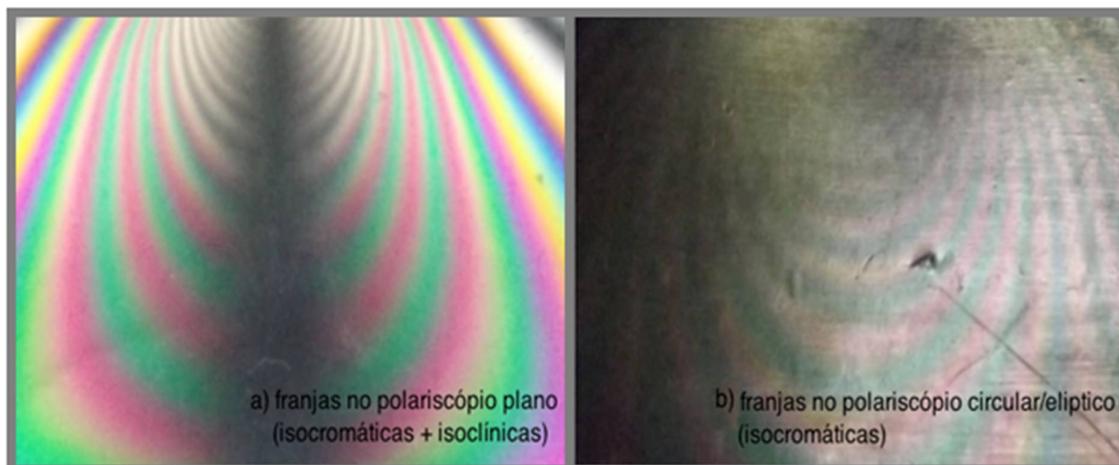


**Figura 2: Esquema do polariscópio plano.**  
Fonte: autor.



**Figura 3 : Esquema do polariscópio circular/elíptico de configurações: a) polarizadores com estados de polarizações ortogonais; b) polarizadores com estados de polarizações paralelos.**  
Fonte: autor.

As imagens da figura 4 apresentam as franjas a) isocromáticas (coloridas) e isoclínicas (pretas) geradas num polariscópio plano e b) isocromáticas geradas num polariscópio circular/elíptico na configuração de campo claro, quando é realizado um esforço externo  $P \cong (5,89 \pm 0,01) \text{ N}$ , numa amostra de resina livre de material inserido.



**Figura 4: Franjas isocromáticas e isoclínicas.**  
Fonte: autor.

Numa imagem colorida, dependendo da carga sobre o material, nota-se que uma sequência de cores se repete ao longo do mesmo. À ordenação numérica dessas cores dá-se o nome de ordem de franjas  $N$ , que está associada diretamente à mudança do estado de polarização, devido à aplicação da carga externa. Este fato é observado quando a amostra é colocada entre dois polarizadores com estados de polarizações perpendiculares entre si. Quantitativamente, essa ideia é demonstrada a partir da Lei de Tensão Óptica (KUSKE, 1974), que estabelece, através de equações, a dependência da birrefringência com o campo de deformações, através das diferenças de tensões de pressão em cada pixel da imagem.

### 3. Materiais

#### 3.1. Amostras Fotoelásticas

As amostras utilizadas nesse trabalho foram resinas fotoelásticas, especificamente a resina epoxídica, na forma líquida, incolor e viscosa, na faixa de 11000 a 14000 cPs, à 20°C com massa específica  $(1,16 \pm 0,01)\text{g/cm}^3$ . Essa é uma das resinas que apresenta excelente adesão à grande quantidade de apresentação de franjas fotoelásticas, sob tensão simulada com cargas. Isso a caracteriza como resina fotoelástica.

Resinas são compostos orgânicos derivados de petróleo, que passa de seu estado líquido para o sólido através de um processo químico denominado “polimerização”.

A resina fotoelástica é formada de um líquido incolor viscoso de composição epoxídica que, ao ser misturada com uma substância endurecedora, torna-se sólida, porém flexível. A resina utilizada nesse trabalho foi: SQ 2220 com endurecedor SQ 3154, cujo fabricante é a indústria SILAEX<sup>®</sup> Química Ltda.

O endurecedor SQ 3154 é um líquido límpido incolor à base de poliamina modificada que promove a melhor adesão com boa resistência térmica, química e mecânica com baixa exotermia, possuindo boa solubilização na resina com proporções não críticas, permitindo cura homogênea com boa velocidade e propriedades finais bastante controláveis.

### **3.2. Moldes de Silicone**

Os moldes para confecção das resinas fotoelásticas foram feitos com borracha de silicone azul (BS ADESIVO AZUL PS), cujo fabricante é a indústria SILAEX<sup>®</sup> Química Ltda. A borracha azul de silicone é um elastômero bi-componente, vulcanizável à temperatura ambiente e que, após a adição de um catalisador, resulta num produto elástico e resistente.

## **4. Métodos**

### **4.1. Preparação das Amostras**

A preparação da amostra começa com a construção de moldes, pois a resina é líquida com alta viscosidade e, após curar, assume a forma desejada. Para obtenção dos formatos das amostras foram utilizados paralelepípedos de acrílico confeccionados na empresa Caplast.

#### **4.1.1. Moldes**

A figura 5 apresenta a borracha de silicone, ainda na forma líquida, antes da utilização do catalisador.



**Figura 5: Borracha líquida de silicone azul BS ADESIVO PS**  
Fonte: grupo de iniciação científica FATEC de Itaquera, maio/2014.

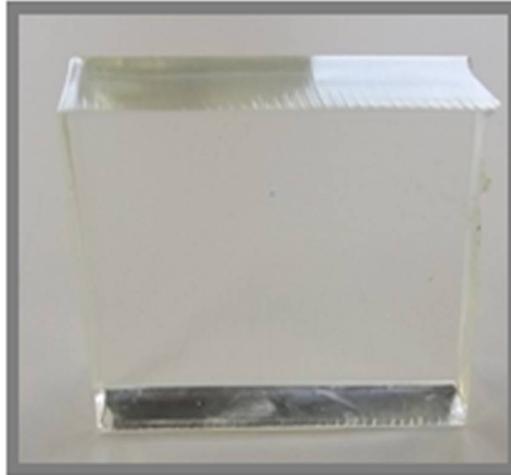
O catalisador, adicionado na borracha líquida, produz uma reação química que garante o seu endurecimento, mantendo-a com elasticidade e resistência. A proporção entre catalisador e borracha líquida utilizada foi aproximadamente 12 gotas de catalisador para cada 10 ml de borracha líquida. O tempo de secagem, em condições normais de pressão e temperatura, 1 atm e 25 °C, varia entre 2 e 3 horas para uma quantidade média de 20 ml de solução (borracha líquida e catalisador). As soluções líquidas foram curadas em recipientes construídos com papel cartão especial e envolvido de fita adesiva, para evitar vazamentos, como mostra a figura 6. Nela, o modelo é posicionado na caixa de papelão, considerando o seu tamanho e o da amostra a ser confeccionada com o molde.



**Figura 6 : Confeção do molde de silicone**  
**Fonte: grupo de iniciação científica FATEC de Itaquera, maio de 2014.**

#### **4.1.2. Confeção das amostras de resinas fotoelásticas**

A proporção, utilizada, entre a resina líquida e o endurecedor foi de 2 para 1. Uma maior ou menor quantidade de endurecedor produz uma resina sólida mais ou menos rígida. O tempo de secagem, em condições normais de pressão e temperatura, 1 atm e 25 °C, varia entre 4 e 6 horas. Após a mistura, o líquido é vertido dentro dos moldes e após a secagem pode ser retirado do molde. É preciso cuidado para não introduzir bolhas de ar no preenchimento do molde, após este procedimento pode-se “bater” o molde na mesa para retirar eventuais bolhas de ar. A figura 7 apresenta o resultado de uma amostra fotoelástica.

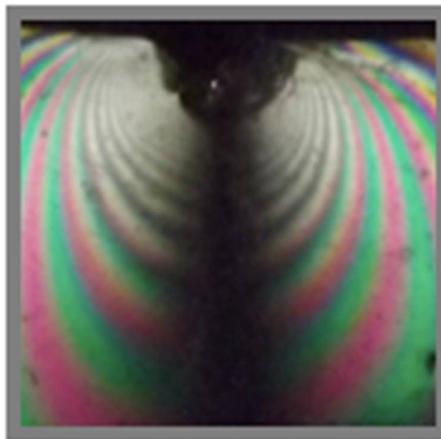


**Figura 7: Resultado da confecção de uma resina fotoelástica.**  
**Fonte: grupo de iniciação científica FATEC de Itaquera, maio de 2014.**

## **4.2. Técnica de fotoelasticidade**

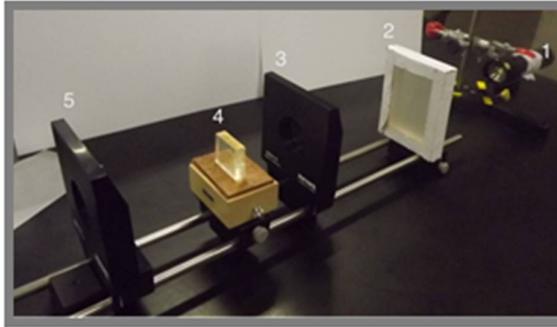
### **4.2.1. Arranjo fotoelástico (polariscópio)**

O instrumento óptico para realizar os experimentos de fotoelasticidade é denominado polariscópio, que utiliza as propriedades da luz polarizada em sua operação. A configuração experimental utilizada nesse trabalho, para a Fotoelasticidade, foi a do polariscópio plano, que forneceu as franjas tanto isocromáticas (coloridas) quanto isoclínicas (pretas), como mostra a figura 8.



**Figura 8: Franjas icocromáticas (coloridas) e isoclínicas (pretas)**  
**de uma amostra sob uma carga  $P \cong (5,89 \pm 0,01) \text{ N}$**   
**Fonte: grupo de iniciação científica FATEC de Itaquera, maio de 2014.**

A figura 9 mostra a configuração experimental para o polariscópio plano. A configuração é composta por uma fonte de luz monocromática ou policromática (1) que fornece o (s) comprimento (s) de onda necessário (s) para a completa obtenção dos dados.



**Figura 9: Configuração experimental para Fotoelasticidade (1 – fonte de luz branca; 2 – dispersor; 3 – polarizador 1; 4 – amostra (resina fotoelástica); 5 – polarizador 2 (analizador))**  
**Fonte: grupo de iniciação científica FATEC de Itaquera, maio de 2014.**

Usa-se um dispersor de luz (2) para diminuir a intensidade da luz central, um primeiro polarizador (3) que, em conjunto com um segundo polarizador (5) cruzado, ou seja com eixos de polarizações perpendiculares, produz o efeito de birrefringência sobre a amostra fotoelástica (4), submetida a uma carga. O resultado da observação é registrado numa câmera fotográfica.

#### **4.2.2. Coleta de dados da amostra fotoelástica**

Foram coletados dados de três amostras: (i) simples de resina fotoelástica para ser utilizada como amostra padrão; (ii) resina fotoelástica contendo uma peça de alumínio e (iii) resina fotoelástica contendo uma peça de cobre. Foram aplicadas cargas iguais,  $P = (5,89 \pm 0,01) \text{ N}$ , às três amostras. As massas das peças de alumínio e cobre inseridas nas resinas foram, respectivamente,  $m_{\text{Alumínio}} = (0,050 \pm 0,001) \text{ kg}$  e  $m_{\text{cobre}} = (0,165 \pm 0,001) \text{ kg}$ .

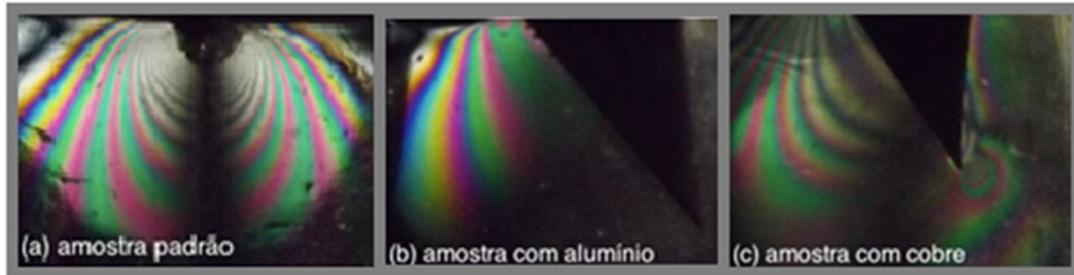
A coleta de dados foi realizada da seguinte forma: (i) posicionou-se as amostras (4) no centro do polariscópio, entre os polarizadores (3) e (5), e colocou-se a massa desejada sobre as amostras; (ii) esperou-se algum tempo para a acomodação da distribuição de tensões sobre os materiais e registrou-se as imagens das franjas, utilizando uma câmera fotográfica.

Os parâmetros, fonte de luz, carga, distâncias no polariscópio, tempo de carga, dimensões das resinas fotoelásticas, geometrias das resinas fotoelásticas, dimensões dos materiais, geometria dos materiais, foram relativamente mantidos iguais para as amostras de cobre e alumínio. Isso garante uma maior confiabilidade nas observações.

Tomou-se o cuidado de preparar as três amostras com a mesma concentração de resina líquida e endurecedor, para que esse parâmetro não interferisse nas observações.

## 5. Análise de dados e resultados

A análise desse trabalho teve um caráter qualitativo. Para isso, foram registradas as franjas de uma resina fotoelástica: a) pura; b) contendo uma peça de alumínio e; c) com uma peça de cobre. Essas imagens estão apresentadas na figura 10.



**Figura 10 : Franjas para as amostras: (a) padrão; (b) com alumínio; (c) com cobre**  
Fonte: grupo de iniciação científica FATEC de Itaquera, maio de 2014.

Com isso, foram feitas comparações e contrastações, primeiro em relação à amostra padrão e, em seguida, entre uma amostra e outra (alumínio e cobre), como segue.

Comparando as amostras da figura 10, pode-se observar que:

- (i) A amostra padrão apresenta tanto franjas isocromáticas (coloridas), quanto franjas isoclínicas (preto). O mesmo ocorre nas amostras de alumínio e de cobre;
- (ii) Os espaçamentos entre franjas na amostra de cobre se aproximam bastante dos espaçamentos entre franjas na amostra padrão;
- (iii) As cores verde, amarelo e rosa, aparecem nas três amostras com bastante frequência. As cores em tonalidade azul aparecem com maior frequência nas amostras de alumínio e padrão;
- (iv) As curvas das franjas na amostra de cobre se aproximam das curvas das franjas na amostra padrão.

Contrastando as amostras da figura acima, pode-se observar que:

- (i) As franjas isoclínicas nas amostras de alumínio e cobre são muito menos perceptíveis que na amostra padrão. As franjas isoclínicas são mais perceptíveis na amostra de cobre em relação à amostra de alumínio;
- (ii) A nitidez das cores na amostra de cobre é menor do que na amostra padrão. A nitidez das cores na amostra de alumínio é maior do que na amostra padrão. Como consequência, a nitidez na amostra de alumínio é maior que a da amostra de cobre;

- (iii) Não há muita semelhança entre os espaçamentos das franjas nas amostras de alumínio e padrão. Não há muita semelhança entre os espaçamentos das franjas nas amostras de alumínio e cobre;
- (iv) As cores de tonalidade azul aparecem com menos frequência na amostra de cobre, em relação à amostra padrão;
- (v) As curvas das franjas na amostra de alumínio se mostram com maior raio em relação à amostra padrão. As curvas das franjas na amostra de alumínio se mostram com maior raio em relação à amostra de cobre;
- (vi) A quantidade de franjas na amostra padrão é maior do que nas amostras de cobre e alumínio. A quantidade de franjas na amostra de cobre é maior do que na amostra de alumínio;
- (vii) Em relação à amostra padrão que apresenta franjas nos lados direito e esquerdo na mesma proporção (para uma linha que divide a figura ao meio), a amostra de cobre apresenta proporção menor do lado direito, enquanto que a amostra de alumínio não apresenta franjas do lado direito;

## **6. Discussões e conclusões**

Como existem diferenças nas franjas das amostras com cobre e alumínio em relação à amostra padrão, pode-se afirmar que materiais inseridos em amostras de resinas fotoelásticas alteram seu padrão de franjas observado num polariscópio devido ao esforço externo sobre a amostra mostrando que é possível estudar materiais segundo o modelo proposto. Entre as amostras com cobre e alumínio, também notou-se diferenças, mostrando que o tipo de material também altera o padrão de franjas. Isso indica que propriedades dos materiais, como densidade, podem estar relacionadas à essa mudança. Embora as dimensões dos materiais sejam iguais, suas massas são diferentes, devido suas diferenças de densidades. Além disso, os estados de elasticidade dos materiais são diferentes, afetando o campo de deformações, que implica em alterações nos índices de refração birrefringentes e, portanto, das franjas observadas. Para uma confirmação desse fato, será necessário fazer análises quantitativas do experimento. Dentre as diferenças encontradas entre as amostras com cobre e alumínio, destacam-se: (i) nitidez das cores, maior no alumínio; (ii) curvatura das franjas, com maior raio para o alumínio; (iii) quantidade de franjas, maior na amostra de cobre; (iv) quantidade de franjas de um dos lados (direito), maior na amostra de cobre.

Embora os parâmetros, fonte de luz, carga, distâncias no polariscópio, tempo de carga, dimensões das resinas fotoelásticas, geometrias das resinas fotoelásticas, dimensões dos

materiais, geometria dos materiais, tenham sido relativamente mantidos iguais para as amostras de cobre e alumínio, será necessário, para uma futura análise quantitativa, um detalhamento mais refinado para a igualdade dos parâmetros citados, além de efetuar diversas medidas com parâmetros diferenciados de cada material. A fonte de luz branca produz melhor qualidade nas franjas e isso foi conseguido com lâmpadas fluorescentes, ao contrário das lâmpadas de LED. Mesmo com o cuidado de preparar as três amostras com a mesma concentração de resina líquida e endurecedor, para que esse parâmetro não interferisse nas observações, será necessário maior rigor para uma futura análise quantitativa.

Não se conseguiu uma maleabilidade desejada para as resinas e isso dificultou o trabalho de observação das franjas, já que utilizou-se uma grande carga para o experimento, não permitindo uma maior sensibilidade do sistema. Para a futura análise quantitativa, será necessário levantar dados com diversos valores de carga, para verificar a evolução das franjas e associá-las melhor às tensões internas na resina fotoelástica, para cada material inserido.

Houve dificuldade em ajustar o corpo de prova no interior da resina fotoelástica, produzindo uma relativa imprecisão na observação do fenômeno. Será necessário, para a análise quantitativa, melhorar a técnica de inclusão do corpo de prova na resina fotoelástica.

Na próxima etapa do trabalho, uma análise quantitativa ajudará a encontrar valores que permitirão concluir sobre as diferenças entre materiais e, como hipótese, decidir sobre suas propriedades, como por exemplo a densidade, e associar essas propriedades à resistência e fraturas de materiais.

Nesse contexto, entende-se que essa pesquisa auxiliou o início da compreensão da técnica de Fotoelasticidade e apontou para uma continuidade do trabalho. O próximo passo será utilizar a metodologia quantitativa da técnica no sentido de estudar propriedades de materiais e associar esse estudo à resistência e fraturas de materiais, por meio da observação das franjas nas resinas Fotoelásticas e dos cálculos estatísticos para as ordens e valores de franjas na obtenção dos campos de deformações, associados às diferenças de tensões birrefringentes em cada pixel da imagem.

## **7. Agradecimentos**

À FATEC-Itaquera pelo espaço e parte dos materiais cedidos e ao IFUSP por meio do Prof. Dr. Mikiya Muramatsu, pela colaboração e parte dos materiais utilizados.

## **8. Referências bibliográficas**

EUGENE, H. **Óptica**. 2ª Ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2002.

FERREIRA, M. **Óptica e Fotônica**. Lisboa: Editora Lidel-Edições Técnicas, 2003.

JUNIOR, A.F.G.F. **Desenvolvimento de um sistema para análise automática do padrão de franjas fotoelásticas isocromáticas**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

KUSKE, A.; ROBERTSON, G. **Photoelastic Stress Analysis**. New York: John Wiley and Sons, 1974.

MEYER, *et al.* **Photoelastic analysis of bone deformation in the region of the mandibular condyle during mastication**. Journal of Cranio-Maxilo-Facial Surgery, Vol. 30, Issue 3, Pages 160-169, 2002.

QUINAN, M.A.D. **Uma metodologia para determinação do fator de intensidade de tensões causado por tensões térmicas utilizando a fotoelasticidade**. 2005. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo.

RIBEIRO, J.L.S. **Fundamentação da técnica fotoelástica, com a construção de um equipamento básico – o polariscópio moderno**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica, Minas Gerais

YOUNG, H.D.; FREEDMAN, R.A. **Física I**. Tradução de Sonia Midori Yamamoto. 12. Ed. São Paulo: Pearson, 2008.

#### **9. Informações complementares sobre os autores:**

**Antônio Valdinei Lima:** acadêmico de Tecnologia em Automação Industrial (TAI) e de Iniciação Científica da Fatec de Itaquera, *e-mail:* [antonio\\_valdinei@hotmail.com](mailto:antonio_valdinei@hotmail.com).

**Luan Neves da Silva:** acadêmico de TAI e de Iniciação Científica da Fatec de Itaquera, *e-mail:* [luannevessilva@gmail.com](mailto:luannevessilva@gmail.com).

**Charles Rodrigues da Silva:** acadêmico de TAI e membro do grupo de apoio à Iniciação Científica da Fatec de Itaquera, *e-mail:* [charles.crdsr@gmail.com](mailto:charles.crdsr@gmail.com).

**Carlos Gomes:** acadêmico de TAI e membro do grupo de apoio à Iniciação Científica da Fatec de Itaquera Prof. Miguel Reale, *e-mail:* [cglinux@gmail.com](mailto:cglinux@gmail.com).

**Esther Gehrti Regis Santos:** acadêmica de Tecnologia em Fabricação Mecânica e membro do grupo de apoio à Iniciação Científica da Fatec de Itaquera Prof. Miguel Reale, *e-mail:* [gehrti.dwg@gmail.com](mailto:gehrti.dwg@gmail.com).

**Henrique Sampaio Batista:** acadêmico de TAI e membro do grupo de apoio à Iniciação Científica da Fatec de Itaquera Prof. Miguel Reale, *e-mail:* [hrq.dasilva@gmail.com](mailto:hrq.dasilva@gmail.com).

**Lindaci Aparecida Ta Gein:** acadêmica de Tecnologia em Mecânica: Processos de Soldagem e membro do grupo de apoio à Iniciação Científica da Fatec de Itaquera Prof. Miguel Reale, *e-mail:* [lindatagein@gmail.com](mailto:lindatagein@gmail.com).

-----  
Artigo recebido em 09 de março de 2015 e aceito para publicação em 25 de junho de 2015.