

Carlos Alberto Martins Silva Filho

Efeito da pré-trinca em PMMA analisado por fotoelasticidade e teste do fator de concentração de tensões

Trabalho de Formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo para a obtenção do título de
Engenheiro.

São Paulo

2010

Carlos Alberto Martins Silva Filho

Efeito da pré-trinca em PMMA analisado por fotoelasticidade e teste do fator de concentração de tensões

Trabalho de Formatura apresentado
à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para a
obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Dr. Claudio
Geraldo Schön

São Paulo
2010

FICHA CATALOGRÁFICA

Silva

Filho, Carlos Alberto Martins ~~Silva~~

Efeito da pré-trinca em PMMA analisado por fotoelasticidade e teste do fator de concentração de tensões/ Filho, C. A. M. S. São Paulo, 2009. Número de páginas 33.

Trabalho de formatura – Escola Politécnica da USP – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

1.Fotoelasticidade 2. Pré-trinca 3. Concentração de tensões

"It's not whether you get knocked down; it's whether you get up."

~ Vince Lombardi

Agradecimentos

Agradeço ao professor Dr. Claudio Geraldo Schön pelo direcionamento na realização deste trabalho.

Agradeço ao senhor MSc. Joelmir Mariano de Souza pela imensa ajuda e apoio em todas as etapas da execução do projeto.

Agradeço a senhor MSc. Antonio Francisco Gentil Ferreira Junior pela oportunidade dada na execução dos testes.

Agradeço a minha família e a Carolina Tavares pelo apoio incondicional durante toda a graduação.

Resumo

Para a realização de testes de fraturas em materiais poliméricos, assim como em metais, é necessária a inserção de pré-trincas. Porém a inserção dessa pré-trinca causa danos maiores a matriz quando comparados as diferenças verificadas nos metais.

Neste trabalho foram estudados dois tipos de inserção de pré-trinca: método de batidas e inserção controlada por máquina eletromecânica. As análises foram realizadas por testes de K_{Ic} e análise de imagens do teste de fotoelasticidade de amostras de PMMA.

Os resultados mostraram que a introdução pré-trinca pela máquina eletromecânica causou menos danos a matriz polimérica do que as amostras onde as trincas foram introduzidas por batidas.

Palavras-chave: Fotoelasticidade. Pré-trinca. Concentração de tensões.

Abstract

Fracture mechanics testing of polymeric materials, so as metals, requires that pre-crack to be inserted. But the insertion of this pre-cracking introduces greater damages in the polymeric matrix than those observed in metals.

In this study two methods of insertion were valuated; tapping a razor blade and electromechanical machine controlled insertion. The analyses were made by fracture toughness factor tests and by images analysis of photoelasticity tests of PMMA.

The results showed the pre-cracking inserted by electromechanical machine caused less damage in the polymer matrix than tapping the razor blade.

Key words: Photoelasticity. Pre-cracking. Stress Concentration.

Lista de Figuras

Figura 1 (a) Geometria do defeito (b) Distribuição da tensão no corte X-X'4	
Figura 2 Modos de deslocamento da superfície da fratura (a) abertura; (b) cisalhamento e (c) rasgamento.	6
Figura 3 - Esquema de uma polariscópio plano.....	11
Figura 4 - Esquema de um polariscópio circular.....	12
Figura 5 - Esquema representativo das dimensões da amostras de PMMA entalhadas. Usada no teste de dobramento de três pontos.	15
Figura 6 - Amostra a ser entalhada, onde pode ser visto a linha guia, localizada em uma das bordas. Material PMMA.....	16
Figura 7 - Disco cortante utilizado para inserção de entalhes nas amostras. Medida do disco 100 x 1 (mm), número de dentes 100 e ângulo de afiação dos dentes 45°.	16
Figura 8 - Inserção de trincas "naturais" pelo método manual.....	17
Figura 9 - Método inserção da pré-trinca de forma controlada através do dispositivo na amostra de dobramento de três pontos, material PMMA.....	18
Figura 10 Foto frontal do polariscópio.....	22
Figura 11 Evolução da concentração de tensão	24
Figura 12 Destaque da formação das franjas na pré-trinca	25
Figura 13 Método de batidas - 5 kgf	26
Figura 14 Método controlado pela máquina - 5 kgf.....	26
Figura 15 Método de batidas - 7,5 kgf	27
Figura 16 Método controlado por máquina - 7,5 kgf	27
Figura 17 Método de batidas - 10 kgf	28
Figura 18 Método controlado por máquina - 10 kgf	28
Figura 19 Método de batidas - 12,5 kgf	29
Figura 20 Método controlado por máquina - 12,5 kgf	29

Figura 21 Método de batidas - 14 kgf	30
Figura 22 Método controlado por máquina - 14 kgf	30

Lista de Tabelas

Tabela 1 Tabela de comparação de K_{Ic} de materiais.....	7
Tabela 2 - Dimensões das amostras de dobramento de três pontos. Nas dimensões utilizadas a amostra fraturou em estado de tensão plana.....	15

Sumário

1	Introdução	1
2	Objetivos	3
3	Revisão Bibliográfica.....	4
3.1	Concentração de tensões	4
3.1.1	Introdução aos concentradores de tensão.....	4
3.1.2	Tenacidade à fratura.....	5
3.1.3	Fator de concentração de tensões (K_{Ic}).....	6
3.2	Fotoelasticidade.....	8
3.2.1	História	8
3.2.2	Fundamentos.....	10
4	Materiais e Métodos	13
4.1	Materiais utilizados	13
4.2	Preparação dos corpos de prova	13
4.2.1	Preparação dos corpos de prova para análise de fotoelasticidade.....	13
4.2.2	Preparação dos corpos de prova para teste de K_{Ic}	14
4.3	Testes.....	19
4.3.1	Análise fotoelástica.....	19
4.3.2	Teste do fator de concentração de tensões.....	19
5	Resultados e Discussões	19
5.1	Testes de K_{Ic}	19
5.2	Teste de fotoelasticidade	21
6	Conclusões	31
7	Referências	33

1 Introdução

A aplicação da mecânica da fratura no estudo de crescimento de trincas em polímeros tem recebido considerável atenção. O princípio básico da mecânica da fratura descreve que a resistência de muitos sólidos é conduzida pela presença de defeitos que agem como concentradores de tensão e, muitas teorias são capazes de analisar matematicamente como estes defeitos propagam quando sob tensão.

Estudos por meio do mecanismo de fratura linear elástica (MFLE) podem fornecer uma descrição exata do comportamento mecânico da trinca. No MFLE o campo de tensão linear elástico ao redor da ponta da trinca é usado para determinar as condições críticas relacionada à iniciação da fratura em materiais frágeis. Duas principais condições para ocorrer à fratura são propostas; sendo a primeira o critério da energia de Griffith's, que posteriormente foi proposto por Orowan's, em que supõem que a fratura ocorre quando uma energia suficiente proveniente do campo de tensão é liberada para o crescimento da trinca, ou seja, quando a tensão local mais alta da trinca de orientação mais perigosa alcançar o valor crítico igual ao da coesão molecular do material. Já a segunda condição, proposta por Irwin, encontrou que o campo de tensão ao redor da ponta da trinca em um material linear elástico pode ser definido por um parâmetro denominado fator de intensificação de tensão, K , onde a fratura só ocorre quando o valor de K excede o valor crítico, K_c ; sendo K um parâmetro de tensão independente do material, e K_c a constância da fratura, uma medida da propriedade do material. Dessa forma, quando um entalhe bem agudo é inserido em alguma região de um material, ele se torna um ponto de aumento de tensão com uma conseqüente aplicação de carga, sendo que este ponto pode servir como o local de iniciação da trinca; porém, devemos ressaltar que, em materiais frágeis a fratura ocorre por rompimento das ligações imediatamente à ponta da trinca sem a ocorrência de arredondamento da mesma.

O PMMA é reconhecido como um material exemplar para testes de fratura frágil, por ser um material relativamente homogêneo e isotrópico, que rompe de maneira frágil a temperatura ambiente; também possui uma transparência

óptica, em função de ser um material amorfo e não possuir uma estrutura cristalina, que permite uma observação direta da região na ponta da trinca. Por estas vantagens o PMMA é um material adequado para testes de fratura e para análise da fratura característica de materiais frágeis.

Existem diversas maneiras de se analisar os efeitos da trinca nos materiais, sendo o teste de K_{Ic} um dos mais utilizados, neste trabalho além do teste de tenacidade a fratura, o efeito da pré-trinca foi avaliado por meio de imagens. Utilizando a propriedade de birrefringência, ou seja, comportamento de materiais transparentes, amorfos e opticamente isotrópicos quando livres de tensões, se tornam opticamente anisotrópicos e apresentam características semelhantes aos cristais quando são carregados, sendo que estas características persistem enquanto o carregamento é mantido e desaparecem quando as cargas são removidas. As amostras de PMMA foram submetidas a testes no polariscópio para a verificação dos efeitos da trinca na intensidade das tensões na ponta da trinca.

2 Objetivos

Este trabalho propõe a mostrar as principais diferenças resultantes da variação do método de inclusão de pré-trincas em PMMA, comparando os métodos de batida e controlado em máquina eletromecânica. Analisando estes efeitos pelo cálculo do fator de concentração de tensões K_{Ic} e com imagens de ensaios fotoelásticos.

3 Revisão Bibliográfica

3.1 Concentração de tensões

3.1.1 Introdução aos concentradores de tensão

Os materiais rígidos, de maneira geral, apresentam medidas de tensões de fratura significativamente menor do que aquelas previstas pelos cálculos teóricos baseados na energia das ligações atômicas. Essa diferença pode ser explicada pela presença de pequenas falhas ou trincas na superfície ou no interior do material. Esses defeitos diminuem a tenacidade a fratura pois causam amplificações das tensões a que o material está submetido, pois as tensões concentram-se, normalmente, nas pontas desses defeitos dependendo da orientação e da geometria da trinca.

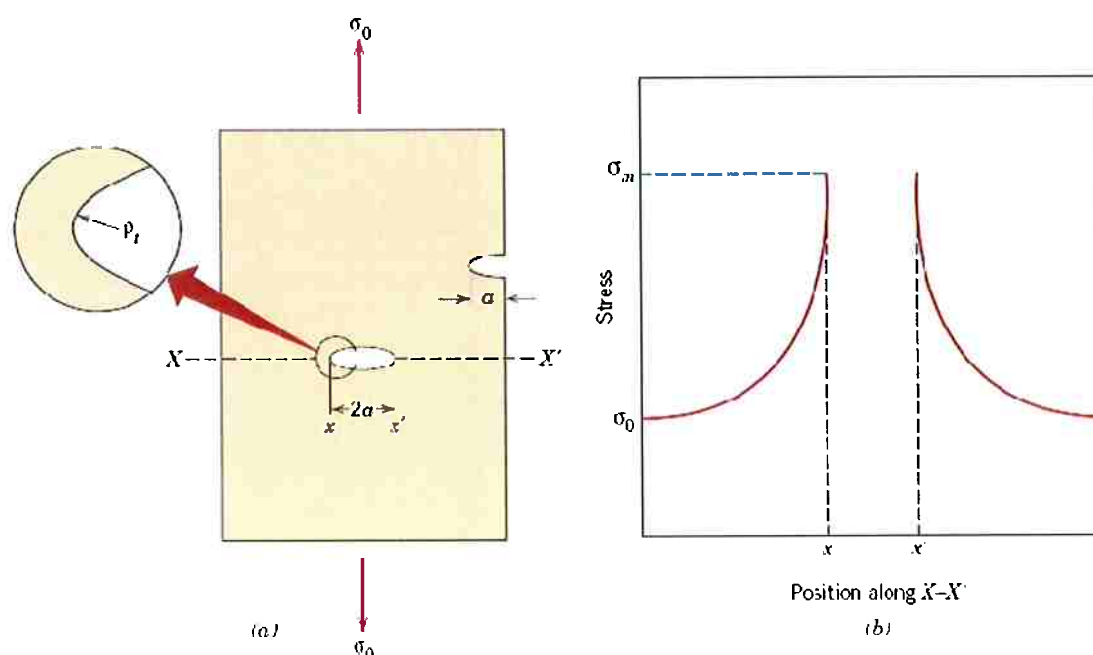


Figura 1 (a) Geometria do defeito (b) Distribuição da tensão no corte X-X'

Como pode ser visto na figura acima, quando uma tensão σ_0 é aplicada, na ponta da trinca, pode-se notar o aumento da tensão onde a trinca apresenta menor raio e a diminuição da tensão, tendendo a σ_0 quando nos afastamos do defeito. Esse ponto de amplificação da tensão aplicada é denominado concentrador de tensão ^[1].

Para a modelagem do fenômeno, assumimos que o defeito tem formato elíptico e é orientado perpendicularmente à direção da tensão aplicada. Firmadas estas hipóteses obtemos que a tensão máxima (σ_m) é proporcional ao tamanho da trinca (a) e inversamente proporcional ao menor raio da elipse, como mostra a equação abaixo:

$$\sigma_m = 2 \sigma_0 \sqrt{\frac{a}{\rho_t}}$$

Onde:

σ_m = tensão máxima

σ_0 = tensão aplicada

a = tamanho da trinca

ρ_t = raio de curvatura

A razão entre a tensão máxima e a tensão aplicada é chamada de **fator de concentração de tensões (K_t)**. Portanto:

$$K_t = \frac{\sigma_m}{\sigma_0} = 2 \sqrt{\frac{a}{\rho_t}}$$

3.1.2 Tenacidade à fratura

A evolução dos conceitos tratados anteriormente trouxeram expressões que relacionam a tensão crítica para a propagação de trincas com a espessura dessas trincas, como abaixo, que é a resistência do material a fratura frágil.

$$K_Ic = Y \sigma_c \sqrt{\pi a}$$

Onde:

K_Ic é o fator de tenacidade a fratura

Y é o fator de forma que depende da geometria da trinca e da amostra

σ_c é a tensão crítica de propagação

a é o comprimento da trinca

Para amostras muito finas o valor de K_c varia com a espessura do corpo de prova, porém quando o tamanho da amostra é muito maior do que as dimensões da trinca, o valor de K_c independe da espessura. Nessa situação tem-se um estado de plano de deformação, ou seja, quando uma das tensões principais se anula. Nesse caso temos o K_{Ic} .

3.1.3 Fator de concentração de tensões (K_{Ic})

O índice I de K_{Ic} provém do número romano “um” e denota que a fratura é em I, como mostra a figura (a) abaixo.

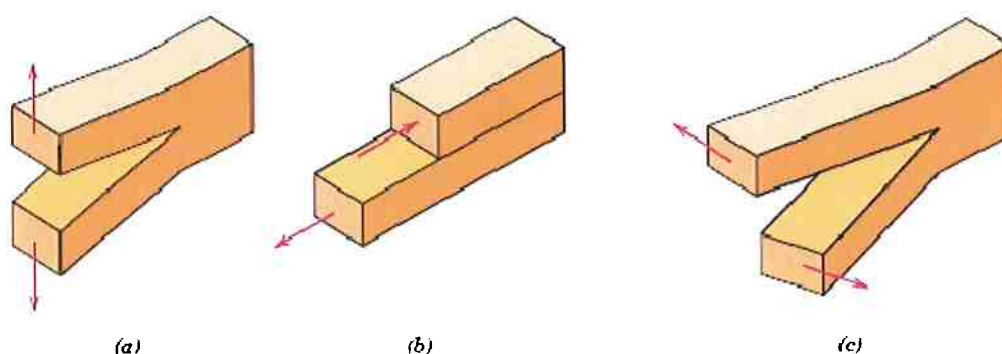


Figura 2 Modos de deslocamento da superfície da fratura (a) abertura; (b) cisalhamento e (c) rasgamento.

O Fator de Intensidade de Tensão K_I pode ser definido como sendo o fator que descreve a amplificação da tensão local à frente da raiz da trinca, ou seja, o fator que associa as tensões à frente da trinca com a singularidade. Enfim, quando o Fator de Intensidade de Tensão K_I ultrapassa um determinado valor, a trinca se propaga. Esse valor limite é conhecido como Tenacidade à Fratura do material, designado K_{Ic} , é uma propriedade mecânica do material (a tenacidade à fratura, K_{Ic} é medida em $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$). Para uma trinca de tamanho crítico, a_c , a tenacidade K_{Ic} é a medida em termos do fator de intensidade da tensão de ruptura e pode ser escrito como a seguir ^[1]:

$$K_{Ic} = \sigma_c \sqrt{\pi a_c} f\left(\frac{a_c}{W}\right)$$

Onde:

K_{Ic} é o fator de tenacidade a fratura;

— é o fator de forma que depende da geometria da trinca e da amostra;

σ_c é a tensão crítica de propagação e

a_c é o comprimento da trinca

Tabela 1 Tabela de comparação de K_{Ic} de materiais

<i>Material</i>	<i>Yield Strength</i>		<i>K_{Ic}</i>	
	<i>MPa</i>	<i>ksi</i>	<i>MPa√m</i>	<i>ksi√in.</i>
Metals				
Aluminum Alloy ^a (7075-T651)	495	72	24	22
Aluminum Alloy ^a (2024-T3)	345	50	44	40
Titanium Alloy ^a (Ti-6Al-4V)	910	132	55	50
Alloy Steel ^a (4340 tempered @ 260°C)	1640	238	50.0	45.8
Alloy Steel ^a (4340 tempered @ 425°C)	1420	206	87.4	80.0
Ceramics				
Concrete	—	—	0.2–1.4	0.18–1.27
Soda-Lime Glass	—	—	0.7–0.8	0.64–0.73
Aluminum Oxide	—	—	2.7–5.0	2.5–4.6
Polymers				
Polystyrene (PS)	—	—	0.7–1.1	0.64–1.0
Poly(methyl methacrylate) (PMMA)	53.8–73.1	7.8–10.6	0.7–1.6	0.64–1.5
Polycarbonate (PC)	62.1	9.0	2.2	2.0

Fonte: Callister, Ed. 7

3.2 Fotoelasticidade

3.2.1 História

A descoberta da dupla refração (birrefringência) artificial, i.e., o comportamento de materiais transparentes, amorfos e opticamente isotrópicos quando livres de tensões, se tornam opticamente anisotrópicos e apresentam características semelhantes aos cristais quando são carregados, sendo que estas características persistem enquanto o carregamento é mantido e desaparecem quando as cargas são removidas, foi feita por Sir David Brewster em 1816. Ele descobriu que um prato de vidro sob tensão compressiva adquiria as propriedades de um cristal uniaxial negativo e sob tração as de um cristal uniaxial positivo. Em cada caso a linha de tensão corresponde ao eixo óptico no cristal análogo. Isso é equivalente a dizer que a luz passando por um prato em qualquer direção normal a linha de tensão é polarizada perpendicularmente aquela linha e no caso de pressão, a onda cujas vibrações são paralelas a linha de tensão viajaram com velocidade maior do que as ondas que vibravam perpendicularmente a essa linha. Filon descobriu, muitos anos depois, que as propriedades ópticas dos vidros tinham grandes variações dependentes da composição do vidro^[2].

Diversos pesquisadores, notavelmente Kerr e Pockels, investigaram esse fenômeno, em todos os casos utilizando tração ou compressão simples, aplicadas ao centro da amostra.

Kerr dividiu um raio polarizado em dois e os fez atravessar duas amostras similares de vidro, uma sob tensão em outra sem, depois recombinau os feixes e obteve a interferência entre eles. Por esse meio ele verificou que a onda vibrando paralela ou perpendicular linha de tensão eram retardadas proporcionalmente a tensão^[2].

Filon conduziu uma série de experimentos nos quais ele media a defasagem absoluta de cada onda polarizada em vários vidros sob tração ou compressão, verificando que as razões entre o atraso e a tensão eram iguais tanto para as amostras sob tração quanto para as sob compressão. Ele também

concluiu que o atraso varia com o comprimento de onda da luz utilizada, porem com um efeito secundário^[2].

As conclusões destes primeiros experimentos podem ser resumidas da seguinte maneira^[3]:

(i) Se um sólido transparente isotrópico como um vidro, for submetido a uma tensão normal, ele se comporta como um cristal uniaxial, sendo direção da tensão o eixo óptico do cristal.

(ii) Se um feixe de luz passar por uma amostra de um material sob tensão perpendicularmente ao eixo óptico, esse feixe é polarizado em duas ondas que serão, respectivamente, paralela e perpendicular ao eixo.

(iii) O atraso produzido pela tensão em cada onda é proporcional à tensão, mas com constantes de proporcionalidades diferentes.

Em 1841, Neumann conduziu a primeira pesquisa sobre a teoria da dupla refração artificial em um sólido sujeito a um sistema de forças qualquer. Ele atribuiu o efeito à deformação no sólido e obteve seus resultados em função da deformação. Em 1852, Maxwell, aparentemente desconhecendo as pesquisas de Neumann, fez um trabalho semelhante expressando os resultados em função da tensão e as conclusões foram as mesmas. Sendo resumidas, em termos da tensão, da seguinte forma:

(i) Em qualquer ponto de um material transparente, os eixos de polarização da luz passando por ele, são paralelos as direções da tensão principal no plano da frente da onda naquele ponto.

(ii) As diferenças de velocidade de dois raios polarizados opostamente, em um ponto é proporcional a diferença das duas tensões principais e é independente da tensão perpendicular ao plano da linha de frente da onda.

3.2.2 Fundamentos

3.2.2.1 Lei da Tensão Óptica

As mudanças nos índices de refração são linearmente proporcionais ao carregamento mecânico (e conseqüentemente às tensões e deformações para materiais linearmente elásticos) para materiais que exibem o efeito de birrefringência temporária, e seguem a seguinte relação (1) para o estado plano de tensões^[4]:

$$n_1 - n_0 = c_1 \sigma_1 + c_2 \sigma_2$$

$$n_2 - n_0 = c_1 \sigma_2 + c_2 \sigma_1$$

Sendo:

σ_1 e σ_2 as tensões principais no ponto

n_0 o índice de refração do material no estado não carregado

n_1 e n_2 os índices de refração do material na condição de carregamento, associado com as tensões principais (índices principais de refração),

c_1 e c_2 as constantes chamadas de coeficientes ópticos de tensões.

Assim, quando materiais birrefringentes são submetidos a carregamentos e vistos através de luz polarizada, exibem o campo de tensões/deformações na forma de faixas coloridas denominadas franjas isocromáticas. Este padrão de franjas é linearmente proporcional às diferenças entre as tensões/deformações principais.

A defasagem relativa produzida pela tensão na amostra é mensurada pelo "método da interferência" que segue a relação:

$$\delta = hc(\sigma_1 - \sigma_2)$$

Onde h é a espessura do material e c o coeficiente óptico de tensões no material.

3.2.2.2 Polariscópio Plano

Para que o método da interferência seja efetivamente usado é necessário começarmos com um feixe de luz polarizada incidindo normalmente ao corpo de

prova. Esse feixe é geralmente dividido em duas ondas opostamente polarizadas, sendo defasadas em proporções diferentes, e depois são re-polarizadas em um único plano para que o fenômeno seja evidenciado. A polarização inicial do feixe e a re-polarização final são realizadas por dois polarizadores, chamados respectivamente de polarizador e analisador. À montagem desses elementos é dado o nome de polariscópio plano.

A interferência destas ondas resulta em uma intensidade de luz que é função do retardo δ e do ângulo θ , entre o eixo do analisador e a direção das tensões principais.

$$I = A^2 \sin^2 2(\phi) \sin^2 \frac{\pi \delta}{\lambda}$$

Sendo que quando o conjunto polarizador/analisador é paralelo as tensões principais ($\phi = 0$, linhas isoclínicas que nos ajuda a determinar a direção das tensões principais) ou a defasagem é igual ao comprimento de onda ($\delta = k$, linhas isocromáticas, que nos ajuda a dimensionar a magnitude da diferença de tensão nos pontos da amostra), a intensidade da luz é nula. Logo este polariscópio é utilizado para medir as tensões principais^[5].

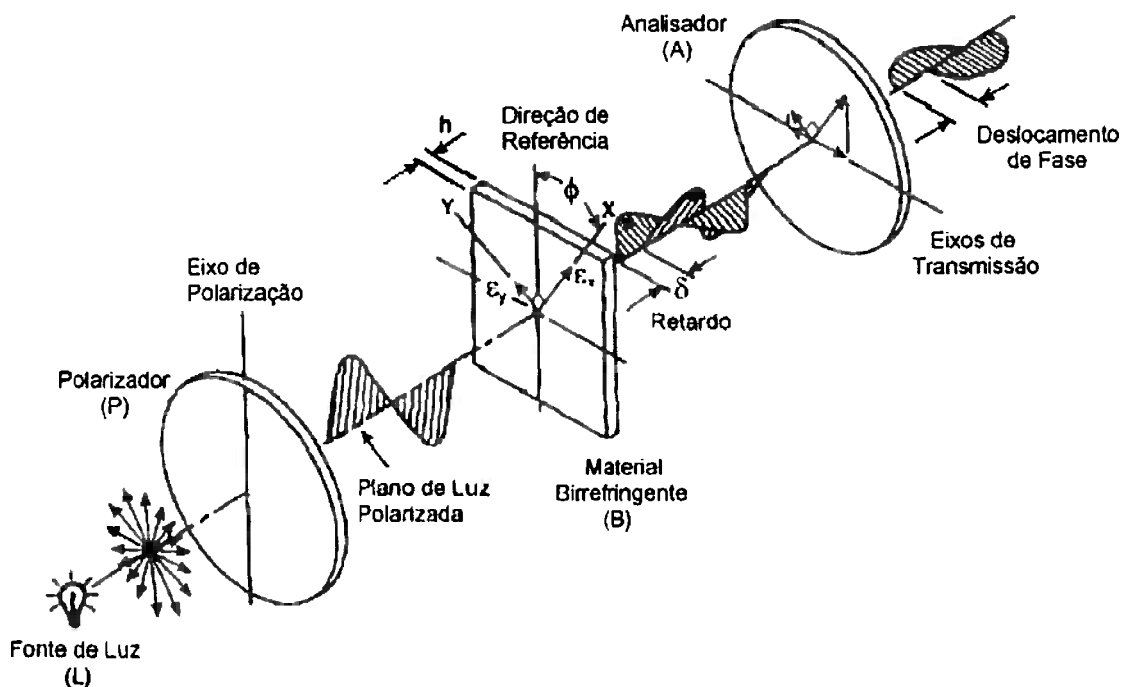


Figura 3 - Esquema de uma polariscópio plano

3.2.2.3 Polariscópio Circular

As linhas isoclínicas costumam ser maiores e normalmente tendem a “mascarar” as isocromáticas e para que a direção das tensões principais não influencie o padrão das franjas, são utilizados filtros chamados de placas quarto de onda, que produzem luz polarizada circularmente. Esses filtros são normalmente feitos de mica e de espessura tal, que o retardo das fases seja de $\frac{1}{4}$ de comprimento de onda^[5].

Portanto a relação torna-se:

—

E a intensidade da luz torna-se nula quando — é nula, ou seja, quando $- = N$, sendo N qualquer numero inteiro e é chamado de ordem de franja.

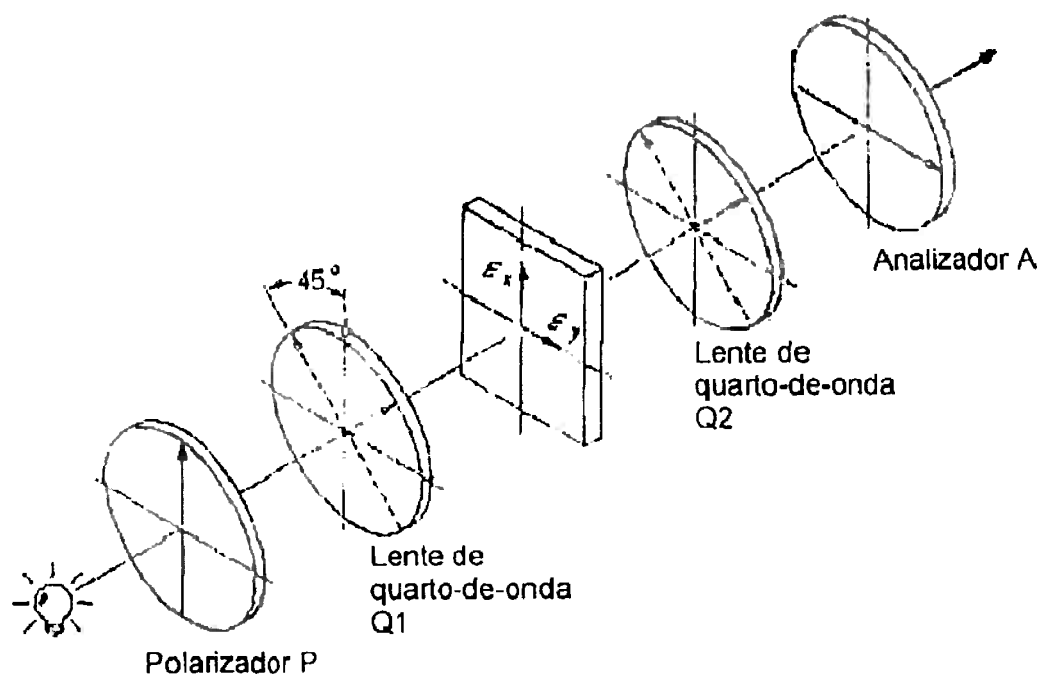


Figura 4 - Esquema de um polariscópio circular

3.2.2.4 O efeito da diferença das tensões principais

A ordem de franjas é função da defasagem entre os feixes, que pela equação do método da interferência, vemos que é proporcional a diferença de tensões. Como abaixo:

$$\delta = N\lambda = hc(\sigma_1 - \sigma_2)$$

Portanto quanto maior a diferença de tensões maior o numero de franjas.

4 Materiais e Métodos

A seção de materiais e métodos deve apresentar, o mais detalhadamente possível, todas as técnicas utilizadas e todos os pormenores de preparação de amostras. Deve também descrever os materiais utilizados e suas procedências, as técnicas de beneficiamento e preparação dos materiais, bem como as minúcias de sua obtenção. Cada técnica ou material deverá ter sua seção específica.

4.1 Materiais utilizados

O material utilizado foi o PMMA, resina para propósitos gerais, (resina de copolímero acrílico, Acrigel) fornecida pela empresa Resarbras da Bahia S.A. (RESARBRAS ACRÍLICOS), densidade 1180 Kg m³, resistência à fratura, $\sigma_f = 69$ MPa (7), índice do fluxo do fusão, MFI (10 min) = 2,5 g, temperatura de transição vítrea estimada, $T_g > 100^\circ \text{C}$ ^[6].

4.2 Preparação dos corpos de prova

4.2.1 Preparação dos corpos de prova para análise de fotoelasticidade

O PMMA granulado foi mantido pelo período de 24 horas á temperatura de 80°C para a retirada da umidade em uma estufa marca Heraus, modelo VT 6025 (Vacuum Drying Oven). Após este período, foi pesado 600g do polímero seco, o molde foi preenchido com essa quantidade do material. O conjunto então foi colocado na prensa para um pré-aquecimento à temperatura de 190°C por 20

minutos. Após o período de pré-aquecimento, o material foi prensado por 10 minutos á uma carga de aproximadamente 200Kgf. Após essa operação foram adicionados 200g de PMMA granulado seco ao molde, repetindo a etapa de pré-aquecimento por mais 10 minutos e posterior prensagem por mais 10 minutos. Depois disso houve “derramamento” do excesso de polímero que foi recolocado no molde, repetindo novamente a etapa de pré-aquecimento. Então o molde foi prensado á uma carga de 200Kgf por 30 minutos. O resfriamento foi feito na própria prensa mantendo a carga de 200Kgf por 14 horas e então a placa foi retirada.

As placas foram então cortadas nas medidas de WWxLLxHH, usinadas e polidas

4.2.2 Preparação dos corpos de prova para teste de K_{Ic}

As placas para a preparação dos corpos de prova para o teste de K_{Ic} foram moldadas por compressão, produzidas de acordo a norma ASTM D4703-03 á temperatura de 190°C e a uma pressão de fechamento do molde de 20 Mpa, como descrito no item 4.2.1. Sendo a medida do molde 180 x 180 x 6 mm. Todas as placas estavam livres de tensões internas, poros, trincas e homogêneas a inspeção visual.

As placas foram então cortadas seguindo o procedimento abaixo

1. Traçam-se as medidas L ($60 \pm 1\text{mm}$) e W ($13 \pm 1\text{mm}$) do corpo de prova na placa. Deixando 1mm a mais a cada medida para dar acabamento;
2. Corta-se seguindo as linhas traçadas na etapa anterior;
3. Lixa-se o excesso de material, usar uma lixa nº 100. Realiza-se o acabamento final com uma lixa nº 600.

A figura abaixo mostra esquematicamente as dimensões da amostra. Estando as dimensões atuais na tabela.

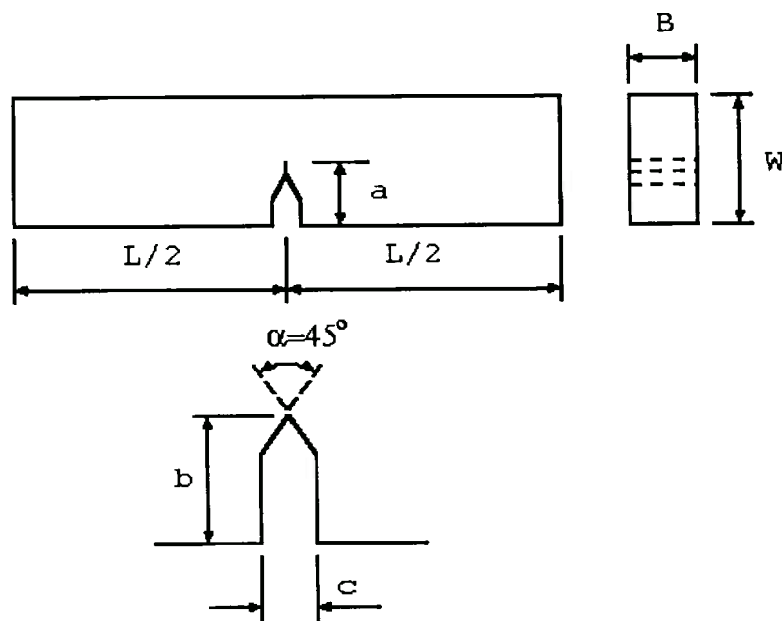


Figura 5 - Esquema representativo das dimensões da amostras de PMMA entalhadas. Usada no teste de dobramento de três pontos.

Tabela 2 - Dimensões das amostras de dobramento de três pontos. Nas dimensões utilizadas a amostra fraturou em estado de tensão plana

Material	B(mm)	W(mm)	L(mm)	b(mm)	c(mm)
PMMA	6,5	13,0	60,0	4,0	1,6

A fabricação dos entalhes nas amostras de dobramento de três pontos foi realizada da seguinte maneira:

Primeiro deve-se traçar uma linha guia de comprimento b (4 mm), da borda em direção ao centro da amostra, depois usa-se a linha obtida como guia para fazer o entalhe com a largura do disco (1,0mm) e profundidade de 4mm, e caso hajam rebarbas no entalhe remove-los por polimento com lixa nº 600.

Obs.: Usou-se uma fresa manual, onde foram fixados a amostra a ser entalhada e o disco cortante. Ambos podem ser vistos nas figuras 16 e 17 respectivamente. O disco trabalhou a uma velocidade de 3600 rpm e produziu entalhes com profundidade de 4mm = b e largura de 1mm = c , sendo a ponta do entalhe igual a 45°. O que pode ser visto nas figuras 17, 18 e 19^[6].

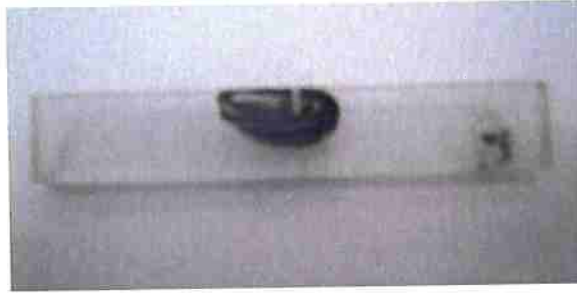


Figura 6 - Amostra a ser entalhada, onde pode ser visto a linha guia, localizada em uma das bordas. Material PMMA.



Figura 7 - Disco cortante utilizado para inserção de entalhes nas amostras. Medida do disco 100 x 1 (mm), número de dentes 100 e ângulo de afiação dos dentes 45°.

Para a introdução da pré-trinca foram utilizados os seguintes métodos:

i. Fabricação manual

a. Descrição do procedimento

- i. Encostar a ponta do estilete no final do entalhe. Este item deve ser realizado com muita atenção, para que o estilete não penetre na amostra;
- ii. Iniciar o processo de inserção da pré-trinca, ou seja, as "batidinhas".

- iii. Quando a pré-trinca atingir o comprimento ideal (2mm), parar o ensaio.



Figura 8 - Inserção de trincas "naturais" pelo método manual

ii. Pré-trincamento utilizando dispositivo eletromecânico

a. Descrição do procedimento

- i. Deve-se fixar o estilete no dispositivo;
- ii. Fixar o dispositivo na máquina (Kratos) e descer o estilete até uma distância de 7mm da base da máquina;
- iii. Encostar o final do entalhe na ponta do estilete subindo a amostra e fixar a amostra na base da máquina;
- iv. Zerar o item deformação na máquina Kratos;

- v. Programar a velocidade de descida do travessão da máquina para $0,01\text{mm min}^{-1}$, deformação máxima 2 mm e carga máxima 300 kgf (2940 N)
- vi. Iniciar o ensaio;
- vii. Quando a pré-trinca atingir o comprimento ideal (2mm), parar o ensaio e retirar a mesma.
- viii. De o item 1° ao 3° pode ser visualizado na figura 21.
- ix. Obs.: Em função do PMMA ser um material altamente frágil, pode ocorrer de a pré-trinca “colapsar” no instante de sua inserção e a amostra romper, perdendo-se a mostra.



Figura 9 - Método inserção da pré-trinca de forma controlada através do dispositivo na amostra de dobramento de três pontos, material PMMA

4.3 Testes

4.3.1 Análise fotoelástica

4.3.2 Teste do fator de concentração de tensões

O teste foi realizado em uma máquina universal eletromecânica de testes Kratos, modelo K 2.000MP utilizando a configuração de curvatura de 3 pontos. O vão suporte foi ajustado a 2mm. A carga foi medida usando uma célula de carregamento, previamente carregada de 20.000N e a velocidade de descida da lâmina foi ajustada a uma velocidade de 1 mm min^{-1} , com a aquisição e análise de dados feita com o software: Tracomp-W95 (TRCV 48), usando uma célula de carga de 19600 N (2000 Kgf). Onde se usou a configuração para ensaio de dobramento em três pontos sobre amostras pré-trincadas. A distância entre os pontos de apoio inferiores para fixação das amostras foi de 52 mm (4W). A velocidade de ensaio foi de 10 mm min^{-1} . O procedimento dos testes e análise dos resultados seguiram o protocolo de teste ESIS (2). Seguindo o protocolo foram testadas três amostras em cada condição de inserção de pré-trincas. A temperatura de teste foi de $25 \pm 2^\circ\text{C}$.

5 Resultados e Discussões

5.1 Testes de K_{Ic}

Foram analisadas 9 amostras, sendo três de cada método de inserção de pré-trincam e três da amostra apenas com o entalhe. Os métodos utilizados foram: método controlado por máquina eletromecânica e método de batidas.

Os testes de tenacidade a fratura forneceram a tensão máxima suportada pelas amostras, em posse desse dado, foram calculados os valores de K_{Ic} de acordo com a norma ASTM D 5045 – 99, seguindo a fórmula abaixo:

$$K_Q = \left(\frac{P_Q}{BW^{3/2}} \right) f(x)$$

where ($0 < x < 1$):

$$f(x) = 6x^{1/2} \frac{[1.99 - x(1-x)(2.15 - 3.93x + 2.7x^2)]}{(1 + 2x)(1-x)^{3/2}}$$

Onde :

P_Q tensão de ruptura;

B é a espessura;

W a altura e

x é o comprimento da trinca dividido pela altura W .

Com isso podemos notar na tabela abaixo as diferenças nos valores de K_{Ic} para cada variação no método de inserção da pré-trinca.

Tabela 3 Comparação dos valores de K_{Ic}

Método	B(cm)	W(cm)	a(cm)	p(KN)	x	f(x)	K _q (Mpa m ^{1/2})	<K _{Ic} > (Mpa m ^{1/2})	Std. Dev.
Entalhe controlado	0,64	1,28	0,61	0,116	0,48	9,90	1,58	1,78	0,17
Entalhe controlado	0,63	1,28	0,61	0,137	0,48	9,90	1,90		
Entalhe controlado	0,62	1,30	0,62	0,132	0,48	9,91	1,85		
Batida manual	0,62	1,29	0,60	0,091	0,47	9,56	1,24	1,18	0,05
Batida manual	0,65	1,30	0,60	0,091	0,46	9,46	1,16		
Batida manual	0,62	1,29	0,61	0,082	0,47	9,79	1,14		
Entalhado	0,65	1,30	0,40	0,149	0,31	6,21	1,25	1,23	0,03
Entalhado	0,64	1,30	0,40	0,147	0,31	6,21	1,25		
Entalhado	0,64	1,30	0,40	0,141	0,31	6,21	1,20		

5.2 Teste de fotoelasticidade

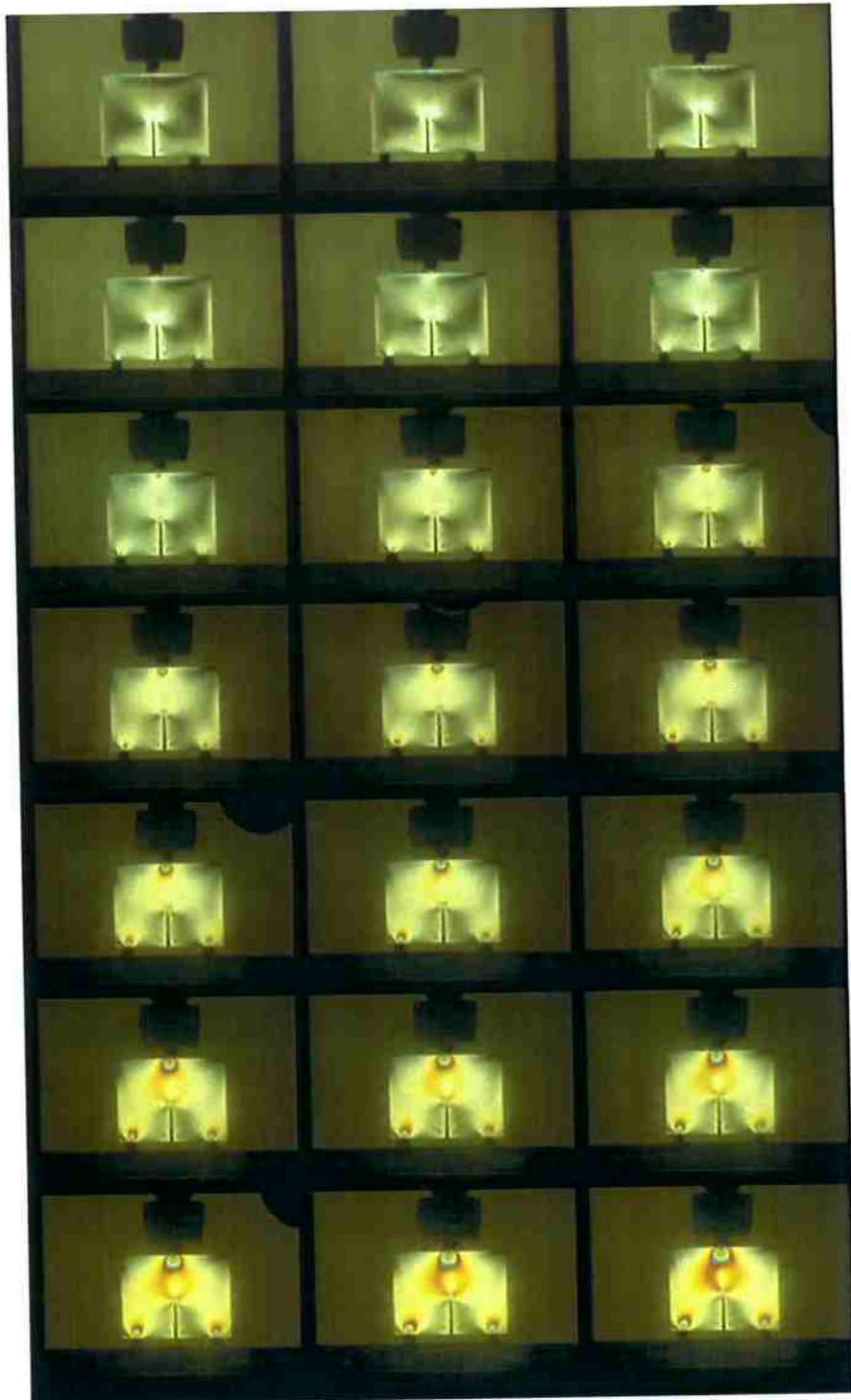
Os corpos de prova de PMMA com a pré-trinca inserida por batidas e com a trinca inserida pela máquina eletromecânica foram submetidos à compressão no polariscópio (mostrado a seguir) do Laboratório de Equipamentos Elétricos e Ópticos do IPT e então fotografados. Devido a alta fragilidade das amostras preparadas para os testes de K_{Ic} , as placas utilizadas nesse teste, têm dimensões maiores.



Figura 10 Foto frontal do polariscópio

A máquina fotográfica foi acoplada no suporte indicado acima que fica a cerca de 50 cm da amostra. Foi aplicado um zoom de 5x e dali disparadas as fotos.

Cada amostra foi fotografada trinta vezes, em estados distintos de compressão aplicada. As tensões variaram de 0 (amostra livre) até 14,0 kgf (137,3 N), sendo fotografado a cada incremento de 0,5 Kgf (4,9 N). A seqüência abaixo mostra como ocorre a evolução das franjas com o aumento da tensão aplicada. A seqüência evolui da esquerda para a direita e de cima para baixo.



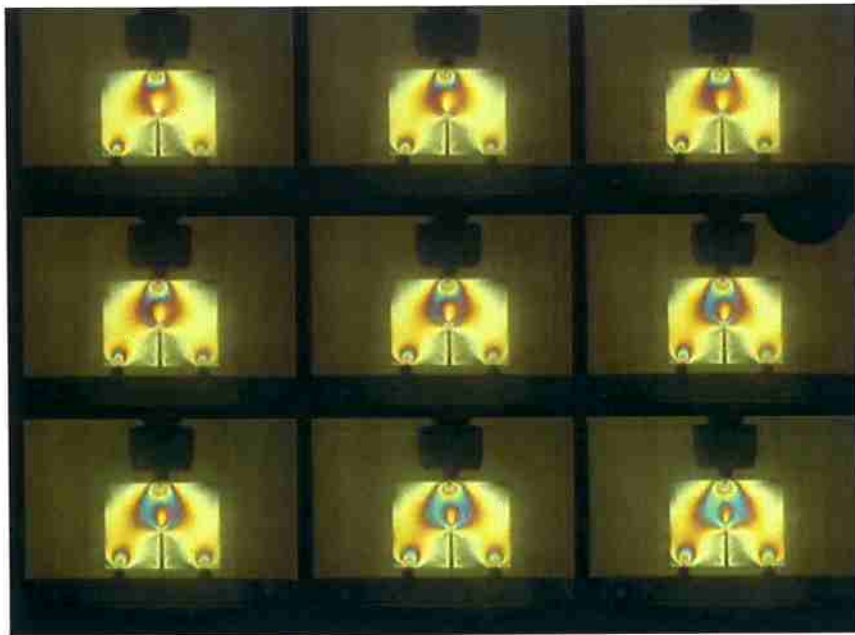


Figura 11 Evolução da concentração de tensão

Aqui é possível notar o surgimento e intensificação das franjas de tensão em quatro pontos, sendo que três deles (os dois pontos de apoio inferiores e o ponto superior de aplicação da força) são descartáveis para o intuito deste trabalho.

A formação das franjas que esta sendo estudada refere-se ao ponto central da amostra que é o local onde esta localizada a pré-trinca e como de esperado, atua como concentrador de tensos, amplificando a tensão aplicada. Essas franjas podem ser melhor visualizadas na próxima fotografia, que mostra o corpo de prova com inserção de trinca pela máquina eletromecânica. É possível notar, tanto ao longo da seqüência quanto no destaque a seguir, a região mais escura em volta da ponta da trinca que caracteriza a anisotropia óptica causada pelo surgimento das tensões.

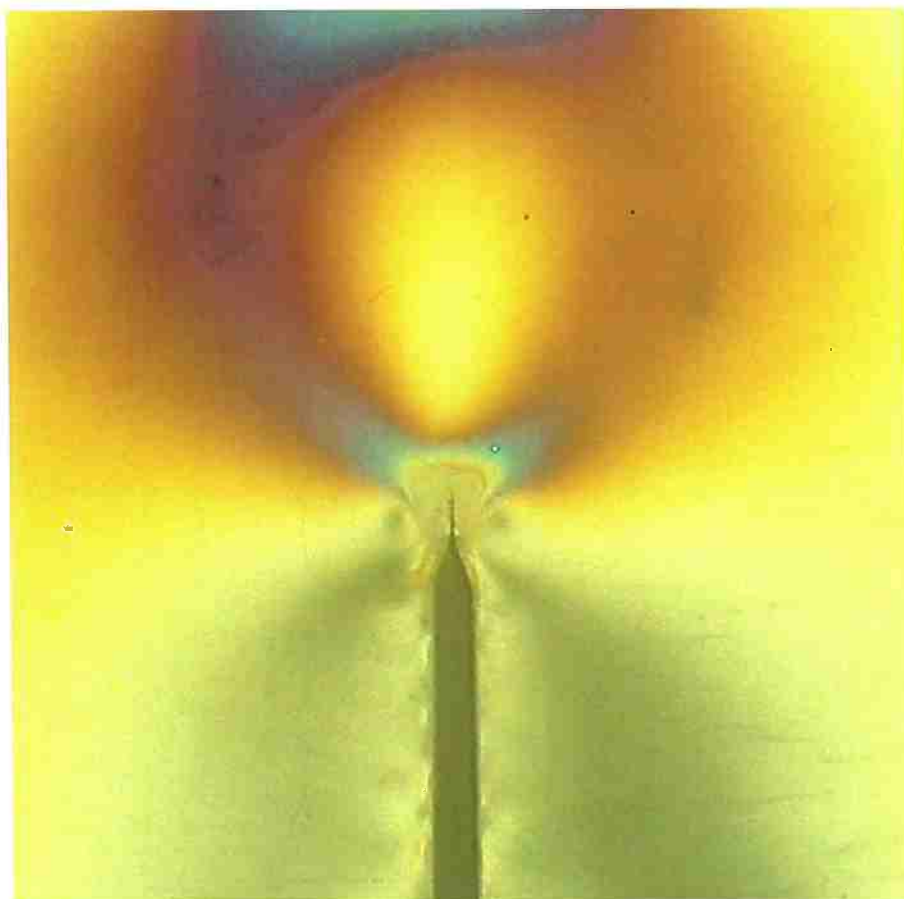


Figura 12 Destaque da formação das franjas na pré-trinca

A seguir foram comparadas as formações das franjas, com carregamentos iguais, das amostras com a pré-trinca inserida pelo método de batidas e inserida pela máquina eletromecânica.

As cargas de comparação foram: 5,00 kgf (49,03 N), 7,50 kgf (73,55 N), 10,00 kgf (98,07 N), 12,50 kgf (122,58 N) e 14,00 kgf (137,29 N).

Comparando as duas fotos a seguir é possível enxergar o início de formação das franjas na amostra “pré-trincada” pela máquina, enquanto na amostra em que a trinca foi introduzida por batidas não há formações de franjas visíveis.

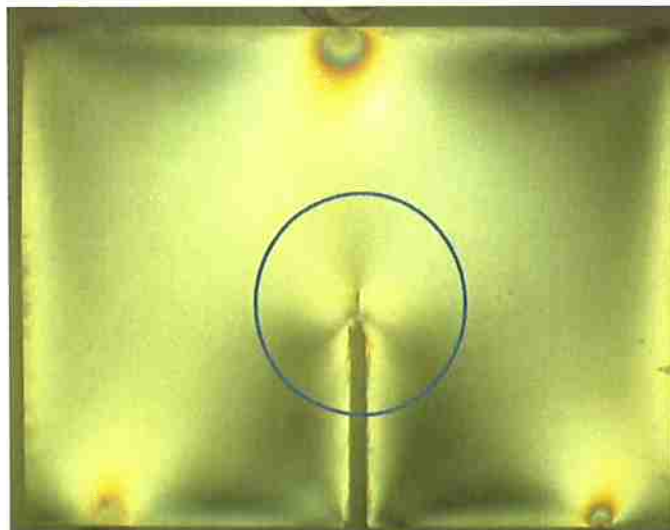


Figura 13 Método de batidas - 5 kgf

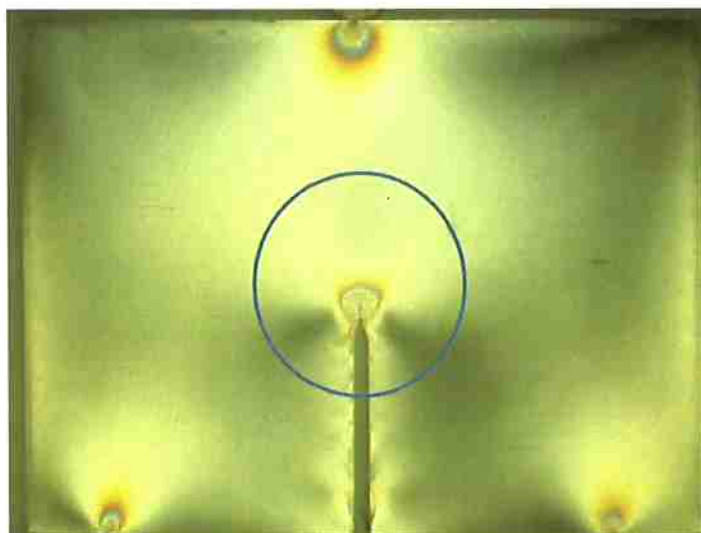


Figura 14 Método controlado pela máquina - 5 kgf

Quando a tensão foi passou para 7,5 kgf (próximas duas figuras), a amostra, cuja pré-trinca foi feita pela máquina de ensaios de compressão, mostrou o campo das franjas praticamente do mesmo diâmetro quando comparada com o carregamento de 5 kgf, porém percebe-se, o início de uma interferência do campo de tensões do apoio superior.

A amostra entalhada manualmente, também mostra o início do aparecimento das franjas, porém, pela morfologia dessas, os campos de tensões parecem ser menos “ordenados” do que a amostra utilizada pelo outro método.

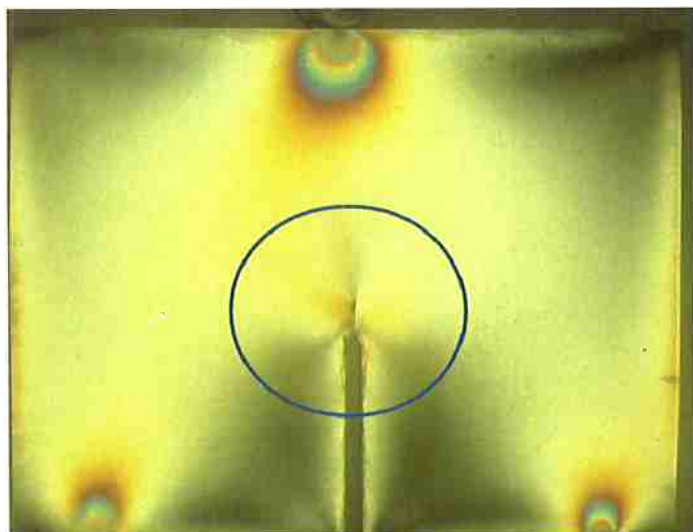


Figura 15 Método de batidas - 7,5 kgf

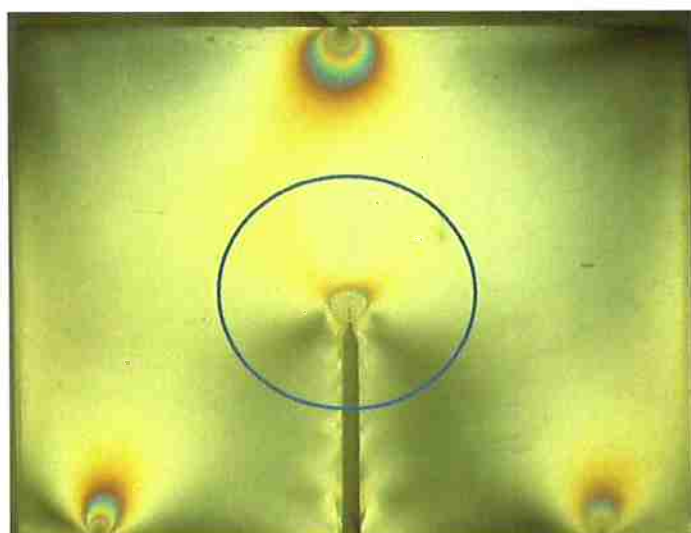


Figura 16 Método controlado por máquina - 7,5 kgf

As duas fotos seguintes mostram praticamente as mesmas formações das imagens anteriores, com a diferença do aumento das tensões, identificado pela intensidade dos feixes.

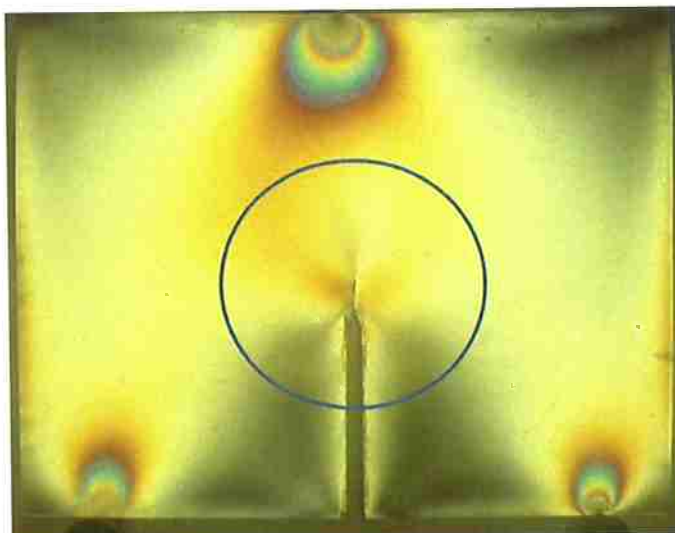


Figura 17 Método de batidas - 10 kgf

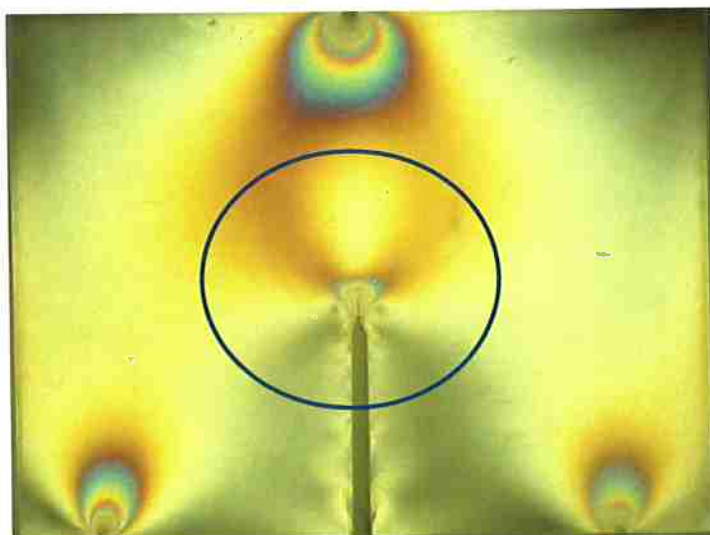


Figura 18 Método controlado por máquina - 10 kgf

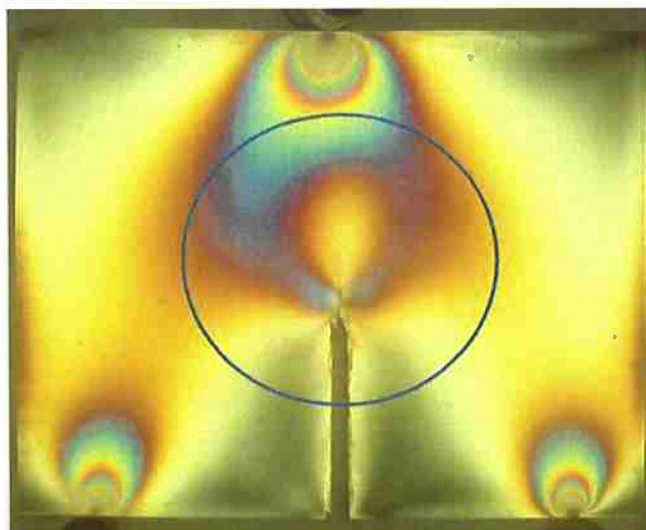


Figura 19 Método de batidas - 12,5 kgf

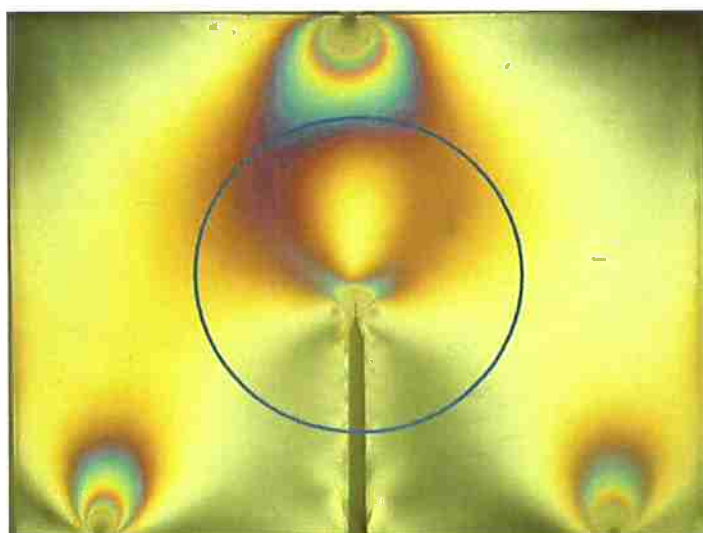


Figura 20 Método controlado por máquina - 12,5 kgf

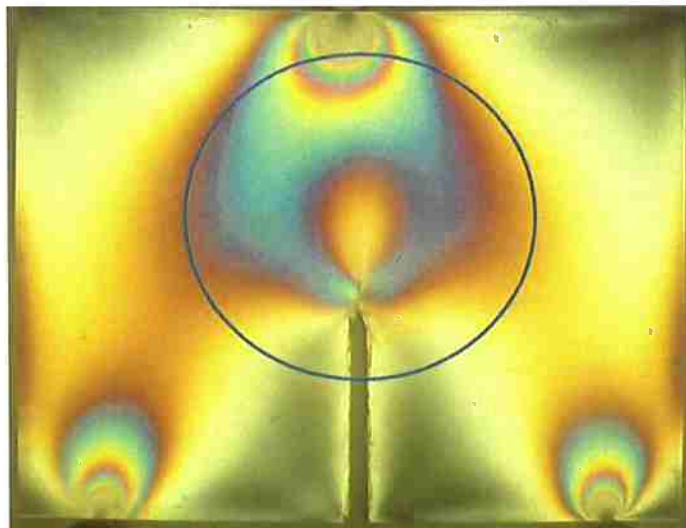


Figura 21 Método de batidas - 14 kgf

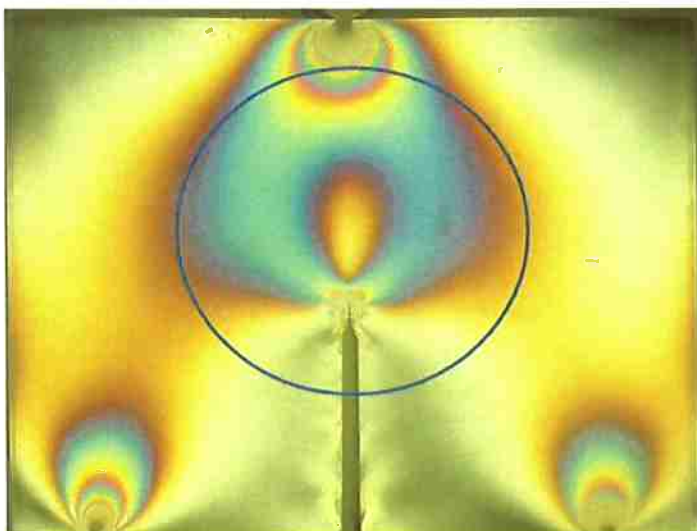


Figura 22 Método controlado por máquina - 14 kgf

As últimas fotos, que mostram as amostra comprimidas por tensões próximas das tensões máximas, como calculadas pelo teste de K_{Ic} , mostram cores mais intensas na placa submetida à máquina eletromecânica. Porém com distribuição de tensões mais concentradas próximas aos pontos de contato e da trinca, do que a amostra pré-trincada manualmente. O que pode ser um indício do dano que as batidas podem ter causado na matriz polimérica.

6 Conclusões

Os dois procedimentos adotados para a inserção da pré-trinca mostraram diferenças significativas nos testes do K_{Ic} , sendo a média do fator das amostras pré-trincadas pela máquina 1,78 MPa m^{1/2} enquanto os testes da amostra de batidas ficaram em média no valor de 1,18 MPa m^{1/2}.

As análises realizadas com as imagens provenientes do polariscópio, em geral, mostraram que a intensidade dos feixes de luzes (franjas) produzidos pelas amostras com pré-trinca inseridas eletromecanicamente, são maiores do que os das amostras submetidas às batidas quando submetidas a mesma compressão externa. Isso mostra que as tensões são maiores na amostra da pré-trinca “mecânica”, dado que, indiretamente, a intensidade do feixe e a tensão seguem a relação abaixo:

$$I = A^2 \sin^2 \frac{\pi \delta}{\lambda}$$

Sendo I a intensidade e δ é proporcional entre as diferenças de tensão.

As imagens obtidas pelos testes de fotoelasticidade, não forneceram claramente as ordens das franjas, o que pode ser verificado pelas fotos dos resultados do teste de fotoelasticidade, provavelmente devido à baixa resolução ou falta de aproximação do zoom da máquina fotográfica.

Outra observação dos testes de fotoelasticidade foi a de que as distribuição das tensões nas amostras pré-trincadas por batidas são mais difusas do que das amostras cujas pré-trincas foram introduzidas pela máquina. Isso, muito provavelmente, se deve ao fato de que as batidas causam danos maiores à matriz do polímero.

Portanto, apesar de não ser completamente conclusivo que a introdução da pré-trinca pelo método de batidas, certamente a introdução de trincas de maneira controlada parece ser a mais recomendada para o teste de tenacidade a fratura dos materiais tendo como contrapartida maior dificuldade de processamento.

Para os próximos trabalhos, fica a sugestão de analisar o efeito do método de introdução das pré-trincas por outros meios, como por exemplo, método de elementos finitos.

7 Referências

[1] CALLISTER, W.D.; Materials Science and Engineering: an introduction. 7th Edition.

[2] JESSOP, H.T.; HARRIS, F.C. Photoelasticity - Principles & Methods. New York. Dover Publications, Inc. 1949.

[3] FROCHT, M.M. Photoelasticity: the selected scientific papers of M. M. Frocht. London. Pergamon Press, 1969.

[4] QUINAN, M.A.D. Uma metodologia para a determinação do fator de intensidade de tensões causado por tensões térmicas utilizando fotoelasticidade. São Paulo, 2005.

[5] FERREIRA JUNIOR, A. F. G. Desenvolvimento de um sistema para análise automática do padrão de franjas fotoelásticas isocromáticas. São Paulo, 2003.

[6] SOUZA, J.M.; PERES, F.M.; SCHÖN, C.G. Methods for introducing pre-cracks in fracture mechanics testing of polymers