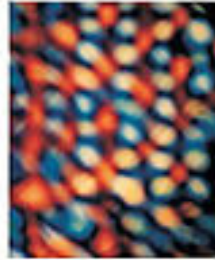


Basic Optical Stress Measurement in Glass



BASIC OPTICAL
STRESS MEASUREMENT
IN GLASS



H. W. McKellop & R. J. Hod

Tradução: Mauro Akerman

Introdução

Durante a manufatura de qualquer produto de vidro há o desenvolvimento de tensões, tanto temporárias como permanentes. Estas tensões surgem intencionalmente ou como consequência do processo de conformação e, para um controle de processo adequado, é necessário que seja possível de se quantificá-las. O método óptico experimental de análise de tensões conhecido como fotoelasticidade tem sido empregado há muitos anos. Este método tem sido utilizado muito eficazmente na avaliação de tensões de estruturas de complexidade variável quando submetidas a condições de cargas específicas. Como a técnica de fotoelasticidade requer materiais que sejam tanto transparentes como birrefringentes e, como muitos vidros exibem essas propriedades, este método pode ser aplicado para determinar as tensões em produtos de vidro.

Frequentemente a produção é uma rotina e não haveria razão para se assumir que a distribuição de tensões nos produtos assumiria outra forma além da esperada. Neste caso o emprego do método da fotoelasticidade a fim de garantir a qualidade é direto e não é exigida uma análise detalhada dos padrões de franjas observadas. Porém, se há problemas de produção conduzindo a distribuições indesejáveis de tensões, a fotoelasticidade pode ser empregada para fornecer informações detalhadas sobre as tensões produzidas. Isto porém requer uma análise mais extensiva e um conhecimento mais profundo da técnica disponível.

2 Teoria básica

2.1 A luz e o espectro visível

A luz é usualmente considerada como tendo um deslocamento na forma de ondas. Assim um único raio de luz pode ser descrito como mostrado na Figura 2.1(a). Tal onda é similar à onda em uma piscina onde se produziu uma perturbação à água, Figura 2.1(b). Com a luz, o comprimento de onda λ , (veja Figura 2.1(a)) corresponde a uma cor de luz particular.

O produto do comprimento de onda pela frequência é igual à velocidade da luz que é constante e igual a 3×10^8 metros por segundo. Portanto a cor da luz pode ser também descrita pela sua frequência que é proporcional ao inverso do comprimento de onda. Desta maneira um raio de luz azul pode ser definido como tendo um comprimento de onda de 480 nm ou a frequência de 625 THz (625×10^{12} Hz) e um raio de luz vermelha pode ser descrito como tendo um comprimento de onda de 700 nm ou a frequência de 430 THz. O espectro visível da luz é mostrado na Figura 2.2.. Luz de um comprimento de onda particular (ou frequência), e portanto cor, é conhecido como luz monocromática enquanto que a luz que consiste de todos

comprimentos de onda é conhecido como luz branca. Tanto luz monocromática como branca podem ser usadas para análise fotoelástica.



(a) Forma de uma onda de um raio único de luz



(b) Ondas de água em uma piscina

Figura 2.1. Formas de ondas de luz e água

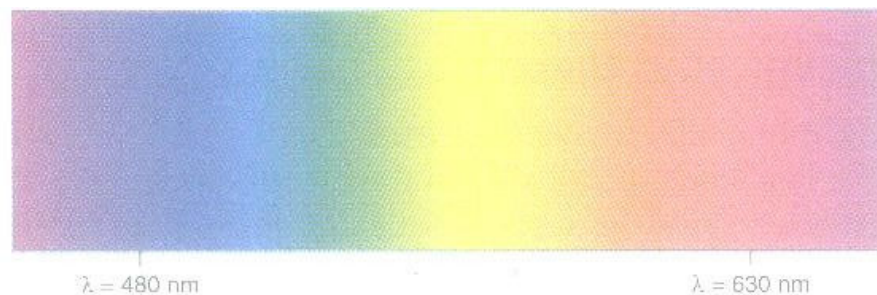
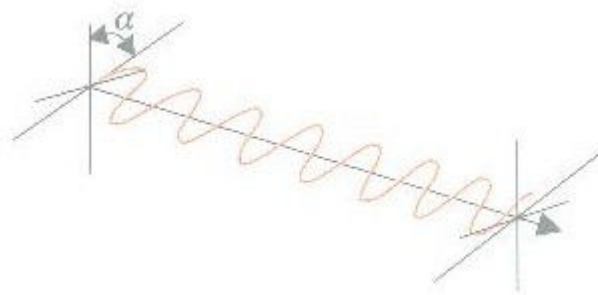
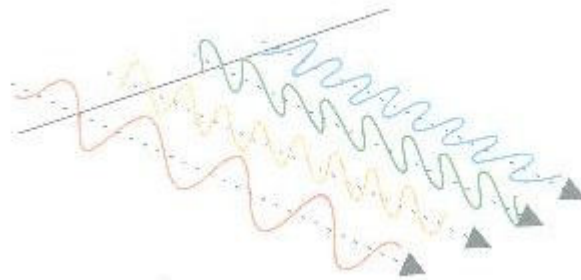


Figura 2.2. Espectro visível

A amplitude (Figura 2.1(a)) da onda de luz também pode variar e isso é percebido como mudanças na intensidade ou brilho da luz (a intensidade da onda é proporcional ao quadrado da amplitude). Com ondas de água, a oscilação é simplesmente perpendicular (a 90°) à superfície da água. Entretanto, a direção da oscilação de uma onda de luz pode estar orientada em qualquer ângulo relativamente ao plano vertical (Figura 2.3(a)). Desta maneira, para descrever uma simples onda de luz, sua orientação deve ser conhecida assim como sua cor (comprimento de onda ou frequência) e intensidade. Luz branca normal, como a que é emitida pelo sol ou uma lâmpada elétrica comum, é composta de muitas ondas que variam, não somente em frequência e amplitude, mas também em orientação (Figura 2.3(b)).



(a) Orientação da luz em relação ao plano vertical



(b) Variação em amplitude, comprimento de onda e orientação luz branca

Figura 2.3. Comportamento da luz branca

2.2 Luz Polarizada

2.2.1 Polarização plana

Todas as técnicas fotoelásticas se baseiam no fato que a luz pode ser polarizada, o que significa selecionar uma orientação particular da luz excluindo todas as outras. Selecionando luz de uma orientação particular resulta no chamado “polarização plana”. Em luz polarizada plana, entretanto, todas as ondas de luz tem a mesma orientação, embora as frequências e amplitudes ainda possam variar.

Polarização plana pode ser produzida fazendo passar a luz através de um elemento polarizante que pode ser considerado uma grelha que, só permite a passagem de luz que é paralela à fenda (Figura 2.4). Esta direção é conhecida como *direção de polarização* e seu eixo, *eixo polarizante*.

A polarização da luz pode ser obtida por diferentes técnicas: absorção seletiva, reflexão, espalhamento ou birefringência. Absorção seletiva é provavelmente a mais empregada com placas de material polaroide. Existem várias placas polaroides, mas a placa-H é a mais amplamente aplicada. Uma placa-H é uma placa de álcool polivinil (PVA) que foi esticada em uma direção e mergulhada em seguida em uma solução de tinta rica em iodo. Diferentes graus de placa-H são comercialmente disponíveis. Cada uma delas exibe diferentes graus de absorção da luz, mas, para aplicações fotoelásticas a HN32 é a mais apropriada. Um feixe de luz não polarizada

pode ser polarizada em qualquer direção com o uso de uma placa polarizada e a direção de polarização é determinada pelo eixo de polarização da placa. Luz que passou através de um elemento de plano de polarização, não passará através de um segundo plano que tenha um eixo perpendicular ao primeiro (Figura 2.5).

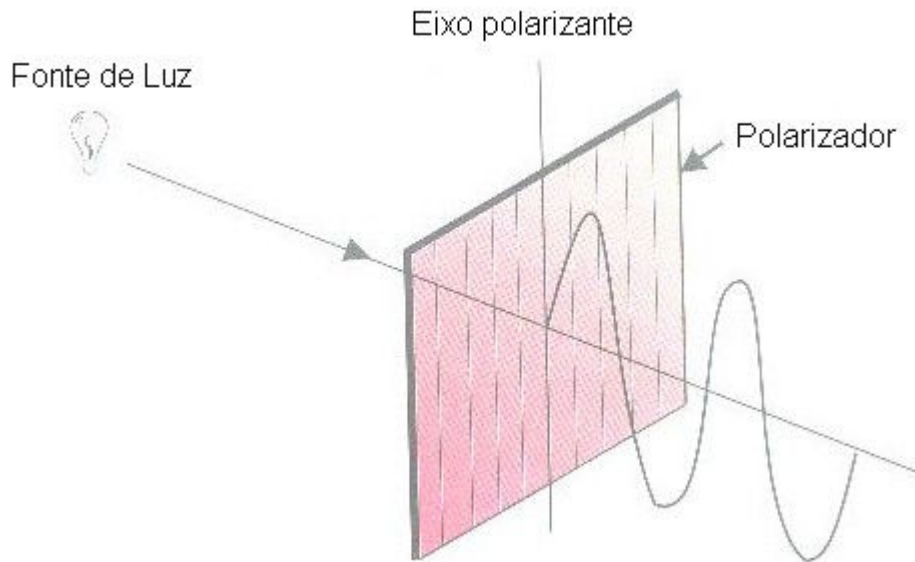


Figura 2.4. Formação de luz polarizada plana

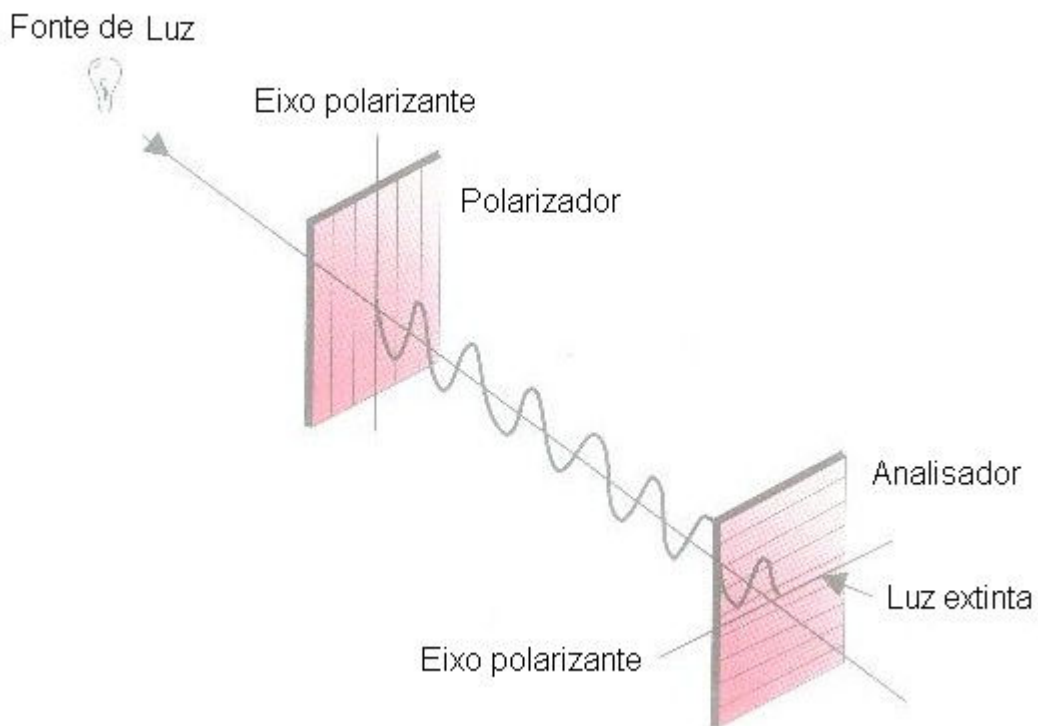


Figura 2.5. Efeito de um segundo elemento polarizante com eixo de polarização em ângulo reto com relação ao primeiro

Se o segundo polarizador é colocado com o eixo de polarização em um ângulo diferente que 90° em relação ao primeiro, então alguma luz passará através deste segundo elemento. A transmissão máxima ocorre quando o segundo polarizador está paralelo com o primeiro (figura 2.6).

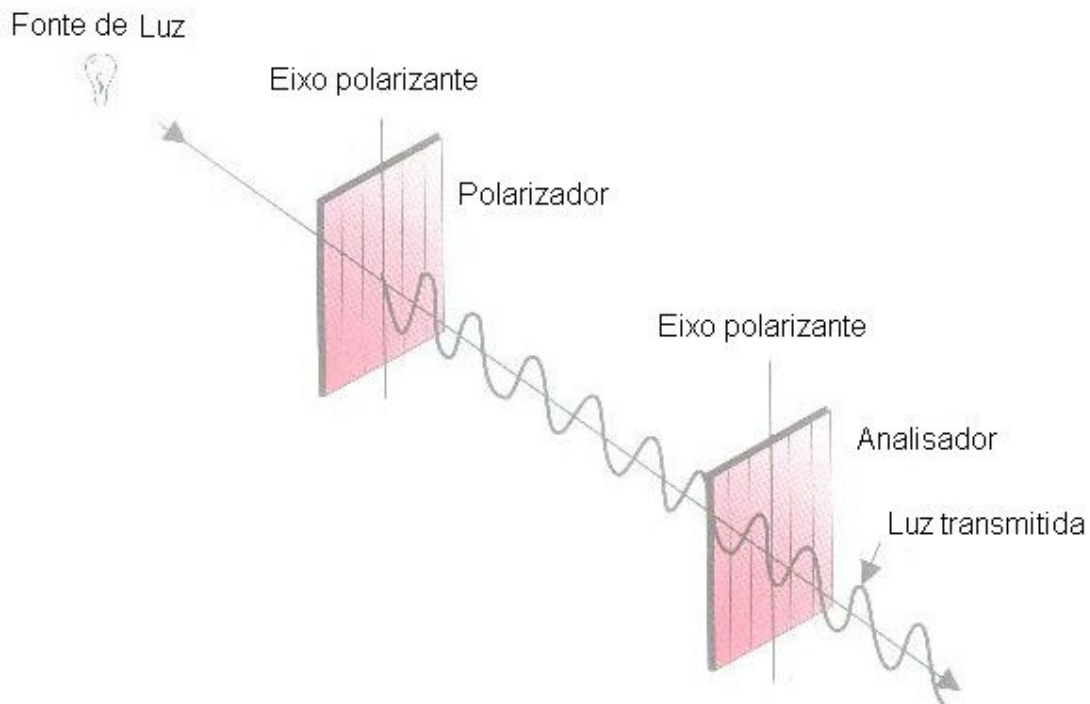


Figura 2.6. Efeito de um segundo elemento polarizante com eixo de polarização paralelo ao primeiro

O segundo elemento polarizador é chamado de *analisador*, pois pode ser utilizado para determinar a direção de polarização da luz vinda do primeiro elemento. O analisador é rotacionado em relação ao polarizador e quando não há mais luz passando, isto é, a luz foi extinta, então o eixo de polarização do analisador é perpendicular ao polarizador. Neste estado, se diz que, o polarizador e o analisador estão cruzados. Embora, em teoria, a orientação na qual a máxima intensidade é obtida pode ser usada para determinar a direção de polarização, é usualmente mais fácil na prática determinar-se a orientação na qual se dá a extinção. A razão para isto é que quando o ângulo entre o polarizador e o analisador não é exatamente 90° alguma luz é transmitida e, a mudança do zero para alguma transmissão, é mais facilmente detectada do que a mudança de intensidade observada quando o polarizador e o analisador movem-se um pouco fora do paralelismo.

2.2.2 Determinação do eixo de polarização de um polarizador

Em adição ao uso de elementos polarizantes cruzados para determinação do eixo de polarização de um plano polarizante desconhecido, também é possível se empregar luz refletida. Brewster descobriu que, se uma luz incide em um ângulo particular em uma superfície de um material dielétrico,

então o feixe refletido é polarizado em uma direção normal ao plano de incidência (Figura 2.7). Este ângulo é conhecido como ângulo de polarização e é dado por:

$$\tan \theta = \frac{n_t}{n_i} \quad (2.1)$$

Onde n_t e n_i são respectivamente os índices de refração do material dielétrico e do ambiente em seu entorno.

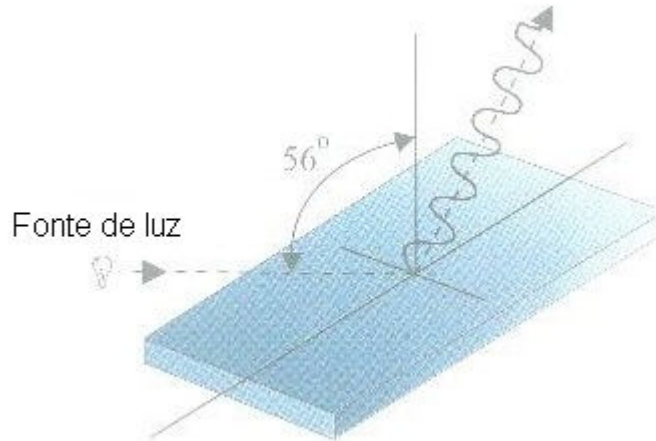


Figura 2.7. Polarização por reflexão

Se o feixe incidente esta no ar, $n_i=1$, e o material dielétrico é um vidro cujo $n_i= 1,5$, então o ângulo de polarização θ é 56° . O eixo desconhecido de polarização de um polarizador pode ser identificado pela rotação do elemento em seu plano, observando-se a extinção da luz refletida de uma superfície espelhada, como mostrado na Figura 2.8. Para o caso mostrado nesta figura, pode se ver que, quando a extinção em reflexão ocorre, o eixo de polarização desconhecido está na direção vertical.

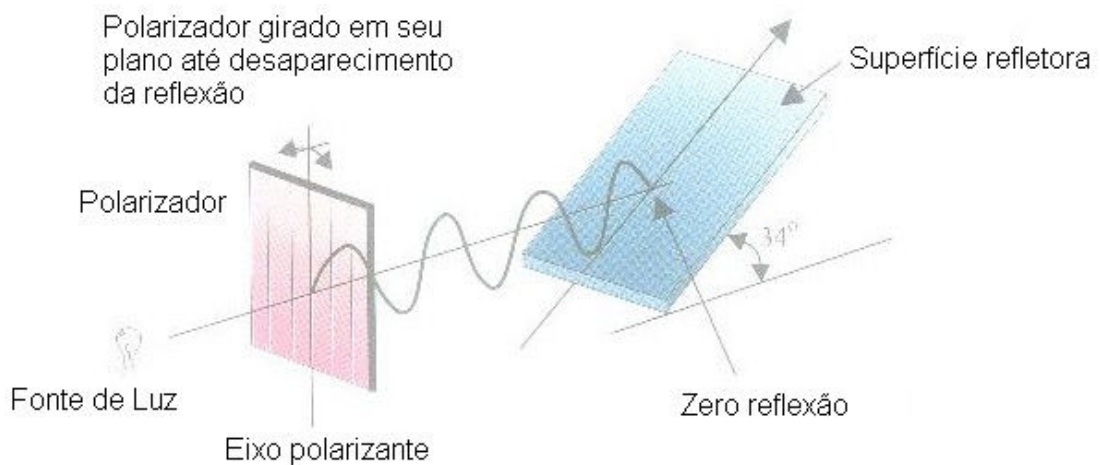


Figura 2.8. Determinação do eixo de polarização por reflexão

2.2.3 Polarização circular

Polarização circular pode ser produzida passando luz comum primeiramente através de um plano polarizador e, então, através de um elemento birrefringente, conhecido como placa de quarto de onda, que tem seu eixo principal a $\pm 45^\circ$ em relação ao eixo de polarização do polarizador. Este último elemento gera um retardo de um quarto de comprimento de onda da luz quando ela passa através dele na maneira descrita detalhadamente na Seção 2.3. Luz polarizada circular pode ser considerada como uma luz na qual o vetor resultante da luz, depois de passar através da placa de quarto de onda, gira 360° a cada vez que a onda de luz avança de um comprimento de onda. (Figura 2.9). **XXXXXX**

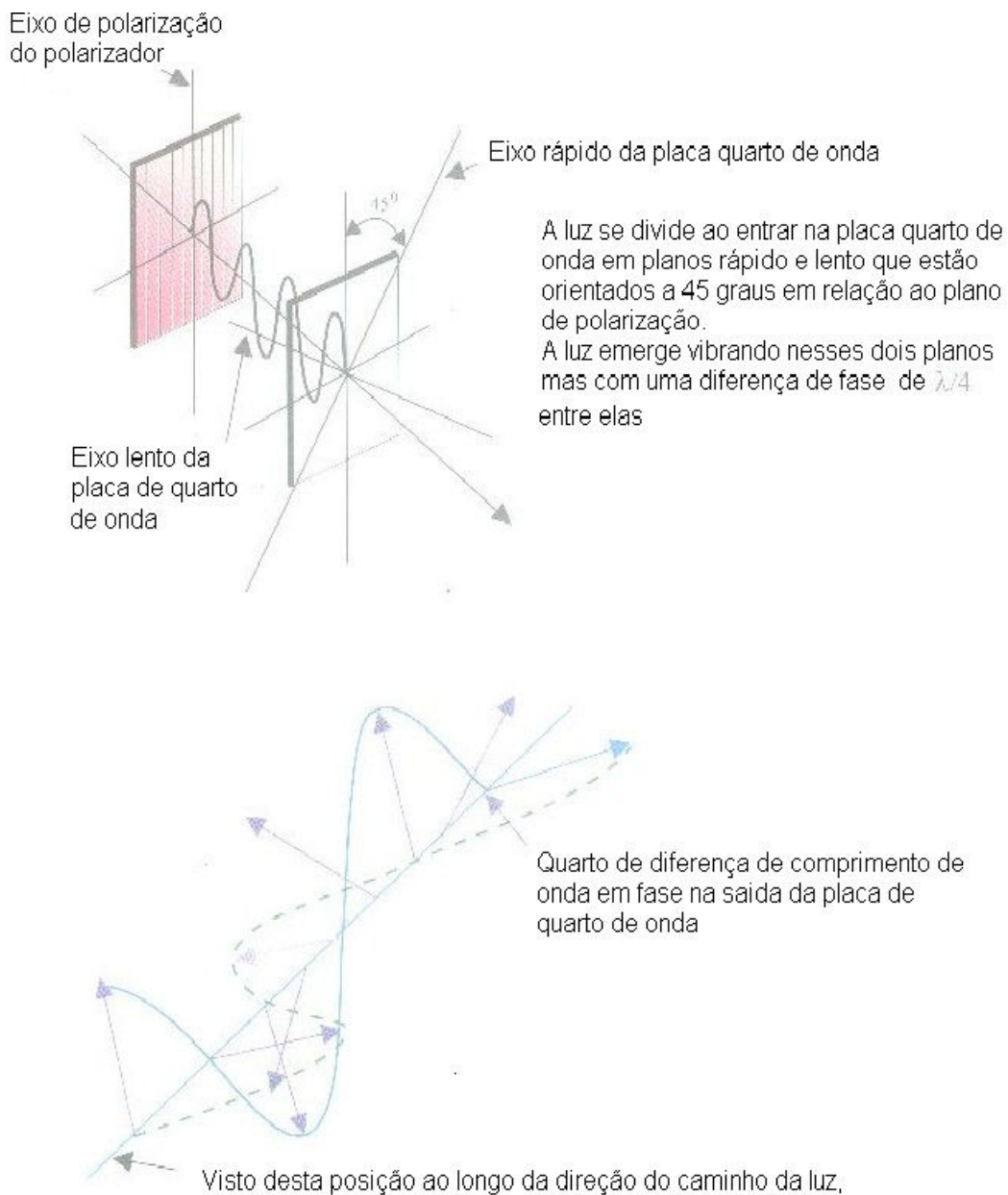


Figura 2.9. A formação de luz polarizada circular

Alternativamente pode ser considerado que para luz polarizada circularmente a ponta do vetor da luz resultante descreve um caminho circular quando vista através da placa de quarto de onda em direção ao polarizador e a fonte de luz. A direção de revolução do vetor pode ser horária (polarização circular direita) ou anti-horária (polarização circular esquerda) quando vista de frente para a onda. O uso de placa de quarto de onda na geração de polarização circular significa que um polarizador circular não será acurado suficientemente para um dado comprimento de onda enquanto que polarizadores planos produzem polarização plana para todos comprimentos de onda.

2.3 Birrefringência ou dupla refração

Muitas estruturas de cristais são anisotrópicas e portanto seu índice de refração pode variar com a direção. Nestes materiais a luz atravessa com velocidades diferentes dependendo do eixo de polarização da luz uma vez que a velocidade da luz em um material é dada por:

$$c = \frac{c_0}{n} \quad (2.2)$$

Onde c_0 é a velocidade da luz no vácuo e n o índice de refração do material em um dado plano. Uma luz entrando em um material birrefringente será dividida em dois componentes de planos polarizados que são perpendiculares entre si. Em geral estes dois planos viajarão através do material em velocidades diferentes e um estará em retardo relativamente ao outro conforme passam através do material. O retardo resulta em uma diferença de fase entre as duas ondas na saída do cristal anisotrópico. Este é o fenômeno da *birrefringência ou refração dupla*. Materiais opticamente anisotrópicos são conhecidos como birrefringentes. Materiais com birrefringência cristalina possuem uma (ou possivelmente duas direções dependendo da estrutura do cristal) na qual a dupla refração não é observada. Esta direção é chamada de eixo óptico e é o principal eixo de simetria do cristal.

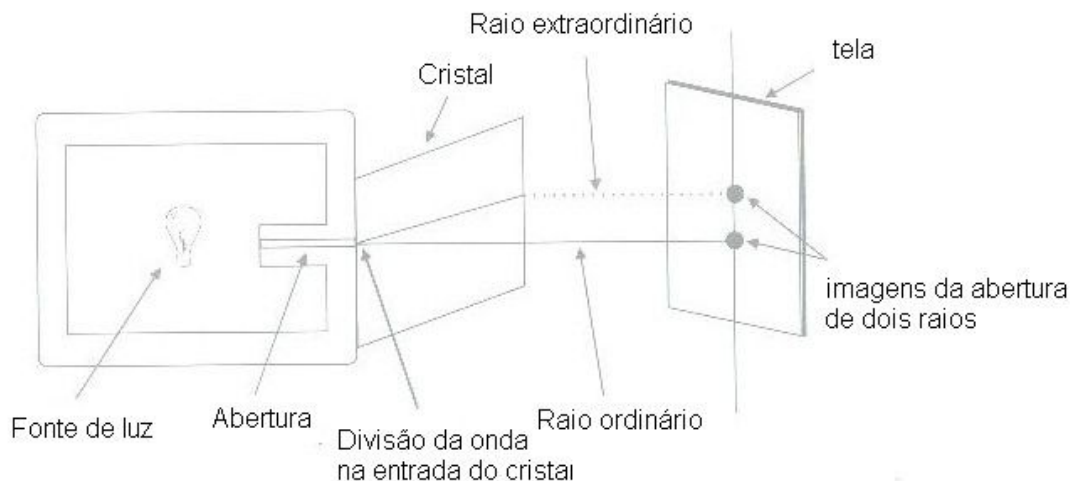


Figura 2.10. Imagem dupla formada com um cristal birrefringente em uma orientação adequada.

Tais materiais opticamente anisotrópicos podem ser descritos como materiais birrefringentes. Se um objeto é observado através de um cristal de um material birrefringente cortado e orientado adequadamente, então uma imagem dupla do objeto será observada.

Neste caso por causa da orientação da onda de luz em relação ao eixo óptico, ela é dividida em duas ondas que, não somente caminham com velocidades diferentes, como também divergem uma da outra. A divergência das ondas origina a imagem dupla. Se somente um componente de luz plana polarizada for utilizada, então somente uma imagem será observada mas a sua posição dependerá da direção de polarização da onda. A orientação de uma onda é normal ao eixo óptico do cristal. Esta é conhecida como a onda ordinária enquanto que a orientação das outras ondas é perpendicular à primeira e é conhecida como onda extraordinária. Os índices de refração correspondentes são n_o e n_e .

Nos assim chamados materiais negativos ($n_e < n_o$) a onda extraordinária tem uma velocidade superior que a da ordinária e nos materiais positivos ($n_e > n_o$) a onda extraordinária tem uma velocidade menor que a onda ordinária. Calcita é um material negativo enquanto que quartzo e gelo são materiais positivos. Elementos ópticos incluindo placas de quarto, meia e inteiro comprimento de onda e artifícios ópticos como compensadores (veja sessão 3.2), que podem ser feitos de materiais birrefringentes como mica e quartzo podem ser marcadas tanto em termos de direção lenta e rápida como em termos de direção ordinária e extraordinária.

2.4 Birrefringência por tensão

Um material isotrópico como o vidro, no estado livre de tensões não exhibe anisotropia óptica nem birrefringência. Porém há o desenvolvimento de birrefringência quando o vidro é submetido a tensões. O nível de birrefringência está relacionado com a tensão presente e, como as tensões

raramente são distribuídas uniformemente pelo material, o grau de birrefringência vai variar de região para região. Isto é conhecido como birrefringência de tensão ou dupla refração artificial e a fotoelasticidade é um meio de medir e interpretar estes efeitos nos produtos de vidro. A aplicação da fotoelasticidade para a medição de tensões no vidro é o conceito primário deste trabalho.

Um feixe de luz polarizada entrando em um vidro tencionado será dividido em dois feixes com direções perpendiculares de polarização. As direções de polarização correspondem à direção da principal tensão na entrada do vidro. Os componentes vão se deslocar através do vidro em velocidades diferentes, desenvolvendo então uma diferença de fase entre eles como mostrado na Figura 2.11. A diferença de fase é vista como uma mudança na polarização da luz quando os feixes são recombinados (ver sessão 2.4.2).

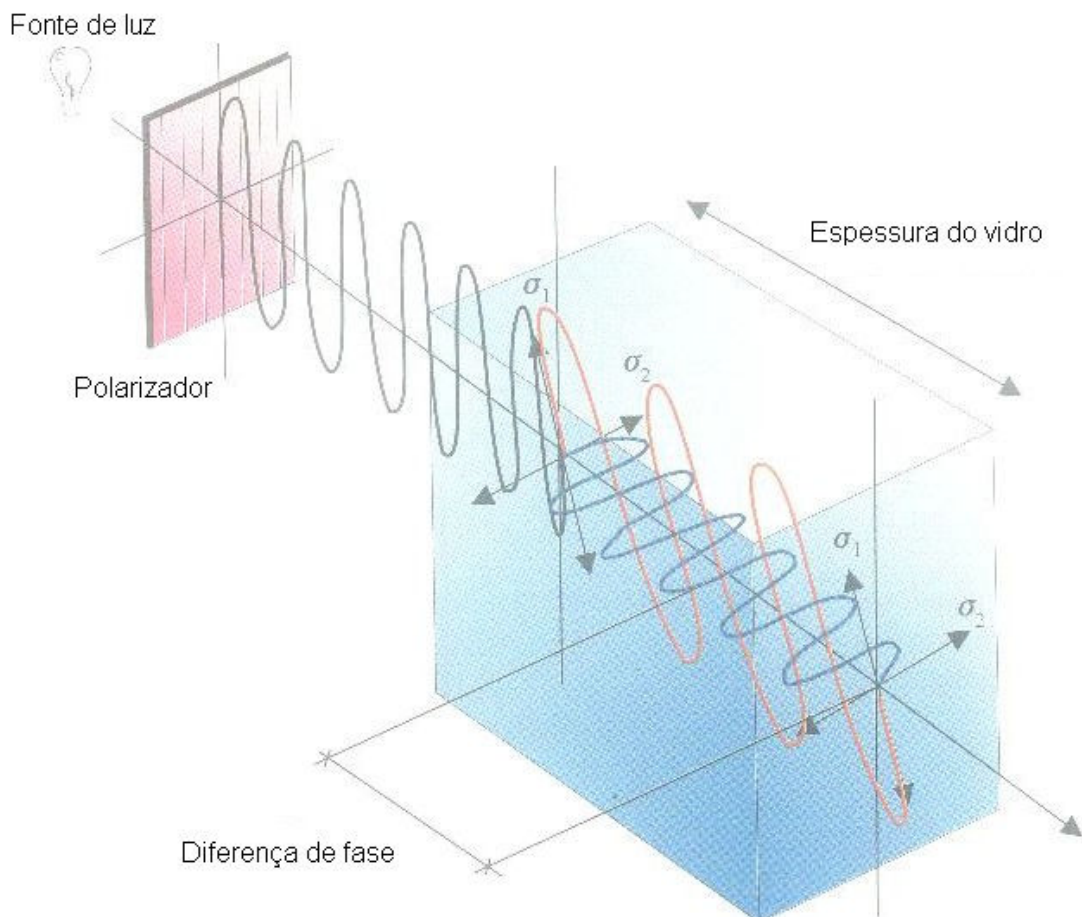


Figura 2.11. Desenvolvimento de diferença de fase em vidro tencionado

Para uma luz monocromática passando através de um polarizador, em seguida passando por um material birrefringente por tensão como o vidro, e em seguida por um analisador que se encontra cruzado com o polarizador, pode ser mostrado que há duas condições diferentes de extinção. Esta condição corresponde a duas formas diferentes de franjas, conhecidas como *isoclínicas* e *isocromáticas*. As isoclínicas são independentes da magnitude das tensões aplicadas enquanto que as franjas isocromáticas dependem da

magnitude da tensão de cisalhamento principal. Com luz polarizada plana ambos os tipos de franjas são observadas enquanto que com luz polarizada circular somente as franjas isocromáticas pode ser vistas. Uma análise fotoelástica completa utiliza ambos os tipos de franjas para determinar a distribuição de tensão na amostra.

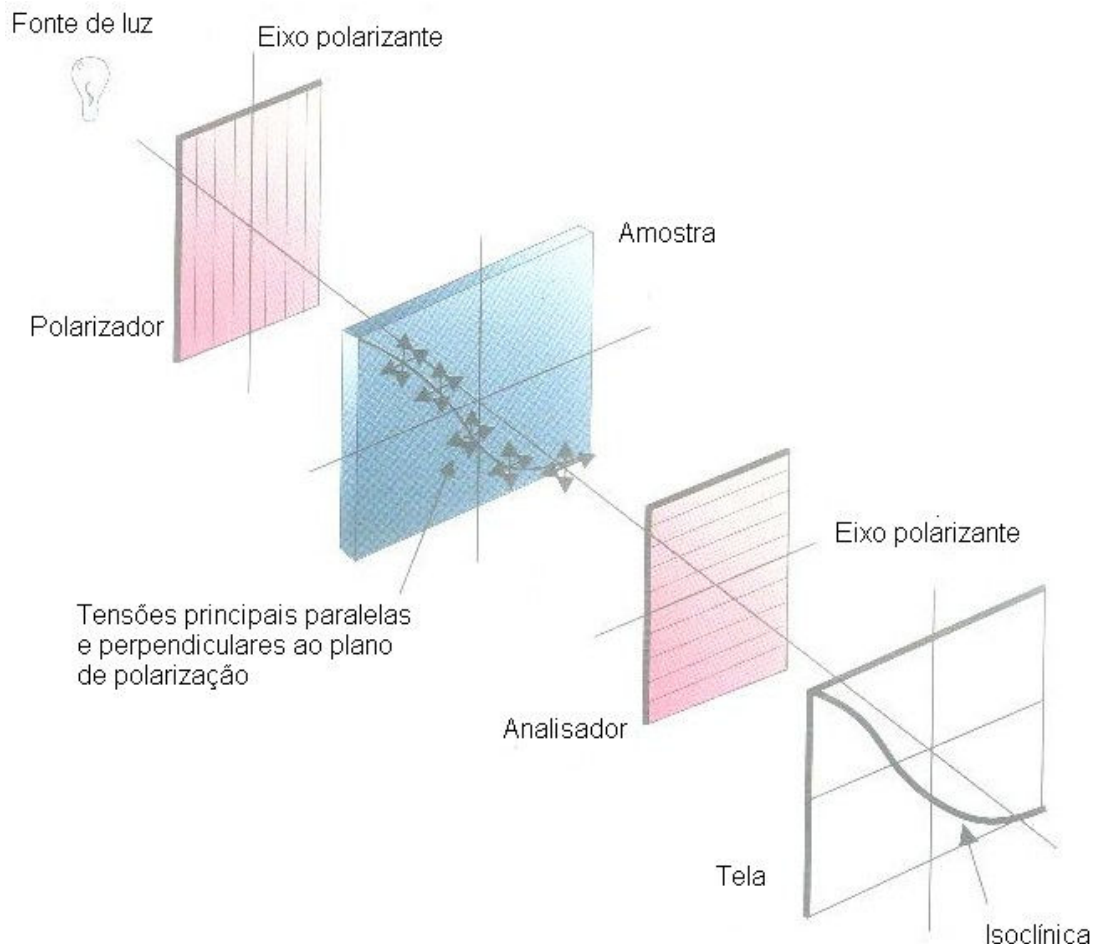
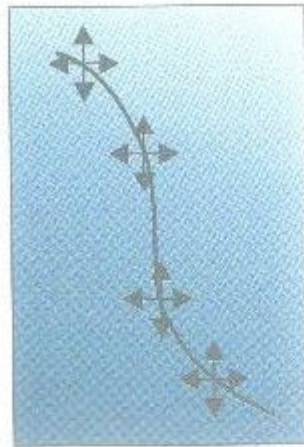


Figura 2.12. Arranjo de um polariscópio plano ilustrando a formação das isoclínicas

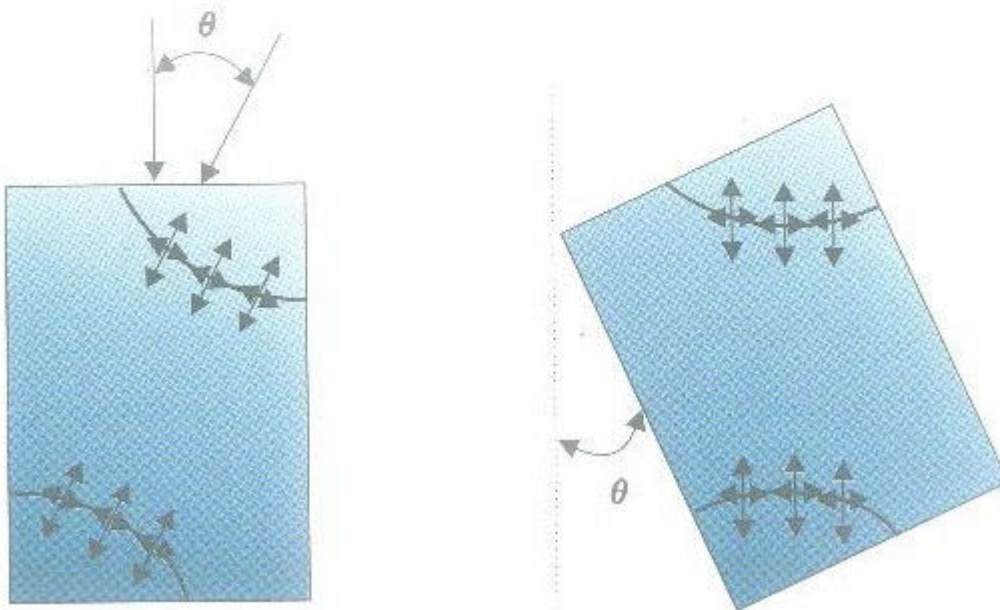
Isoclínicas podem ser descritas como o conjunto de pontos na amostra que tem a mesma direção de tensão principal. Elas são formadas porque a luz polarizada, vibrando em um determinado plano, passa direto através da amostra tensionada em locais onde uma das principais tensões principais é paralela ao plano de polarização. A luz então emerge da amostra com a sua direção original de polarização inalterada e é extinta passando através o analisador que está cruzado em relação ao polarizador inicial, portanto dando uma franja negra, como mostrado na Figura 2,12. Estas franjas são observadas somente utilizando um polarizador e analisador cruzados e este arranjo mostrado na Figura 2.12, é conhecido como um *polariscópio plano* (ver sessão 3.1)

O caminho traçado pelas isoclínicas não representa a direção da tensão principal em um material, isto é, não é uma trajetória de tensão. Ao contrário,

é o caminho traçado por todos os pontos que tem a mesma direção de tensão principal (Figura 2.13).



Isoclínica de 0 ou 90 graus em relação aos eixos do polarizador e do analisador



A isoclínica θ^0 é obtida pela rotação do polarizador e analisador juntos por um ângulo de θ^0 ou pela rotação do vidro no mesmo ângulo com polarizador e analisador estacionário.

Figura 2.13. Formação das isoclínicas

Isoclínicas são observadas só com luz polarizada plana e o padrão observado varia de acordo com a orientação do eixo de polarização como mostrado na Figura 2.14.



(a) Isoclinicas 0/90 graus



(b) Isoclinicas 20 graus

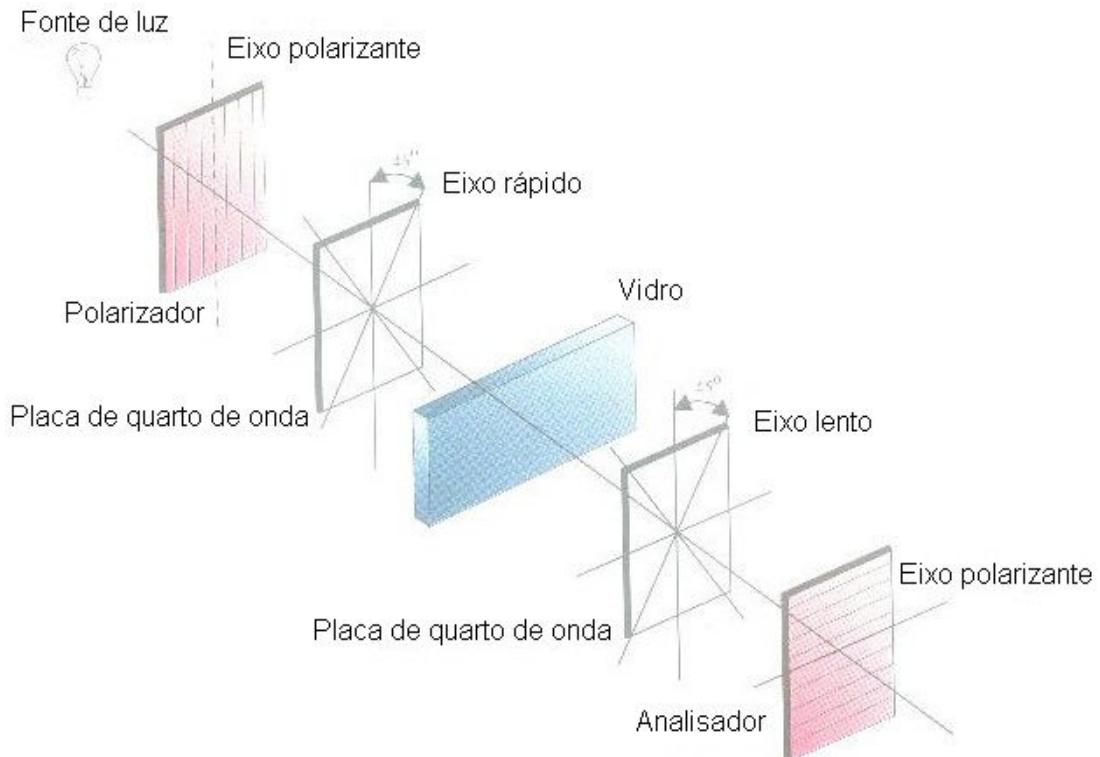


(c) Isoclinicas 45 graus

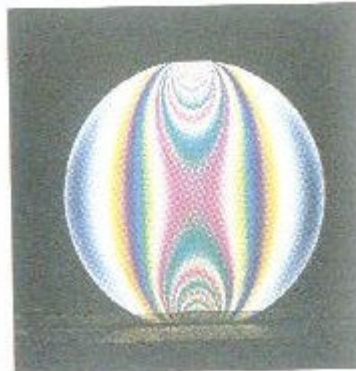
Figura 2.14. Ilustração de isoclínicas em um disco submetido a compressão diametral. (As isoclínicas são as franjas negras; as bandas coloridas são as franjas isocromáticas (ver sessão 2.4.2))

Independente da luz empregada, branca ou monocromática, este tipo de franja sempre é preta. Com luz branca as franjas isoclínicas ficam facilmente identificáveis: com luz monocromática a identificação fica prejudicada e as isocromáticas também se apresentam negras. Porém se a amostra de vidro tencionada é girada em seu plano entre o polarizador e o analisador cruzados então as isoclínicas se moverão enquanto as isocromáticas não; isto vale tanto para luz branca como para monocromática.

Em algumas circunstâncias pode ser necessário remover as isoclínicas para se evitar mascarar as franjas isocromáticas. Isto pode ser feito com a utilização de luz polarizada circular. O arranjo dos elementos ópticos neste é mostrado na Figura 2.15(a). Este arranjo é conhecido como um polariscópio circular (ver também sessão 3.1). O padrão de franja resultante para o caso mostrado na Figura 2.14 é apresentado na Figura 2.15(b).



(a) Arranjo de um polariscópio circular



(b) Ilustração de isocromáticas (com isoclínicas removidas) em um disco submetido a compressão diametral

Figura 2.15. Arranjo óptico de um polariscópio circular e uma ilustração de padrão de franja isocromática resultante

2.4.2 Isocromáticas

A propriedade de birrefringência de um vidro tensionado significa que quando uma luz polarizada incide sobre uma superfície de vidro a luz é dividida em dois componentes perpendiculares cuja direção corresponde à principal tensão na entrada. Estes componentes se deslocam com diferentes velocidades através da espessura do vidro e emergem vibrando nestes planos com uma diferença de faz, como mostrado na Figura 2.11. A subsequente passagem da luz através do analisador faz com que os raios

fora de fase sejam recombinados em um plano, Figura 2.16, e desta maneira produza padrões de interferência.

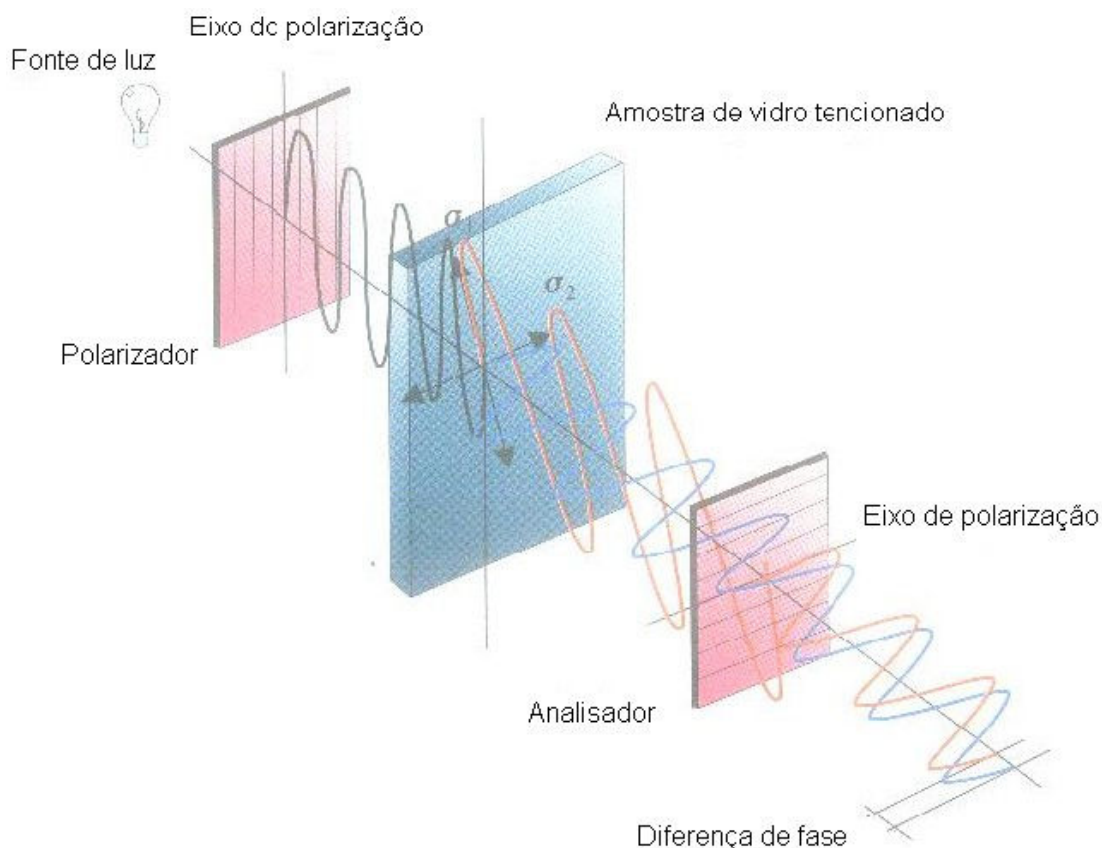


Figura 2.16 Diferença de fase nas duas ondas reagrupadas no plano correspondente ao eixo polarizante do analisador

Como discutido na sessão 2.1, luz comum é constituída de muitos comprimentos de onda e se for usada como fonte de luz no arranjo mostrado na Figura 2.16, então os padrões de interferência observados tomarão a forma de franjas multicoloridas. Se, alternativamente, uma lâmpada de sódio ou uma luz branca com um filtro for empregada a fim de prover uma fonte monocromática de iluminação então, as franjas serão negras com um fundo monocromático.

As franjas de interferência que são produzidas desta forma são conhecidas como isocromáticas e as franjas podem ser consideradas como a região de todos os pontos tendo a mesma diferença nas tensões principais. De acordo com a lei tensão/óptica as isocromáticas fornecem informações relativas às tensões que estão presentes no vidro, como mostrado abaixo. Para uma amostra plana, isto é, uma na qual as tensões variam sobre a área, mas não através da espessura, a relação tensão / óptica, é:

$$(\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{N\lambda}{Ct} \quad (2.3)$$

Onde $(\sigma_1 - \sigma_2)$ é a diferença entre as tensões principais no plano por onde a luz incide no vidro (N.B. tensões paralelas à linha de visão não influenciam o retardo); N é a ordem da franja isocrônica; λ é o comprimento de onda; C é coeficiente de tensão óptica; t é a espessura da amostra.

Na indústria do vidro, C é geralmente medido em Brewsters (1 Brewster = $10^{-6}\text{mm}^2/\text{N}$). Portanto, se λ é em nm, t em mm a diferença de tensão é em N/mm^2 . O coeficiente de tensão óptica é uma constante para uma determinada composição de vidro mas pode variar bastante para diferentes composições de vidro, como mostrado na Tabela 2.1

Tabela 2.1. Valores de coeficiente de tensão óptica para diversos tipos de vidros

Tipo de vidro	C ($\pm 0,02$ Brewster) com $\lambda = 514,5\text{mm}$
Flint duplo extra denso (DEDF845236)	0
Vidro ao chumbu (RWB46)	0,84
Crown ao bário (SBC697562)	1,73
Placa branca	2,71
Float	2,72
Borossilicato (BSC517642)	2,93
Crwn ao zinco (ZC508612)	3,84

A cor das franjas isocromáticas depende de quais comprimentos de onda são extintos durante a interferência e, em retardo relativo superior (franja de ordem superior), mais do que uma cor pode ser extinta simultaneamente. As cores que poderão ser vistas em um polariscópio de campo negro (polarizador e analisador cruzados) são dadas na Tabela 2.2.

Em ordens de retardo superiores fica difícil de se distinguir as franjas produzidas em um polariscópio a luz branca pois elas ficam cada vez mais e mais debotadas. Normalmente isto não é um problema com vidros pois eles tem baixo coeficientes de tensão ópticos e desta maneira franjas de altas ordens não são observadas. Se, entretanto, há a necessidade de se medir com precisão franjas de ordens superiores, deve-se empregar luz monocromática.

Quando isocromáticas são observadas utilizando-se luz monocromática há dois arranjos distintos de polariscópio: *campo negro* (polarizador e analisador cruzados), e *campo claro* (polarizador e analisador paralelos). Em polariscópio de campo escuro as franjas são franjas de ordem cheia, isto é, cada franja corresponde a uma diferença nas tensões principais que dão origem a um retardo relativo igual a um número inteiro de comprimentos de onda. Em um polariscópio de campo claro elas são franjas de meia ordem, (isto é: 0,5; 1,5; 2,5).

Tabela 2.2. Cores extintas e cores observadas para retardos relativos diferentes em um polariscópio campo-negro

Retardo relativo aproximativo/nm	Cor extinta	Ordem aproximada de extinção	Cor observada
400	Violeta	Primeira ordem(N=1)	Amarelo
450	Azul		Laranja
500	Verde		Vermelho
590	Amarelo		Púrpura
650	Laranja		Azul
700	Vermelho		Verde
800	Vermelho escuro(n=1)		Amarelo
	Violeta (n=2)		
900	Azul	Segunda ordem(N=2)	Laranja
1000	Verde		Vermelho
1180	Amarelo (n=2)		Púrpura
	Violeta (n=3)		
1300	Laranja (n=2)		Verde
	Azul (n=3)		
1400	Vermelho (n=2)		Amarelo
	Azul (n=3)		
1550	Verde (n=3)	Rosa	
1800	Amarelo (n=3)	Verde	

È importante compreender que toda medida de fotoelasticidade fornece diferenças de tensões principais e não tensões discretas, a não ser que uma das tensões possa ser assumida como tendo um valor conhecido ou como sendo zero, como em uma borda livre, por exemplo, os bordos de um pára-brisa.

Como já afirmado previamente, a Equação 2.3 se aplica a duas dimensões (tensões planas), onde as tensões variam sobre a área da amostra mas são constantes através da espessura. No caso de produtos de vidro, com exceção de cunhas livres, isto não é válido uma vez que o tratamento térmico do vidro durante a produção resulta em tensões que variam ao longo da espessura. Por exemplo, no vidro plano cada uma das tensões principais em qualquer posição tende a variar de uma maneira parabólica através da espessura, de compressão em uma superfície até tração no centro passando a compressão na outra superfície, como mostra a Figura 2.17.

Isto é verdade tanto em vidro recozido como em temperado. Somente os valores das tensões é que são diferentes. Sob estas circunstâncias a Equação 2.3 deve ser modificada na seguinte maneira:

$$\int_0^1 (\sigma_1 - \sigma_2) dt = \frac{N\lambda}{C} \quad (2.4)$$

$$\int_0^1 \sigma_1 dt - \int_0^1 \sigma_2 dt = \frac{N\lambda}{C} \quad (2.5)$$

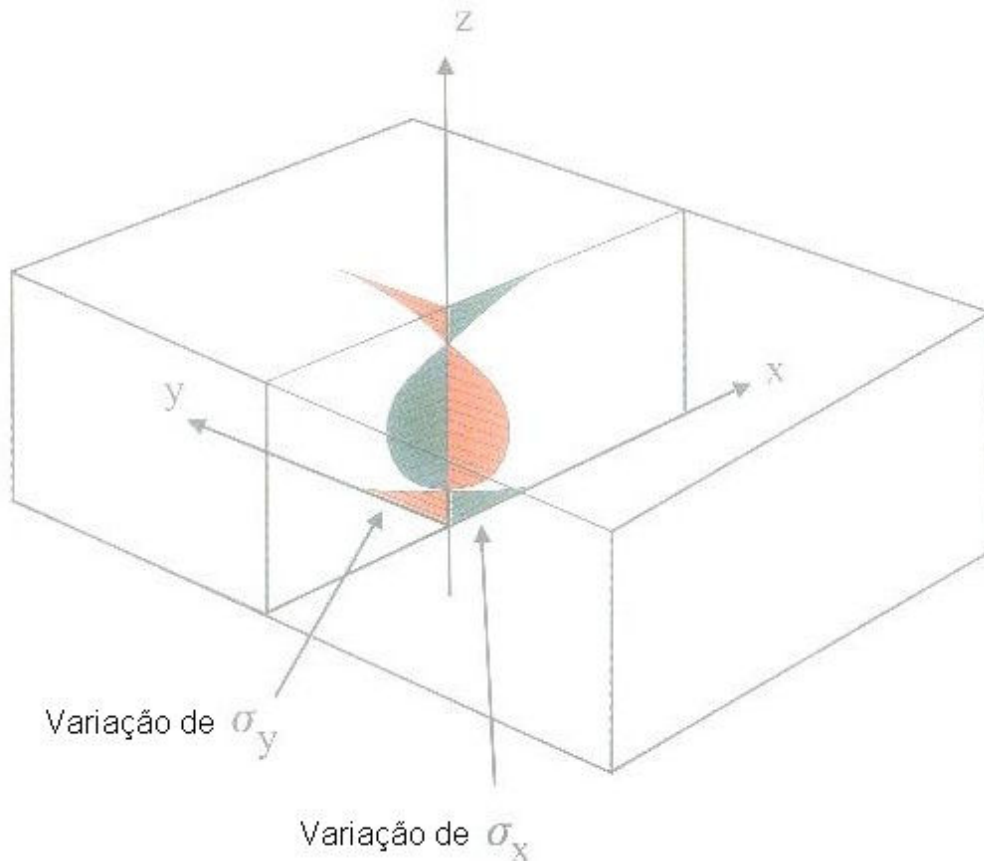


Figura 2.17. Esquema da variação de tensão através da espessura do vidro

Agora a interpretação do padrão da franja deve ser realizada com cuidado pois, por exemplo, se $N = 0$, isto é, se vê uma franja isocromática negra, isto sugere uma diferença de tensão igual a zero. Surgem numerosas possibilidades de aonde isto ocorre. Uma é que ambas as tensões principais são zero através da espessura do vidro ou, alternativamente, é possível que haja tensões presentes mas, ambas as integrais acima (equações 2.4 e 2.5) possam ser zero e neste caso suas diferenças também serão zero. As integrais podem também ser diferentes de zero mas iguais, o que também leva a zero como diferença. Deve-se considerar portanto que a separação das tensões sob estas circunstâncias é difícil, embora magnetofotoelasticidade (descrita na sessão 7.1) oferece melhores indicações para vidros que possuam mais altos valores de tensões residuais.

2,4,3 Avaliação do coeficiente de tensão óptica

O valor do coeficiente de tensão óptica usado nas equações 2.3-2.5 para o tipo de vidro analisado pode ser desconhecido. Neste caso existem diversas

aproximações que podem ser utilizadas para se obter um valor dessa propriedade. Todas elas se baseiam em um simples teste que é tomar uma amostra de um formato padrão e medir o retardo em uma posição da amostra ao mesmo tempo em que se submete diversas cargas sobre ela. Para vidro as geometria de teste mais diretas são:

- (i) uma viga em flexão pura (Figura 2.18(a)),
- (ii) disco circular sob compressão diametral (chamado disco de teste brasileiro (Figura 2.18(b))
- (iii) teste de compressão uniforme (Figura 2.18c).

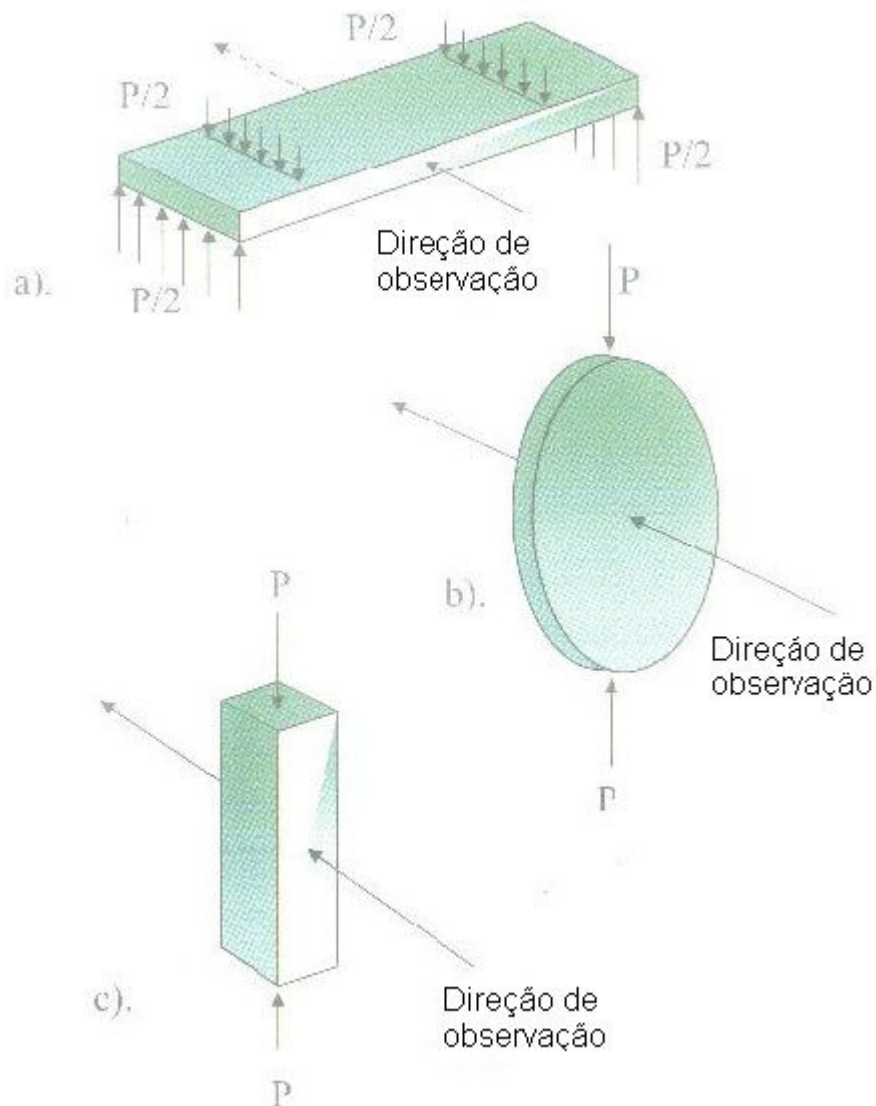


Figura 2.18. Amostras de teste para medida de coeficiente de tensão óptica

Para o teste da viga em flexão:

$$C = \frac{I\delta}{Myb} \quad (2.6)$$

Onde I é o segundo momento de área da viga (mm^4), M é o momento de flexão, (Nmm), y é a distância do eixo neutro (mm) até a posição de medida, b é o caminho óptico na viga (mm) e δ é o retardo ($= N\lambda$) (mm). Com o

campo de tensão variando com a distância partir do eixo neutro é possível de se obter varias leituras a partir de uma única carga aplicada (especialmente se um método de compensação esta sendo usado para medir os retardos relativos; ver sessão 3.3).

O teste do disco brasileiro também pode fornecer diversas leituras a partir de uma única carga aplicada uma vez que a distribuição do nível de tensões é bem conhecida (ver, por exemplo, Hondros [5]). Entretanto neste caso, é fácil de examinar o centro do disco e tomar dados com diversos níveis de carga. No centro do disco:

$$C = \frac{\pi R \delta}{4Pt} \quad (2.7)$$

onde R é o raio do disco (mm); P é a carga aplicada (N) e t é a espessura do disco (mm).

O teste de compressão uniforme é aquele no qual um paralelepípedo retangular de vidro é comprimido axialmente e o retardo observado conforme a carga se altera. Neste instante, para uma amostra apresentando uma secção quadrada de lado b (mm) submetida a uma carga P (N):

$$C = b \frac{\Delta \delta}{\Delta P} \quad (2.8)$$

onde $\frac{\Delta \delta}{\Delta P}$ é a inclinação do gráfico de δ em função de P .

3 Técnicas Básicas

3.1. Polariscópios

Um polariscópio é um instrumento para observar e analisar franjas fotoelásticas que surgem em uma amostra tencionada. De uma maneira sintética, ele consiste de uma fonte de luz, além de um polarizador e um analisador, entre os quais a amostra a ser analisada é colocada. A fonte de luz pode ser tal que a luz emitida possa passar através de uma lente a fim de prover luz colimada que atingirá a amostra em uma incidência normal (isto é, a 90° da superfície da amostra) ou, alternativamente, um difusor pode ser incorporado à lâmpada a fim de produzir iluminação difusa da amostra. Uma lâmpada a vapor de mercúrio é um exemplo de fonte luminosa e luz difusa pode ser simplesmente um bulbo de tungstênio ou sódio com uma placa difusora na frente. Geralmente maiores campos de visão podem ser obtidos com luz difusa e produtos de vidro como parabrisas ou telas de teve devem ser examinadas, este tipo de iluminação é preferido.

Polariscópios podem usar tanto polarização plana como circular. O arranjo óptico para o primeiro caso é denominado polariscópio plano, como

mostrado pela Figura 2.12. Este polariscópio permite se observar tanto isoclínicas como isocromáticas. Um polariscópio circular consiste de uma fonte de luz, polarizador e analisador juntos com duas placas de quarto de onda, como ilustrado na Figura 2.15. Durante a operação, a luz incidente passa através do polarizador, então pela primeira placa de quarto de onda e em seguida pela amostra. Depois da luz ter passado através da amostra, ela passa por uma segunda placa de quarto de onda e finalmente pelo analisador. Somente as franjas isocromáticas são observadas neste caso.

Em determinadas situações é necessário ter bastante precisão sobre o nível de retardo presente em uma determinada região de interesse na amostra de vidro sendo examinada. Entretanto comparado com outros materiais fotoelásticos, todos os vidros tem relativamente baixo valor de coeficiente de tensão óptica (ver Tabela 2.1) o que significa que, para uma dada diferença de tensões a magnitude do retardo e conseqüentemente o número de franjas é bastante pequeno. Para obter retardos maiores e mais fáceis de medir ou para avaliar ordens fracionárias de franjas que surjam entre duas franjas integrais, que podem ser distinguidas visualmente pelas cores em luz branca, se utilizam, frequentemente, compensadores.

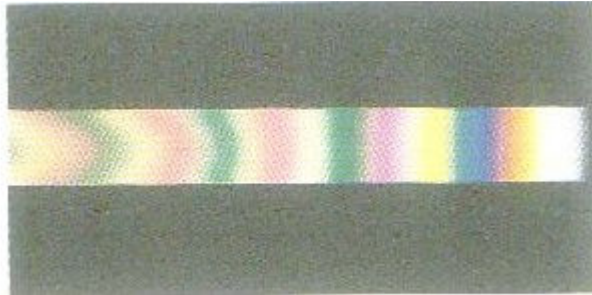
3.2 Compensadores

Compensadores são dispositivos ópticos que podem ser utilizados para produzir um retardo controlado quando instalado em série com o vidro sendo medido. O nível de retardo fornecido pelo compensador pode ser variado continuamente e desta maneira facilitando a medida do retardo no vidro analisado. Existem diversos dispositivos de compensação e técnicas disponíveis e algumas das mais comuns em uso na indústria do vidro serão descritas nos próximos parágrafos.

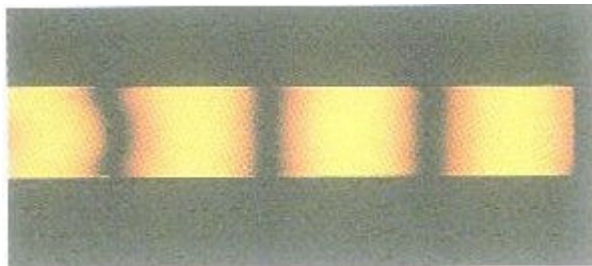
3.2.1 Cunha

Uma das formas mais simples de compensadores é uma cunha de plástico com tensões residuais internas congeladas. Uma cunha pode ser produzida a partir de uma barra retangular de resina epóxi submetida a um ciclo térmico que produza uma tensão uniforme em seu interior. A barra é então cortada na diagonal para constituir a cunha. As tensões no interior da cunha são uniformes mas a espessura varia ao longo do comprimento e da mesma forma o retardo também varia ao longo do comprimento de zero na ponta até uma ordem superior no lado oposto. Portanto, quando a cunha é vista entre polarizadores cruzados em luz branca, uma série de franjas paralelas e coloridas (orientadas transversalmente a largura da cunha) são vistas. A Figura 3.1(a) mostra a cunha vista em um polariscópio circular onde as franjas coloridas podem ser vistas de acordo com a Tabela 2.2. A franja de ordem zero, que sempre é preta, está localizada na ponta da cunha enquanto que a franja de primeira ordem é centrada na fronteira entre o azul escuro e o vermelho escuro. O centro da franja de segunda ordem corresponde com a fronteira entre o verde escuro e o rosa. Na medida que a ordem das franjas aumenta, a intensidade das cores diminui se tornando

menos distinguíveis nas ordens superiores. Quando uma franja é vista com luz monocromática, uma série de franjas negras é observada, Figura 3.1(b) e a cunha pode ser graduada em frações de distancias convenientes entre elas. Com luz monocromática as franjas de ordem superior podem ser vistas mais claramente.



(a) Cunha vista em um polariscópio circular com luz branca



(c) Cunha vista em um polariscópio circular com luz monocromática

Figura 3.1 Cunha observada com luz branca e monocromática

O compensador de tensão em cunha é mais apropriado para se acessar retardos nas bordas de produtos de vidro como chapas, parabrisas e algumas embalagens. Em adição, uma vez que a principal tensão perpendicular à borda é necessariamente zero, a cunha é particularmente útil para determinar se as tensões diferentes de zero, paralelas à borda deste componente de vidro são de tração ou compressão. Isto pode ser feito da seguinte maneira:

- (a) Posicione o vidro a ser analisado em um polariscópio circular com luz branca.
- (b) Posicione a cunha contra o vidro em ângulo reto em relação à borda e mova a cunha em movimento de vai e vem na direção do eixo principal da cunha, Figura 3.2(a).
- (c) Enquanto se executa (b) procurar uma franja preta que aparecerá na borda, como mostrado na Figura 3.2(b). Se isso não ocorrer, então a tensão do bordo é de tração, como explicado a seguir.

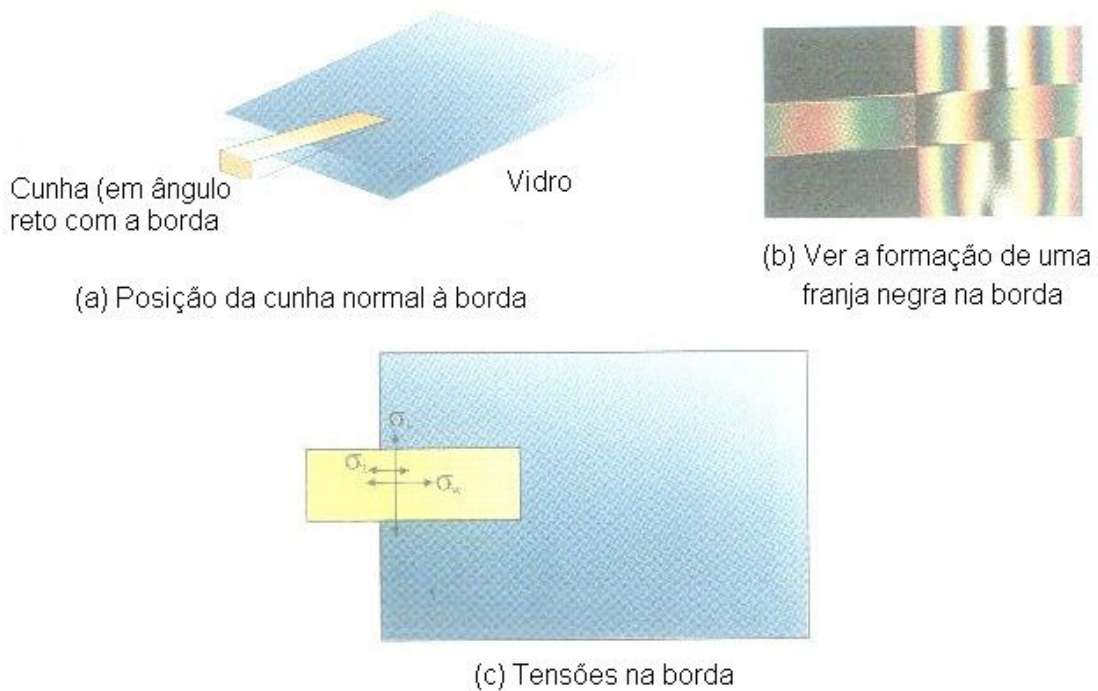


Figura 3.2. Uso de uma cunha para checar a existência de tensão de tração na borda do vidro

Com referência à Figura 3.2(c), a análise da fotoelasticidade se dá da seguinte maneira: A luz que passa através do vidro e da cunha é afetada pelas tensões em ambos. Seja σ_w a tensão na cunha, seja σ_1 a tensão paralela ao bordo do vidro, e σ_2 a tensão normal à borda. A tensão total em um ângulo reto com a borda é $(\sigma_2 + \sigma_w) = \sigma_w$ desde que $\sigma_2 = 0$. Portanto utilizando as relações de tensão óptica (equação 2.3), teremos:

$$(\sigma_1 - \sigma_w) = \frac{N\lambda}{Ct} \quad (3.1)$$

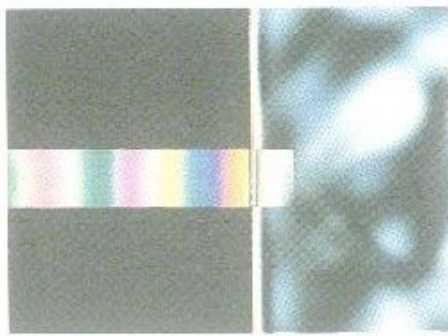
Desde que uma franja preta seja vista, $N = 0$ e portanto,

$$\sigma_1 = \sigma_w \quad (3.2)$$

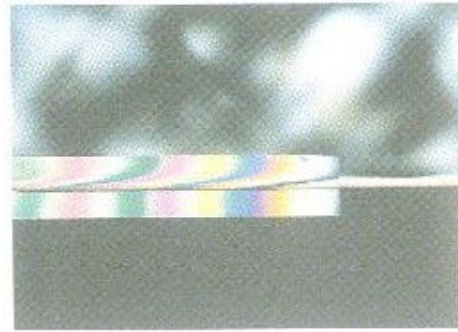
E desde que σ_w seja uma tração, σ_1 também o será.

Alternativamente, se não é possível de se obter uma franja preta com a cunha orientada nesta maneira, Figura 3.3(a), então a cunha deve ser girada para ficar paralela à borda do vidro, Figura 3.3(b).

Novamente a cunha deve ser movimentada na direção do seu comprimento. Se uma franja preta aparecer na borda, como mostra a Figura 3.3(b), então a tensão na borda será de compressão, como mostrado a seguir.



(a) Com a cunha nesta orientação a ordem da franja na borda aumenta



(b) Com a cunha paralela à borda, a ordem da franja na borda se torna zero



(c) Tensões presentes na borda

Figura 3.3 Utilização de uma cunha para checar tensões de compressão na borda do vidro

Neste caso (ver Figura 3.3(c)), a tensão total paralela à borda é $(\sigma_1 + \sigma_w)$ enquanto que a tensão perpendicular à borda $\sigma_2 = 0$. Portanto aplicando a equação 2.3 para a cunha e o vidro,

$$(\sigma_1 + \sigma_w) = \frac{N\lambda}{Ct} \quad (3.3)$$

Novamente $N = 0$ e, portanto

$$\sigma_1 = -\sigma_w \quad (3.4)$$

e desde que σ_w seja tração, o sinal negativo indica que σ_1 deve ser de compressão.

Uma medida da ordem da franja pode ser realizada colocando-se a cunha sobre o vidro, como descrito anteriormente e anotando aonde a franja preta aparece em relação à próxima franja de valor inferior. A ordem da franja é então dada pelo menor valor inteiro mais a parte fracionada entre este valor e o próximo completo acima dele. A graduação da cunha entre franjas completas, como já mencionado, auxilia na determinação da ordem da franja.

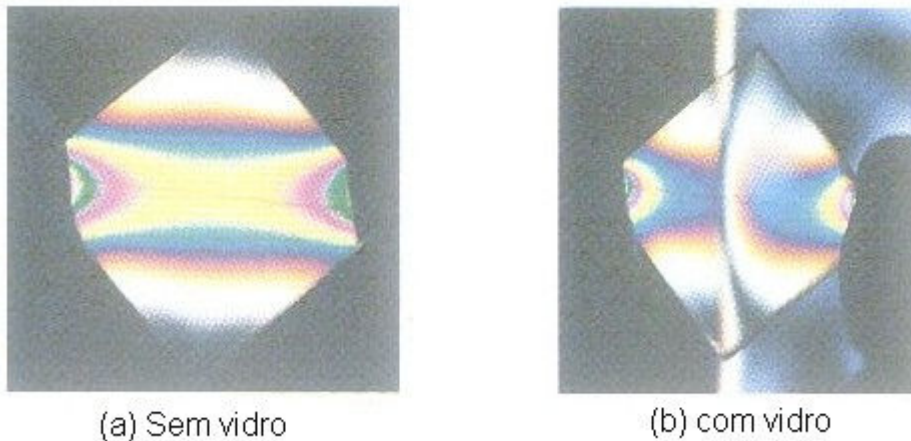


Figura 3.4. Aplicação de um quadrado de poliuretano para determinação do sinal da tensão na borda do vidro

3.2.2 Quadrado de poliuretano

Uma aproximação similar pode ser empregada com um quadrado de poliuretano, como o mostrado na Figura 3.4. Nota-se, quando ele é torcido, que o quadrado de poliuretano é muito sensível fotoelasticamente, porém, uma vez que torcê-lo implica na geração de uma tensão de referência que é de compressão, a orientação relativa à borda para identificação da tensão é oposta àquela explicada anteriormente para a cunha, isto é, a tensão no vidro na Figura 3.4(b) é compressiva.

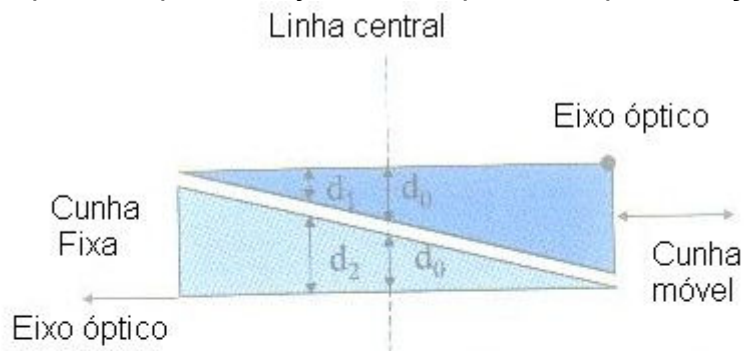
3.2.3 Compensador de babinet

Um compensador de babinet consiste de duas cunhas independentes de quartzo ou calcita que são orientadas como mostrado na Figura 3.5(a). As cunhas têm o mesmo ângulo que pode ser entre 2° e 3° , dependendo do número de franjas requeridas. Os eixos ópticos das duas cunhas são perpendiculares entre si e uma delas é fixa enquanto que a outra pode ser movimentada por rotação de uma régua calibrada, similar a um micrômetro.

Qualquer raio de luz que passe através do compensador caminha uma distância d_1 na primeira cunha e d_2 na segunda cunha. O retardo gerado é constante ao longo das linhas atravessando a largura do compensador pois a espessura da cunha é constante ao longo dessas linhas. Desta forma uma série de franjas paralelas são geradas na perpendicular à espessura de um compensador de Babinet. Ao longo da linha onde $d_1 = d_2 = d_0$ o retardo é zero e uma franja preta será observada. Em ambos os lados nesta posição, a ordem da franja aumenta progressivamente. Isto é mostrado na Figura 3.5(b).

O compensador de Babinet é utilizado pela sua incorporação ao polariscópio entre o vidro a ser examinado e o analisador mostrado na Figura 3.6.

A leitura inicial, isto é, a franja de ordem zero é notada centrado-se a mesma no cabelo cruzado, antes de colocar o vidro. O vidro é então inserido no polariscópio e se ajusta o compensador pela rotação manual thimble



(a) Arranjo da cunha de Babinet



(b) Franjas de Babinet