

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

LUCAS DA ROCHA DE MELO

**ANÁLISE DE TENSÃO DE PAREDE CILÍNDRICA SUBMETIDA À
PRESSÃO INTERNA ATRAVÉS DE FOTOELASTICIDADE**

Cruz das Almas

2019

LUCAS DA ROCHA DE MELO

ANÁLISE DE TENSÃO DE PAREDE CILÍNDRICA SUBMETIDA À PRESSÃO
INTERNA ATRAVÉS DE FOTOELASTICIDADE

Trabalho de conclusão de curso submetido à Universidade Federal do Recôncavo da Bahia sob a orientação do professor **Vânio Vicente S. de Souza** com a finalidade de cumprir os requisitos para o grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Cruz das Almas

2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**ANÁLISE DE TENSÃO DE PAREDE CILÍNDRICA SUBMETIDA À
PRESSÃO INTERNA ATRAVÉS DE FOTOELASTICIDADE**

Aprovada em: ____/____/____

EXAMINADORES:

Vânio Vicente Santos de Souza (Orientador)

Prof.

Prof.

LUCAS DA ROCHA DE MELO

CRUZ DAS ALMAS, 2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me proporcionado a oportunidade de poder vivenciar este trabalho, por me dar forças pra continuar e por sempre me guiar pelos caminhos de luz, onde pude encontrar pessoas maravilhosas que agregaram à minha trajetória.

À Hildes, por ter se mostrado uma namorada tão compreensiva quando precisei abdicar da minha presença em prol da conclusão deste trabalho, por ter me dado conselhos preciosos que me impulsionaram ao longo dos últimos dois anos, tanto de forma pessoal quanto profissional.

À minha avó Ana Mércia, por ter me acalmado em oportunidades que não conseguia pensar com clareza, por me levantar quando me faltava ânimo, pela paciência e pelas conversas que sempre me faziam esquecer de qualquer problema.

Ao meu orientador Vânio, que sempre me inspirou com suas ideias e sua percepção de vida. Por todas as reuniões às quintas pela tarde, por toda paciência e sabedoria prestada nesses dois últimos anos de graduação

À minha mãe Cristiane, por estar sempre comigo mesmo nos momentos em que desmereci a sua paciência, por se esforçar diariamente pra que eu pudesse concluir o sonho de me tornar engenheiro, abdicando do que fosse possível para que isso não deixasse de acontecer.

Ao meu avô Mário, que me sempre ampliou o meu campo de visão acerca dos mais diversos assuntos.

À minha irmã, por ser tão diferente de mim e ainda assim conviver em harmonia, na medida do possível.

Aos meus amigos Danilo, Guilherme e Tércio, por terem proporcionado uma excelente experiência de vida, dentro e fora da universidade.

À minha psicóloga Mariana, que possibilitou o meu equilíbrio emocional ao longo de quase um ano.

À UFRB, por disponibilizar equipamentos e estruturas necessárias à conclusão deste trabalho.

Resumo

No presente trabalho foi utilizada a teoria da fotoelasticidade com o objetivo da construção de um polariscópio plano de transmissão para a determinar o perfil da distribuição de tensões-deformações em um corpo de prova cujo ensaio não destrutivo simula uma parede de vaso de pressão cilíndrico sujeito à pressão interna. O projeto é detalhado no capítulo intitulado de metodologia, onde estão contidos os desenhos técnicos dos componentes utilizados para a construção do polariscópio e dos corpos de prova. Foram ensaiados quatro tipos de corpos de prova de acrílico denominados, C1, C2, V1 e V2, sendo que, dois deles com superfícies de mesma área (C2 e V1) e outros dois com espessuras iguais (C1 e V2), comparados entre si a fim de observar a distribuição de franjas ao longo de suas estruturas. Nas análises dos ensaios realizados, foi possível observar que C2 apresentou uma distribuição de tensões médias inferior à V1, enquanto C1 esteve submetido a um nível de tensões maior que V2. Por fim, concluiu-se que o formato construtivo coroadado é funcional no controle da distribuição de tensões quando o volume de material utilizado, para um mesmo propósito, for o mesmo utilizado para construção de uma geometria de viga simples. A partir disso, é possível abrir campo para a construção de vasos de pressão com formas pouco usuais.

Palavras-chaves: Experimento, fotoelasticidade, polariscópio, vaso de pressão.

Abstract

In the present work, the photoelasticity theory was used with the objective of the construction of a plane transmission polariscope to determine the profile of the strain-strain distribution in a test specimen whose non-destructive test simulates a cylindrical pressure vessel wall subject to internal pressure. The project is detailed in the chapter titled methodology, which contains the technical drawings of the components used for the construction of the polariscope and the test bodies. Four types of acrylic specimens denominated, C1, C2, V1 and V2 were tested, two of them with surfaces of the same area (C2 and V1) and two with equal thicknesses (C1 and V2), compared to each other in order to observe the distribution of fringes along their structures. In the analysis of the tests, it was possible to observe that C2 presented a mean voltage distribution lower than V1, while C1 was submitted to a voltage level higher than V2. Finally, it was concluded that the crowned constructional format is functional in the control of the stress distribution when the volume of material used for the same purpose is the same used for the construction of a single beam geometry. From this, it is possible to open field for the construction of pressure vessels with unusual shapes.

Key-words: Experiment, photoelasticity, polariscope, pressure vessel.

Lista de Figuras

Figura 1: Franjas devidas aos esforços aplicados pela chave à porca.....	14
Figura 2: Ordem das franjas	15
Figura 3: Modelo resfriado rapidamente e sua respectiva fatia retirada para análise.....	17
Figura 4: Vetores elétrico e magnético em uma onda eletromagnética	18
Figura 5: Elemento vibrante (esquerda) e luz natural (direita).....	19
Figura 6: Luz polarizada incidindo em um polarizador plano	20
Figura 7: Luz incidindo em um polarizador plano	26
Figura 8: Vasos de pressão e algumas de suas denominações	27
Figura 9: Distribuição de tensões em um vaso de pressão cilíndrico	28
Figura 10: Tensões de membrana e de flexão em um cilindro submetido à pressão interna.....	29
Figura 11: Distribuição de tensões axiais em corpos de prova	32
Figura 12: Distribuição das franjas nas proximidades de descontinuidades geométricas	32
Figura 13: Corpos de prova coroados (C1 e C2) e vigas simples (V1 e V2)	35
Figura 14: Modelagem 3D do experimento	37
Figura 15: Vista explodida do projeto do Polariscópio	38
Figura 16: Etapas de adição de esforços sobre o corpo de prova C1.....	41
Figura 17: Etapas de adição de esforços sobre o corpo de prova V2	41
Figura 18: Etapas de adição de esforços sobre o corpo de prova C2.....	42
Figura 19: Etapas de adição de esforços sobre o corpo de prova V1	43
Figura 21: Corpo de prova C1 bi apoiado e sem carregamentos	46
Figura 22: Ensaio com corpo de prova C1.....	47
Figura 23: Processamento de imagens obtidas com o ensaio do corpo de prova C1.....	48
Figura 24: Ensaio com o corpo de prova V2.....	48
Figura 25: Processamento de imagens obtidas com o ensaio do corpo de prova V2	49
Figura 26: Ensaio com o corpo de prova C2.....	51
Figura 27: Processamento de imagens obtidas com o ensaio do corpo de prova C2.....	52
Figura 28: Ensaio com o corpo de prova V1.....	53
Figura 29: Processamento de imagens obtidas com o ensaio do corpo de prova V1	53
Figura 30: Curva Tensão x Deformação para materiais metálicos.....	72

Lista de Tabelas

- Tabela 1: Relação da ordem de franja com algumas cores24
Tabela 2: Dimensões características dos corpos de prova38
Tabela 3: Propriedades Mecânicas do corpo de prova39
Tabela 4: Propriedades ópticas do corpo de prova39
Tabela 5: Medidas dos blocos de aço42
Tabela 6: Especificações técnicas da máquina fotográfica43
Tabela 7: Carregamentos aplicados no ensaio 144
Tabela 8: Carregamentos aplicados no ensaio 245
Tabela 9: Carregamentos aplicados no ensaio 346
Tabela 10: Carregamentos aplicados no ensaio 447
Tabela 11: Valores médios e máximos de δ para o gráfico 154
Tabela 12: Valores médios e máximos de δ para o gráfico 256
Tabela 13: Valores médios e máximos de δ para o gráfico 360
Tabela 14: Valores médios e máximos de δ para o gráfico 4.61

Lista de Símbolos

I : Intensidade da luz composta por um comprimento de onda λ

E_t : Eixo de polarização da luz

E_a : Eixo de absorção da luz

ω : Frequência angular de giro em torno do eixo de propagação

λ : Comprimento de onda luminosa para uma dada cor

n_0 : Índice de refração do sólido no vácuo antes da aplicação dos esforços

C_1 : Constante fotoelástica, denominada constante óptica.

C_2 : Constante fotoelástica, denominada constante óptica.

n_1 : Índice de refração para as vibrações que atravessam o sólido solicitado na direção da tensão principal maior

n_2 : Índice de refração na direção da tensão principal menor

σ_1 : Tensão principal maior

σ_2 : Tensão principal menor

v_1 : Velocidade de propagação da luz na direção da tensão principal maior

v_2 : Velocidade de propagação da luz na direção da tensão principal menor

δ_1 : Diferença de fase linear no eixo da tensão principal maior

δ_2 : Diferença de fase linear no eixo da tensão principal menor

δ : Diferença de fase linear entre uma componente de luz em relação à outra

c : Velocidade de propagação da luz no vácuo, igual a $3,0 \times 10^8$ m/s.

Δ : Diferença de fase angular

h : Espessura do objeto.

I : Intensidade da luz composta por um comprimento de onda λ

N : Ordem de aparecimento de uma franja isocromática

E : Módulo de elasticidade do material

ν : Coeficiente de Poisson

β : Ângulo de incidência de um vetor luz de onda em um retardador

γ : Ângulo de giro do vetor luz

θ : Ângulo entre o eixo de polarização do filtro e a direção das tensões principais

E_R : Eixo rápido de propagação da luz

E_L : Eixo lento de propagação da luz

f_ε : Constante óptica calculada em função da deformação

ε_1 : Deformação no eixo da tensão principal maior

ε_2 : Deformação no eixo da tensão principal maior

k : Fator de concentração de tensões

$\sigma_{x,\infty}$: Tensão de campo em pontos suficientemente afastados da descontinuidade.

σ_{unif} : Tensão média equivalente a uma distribuição uniforme de tensões na seção onde está situada a descontinuidade.

A : Área da seção transversal da barra

P : Esforço axial.

σ_x : Tensão normal na direção x da barra

σ_L : Tensão na direção longitudinal da barra

P_r : Pressão na direção radial do vaso de pressão

P_L : Pressão na direção longitudinal do vaso de pressão

t : Espessura do vaso de pressão

$\sigma_{m\acute{a}x}$: Valor máximo de tensão na região de descontinuidade

k : Fator de concentração de tensão

Sumário

Resumo	4
Abstract	5
Lista de Figuras	6
Lista de Tabelas	7
Lista de Símbolos	8
1. Introdução	11
2. Objetivo Geral	13
2.1. Objetivos Específicos	13
3 Revisão Bibliográfica	14
3.1 Fotoelasticidade	14
3.1.1 Fotoelasticidade de transmissão plana	17
3.1.2 Fotoelasticidade de transmissão tridimensional	17
3.1.3 Fotoelasticidade de Reflexão	18
3.1.4 Luz Polarizada	18
3.1.5 Polarizador Plano ou Linear	20
3.1.6 Propagação da luz em um meio Anisotrópico	21
3.1.7 Retardadores de Onda	25
3.1.8 Luz Polarizada Plana	26
3.1.9 Polariscópio	26
3.2 Vaso de Pressão	28
3.3 Tensão em Vasos Cilíndricos	29
3.3.1 Tensões Primárias	30
3.3.2 Tensões Secundárias	31
3.3.3 Tensão Máxima Admissível	32
3.3.4 Pressão Máxima de Trabalho Admissível	32
3.3.5 Concentração de tensões	32
3.3.6 Deformações na parede de um Vaso de Pressão	34
4 Metodologia	35
4.1 Projeto Polariscópio	36
4.1.1 Desenhos e dimensões dos Corpos de Prova	36
4.2 Propriedades dos Corpos de Prova	38
4.3 Polariscópio Plano de Transmissão	39
4.4 Conjunto Utilizado para Deformar os Corpos de Prova	41
4.5 Ensaios	42
4.5.1 Ensaio com C144	
4.5.2 Ensaio com V245	

- 4.5.3 Ensaio com C245
- 4.5.4 Ensaio com V146
- 4.6 Parametrização das Cores do Espectro Fotoelástico47
 - 4.6.1 Determinação do perfil da distribuição de tensões48
- 5 Resultados e Discussões49
 - 5.1 Ensaio de flexão 151
 - 5.1.1 Processamento de Imagens do Ensaio 1.52
 - 5.2 Ensaio de Flexão 253
 - 5.2.1 Processamento de imagens do ensaio de flexão 253
 - 5.3 Distribuição de tensões em C1 e V254
 - 5.3.1 Análise na Seção 154
 - 5.3.2 Análise na seção 255
 - 5.4 Ensaio de Flexão 357
 - 5.4.1 Processamento de imagens do ensaio 357
 - 5.5 Ensaio de Flexão 458
 - 5.5.1 Processamento de Imagens do Ensaio 459
 - 5.6 Distribuição de tensões em C2 e V159
- 6 Referências63
- Anexo A67
- Anexo B68
- Anexo B169
- Anexo C70
- Anexo C171
- Anexo D72
- Anexo D173
- Anexo E74
- Anexo E175
- 7 Apêndice 176
 - 7.1 Projetos de vasos de pressão76
 - 7.1.1 Seleção e Especificação de Materiais para o Vaso de Pressão76
- 8 Apêndice 278
 - 8.1 Deformações na parede de um Vaso de Pressão78

1. Introdução

Antes do surgimento da modelagem 3D, a fotoelasticidade, por muito tempo, foi uma importante ferramenta para determinar a distribuição de tensões, em um corpo de prova, de maneira quantitativa e qualitativa, devido a facilidade para analisar as condições de funcionamento de um elemento, pois a geometria e a forma com que se dá a distribuição das tensões-deformações são dois dos fatores primordiais a serem avaliados em um projeto de componentes mecânicos.

Este método consiste em uma técnica experimental para analisar tensões em materiais poliméricos, transparentes e birrefringentes, ou seja, apresentam anisotropia óptica – fenômeno de dupla refração da luz – observável através da luz polarizada plana ou circular (MARTINS, 2005).

Segundo CHOUSAL (2005), durante algum tempo o uso deste método passou a ser menos frequente. O aparecimento da interferometria holográfica ¹ e o método de “moiré” ²¹ trouxeram consigo resoluções melhores do que as oferecidas pela fotoelasticidade. A interferometria por exemplo, possibilitava a medição de deslocamentos da ordem de metade do comprimento de onda da luz utilizada CHOUSAL (2005).

Entretanto, a melhoria no processamento de imagens possibilitou que a fotoelasticidade retomasse seu destaque na análise de tensões sobrepondo-se em relação aos demais (CHOUSAL, 2005).

Na maioria dos estudos de comportamento mecânico dos materiais, a distribuição de tensões pode ser analisada com a técnica da fotoelasticidade. A geometria tridimensional da estrutura de vasos de pressão traz algumas incertezas nas modelagens numéricas refinadas, pois imperfeições não podem ser previstas. Além disso, exigem uma elevada capacidade computacional. Por meio da técnica da fotoelasticidade é possível visualizar o campo de tensões gerado quando o equipamento é carregado, permitindo comparações com outros métodos de análise.

¹ A interferometria holográfica é uma aplicação da holografia, onde esta funciona como instrumento de medida de grande rigor e sensibilidade, conseguindo medir alterações que ocorrem num sistema com uma precisão da ordem de grandeza do micra (m)

² Moiré é um método ótico que pode determinar a topografia dos objetos com superfície irregular

Embora existam pesquisas sobre materiais aplicáveis em vasos de pressão na literatura técnica, poucos estudos sobre o mecanismo de distribuição de tensões em sua estrutura têm sido apresentados na literatura. Por esta razão, foi realizado, com a utilização da técnica da fotoelasticidade, um estudo da distribuição de tensões, simulada na estrutura de corpos de prova de acrílico, que representam seções estruturais de paredes cilíndricas de vasos de pressão com duas geometrias de face externa.

Os corpos de prova da figura 14, analisados por fotoelasticidade são transparentes e apresentam anisotropia óptica quando submetidos a esforços. A visualização do fenômeno da fotoelasticidade só é possível mediante a construção de um polariscópio, cuja função principal é possibilitar a visualização dos parâmetros fotoelásticos do corpo de prova submetido ao carregamento ocorre em forma de franjas coloridas, quando a luz é branca, ou franjas pretas e brancas, quando a luz é monocromática.

2. Objetivo Geral

- Analisar as tensões atuantes em corpos de prova de acrílico, submetido à ensaios de flexão, através de fotoelasticidade.

2.1. Objetivos Específicos

- Construir um polariscópio de transmissão plana
- Ensaiai corpos de prova
- Analisar dados coletados
- Parametrizar as tensões atuantes
- Analisar viabilidade da aplicação de um novo formato geométrico em vasos de pressão

3 Revisão Bibliográfica

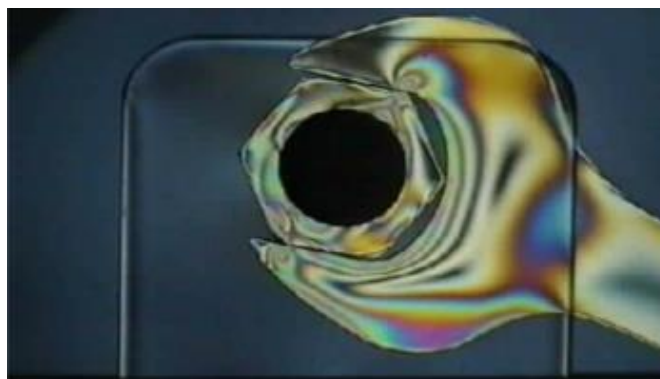
3.1 Fotoelasticidade

Diversos métodos experimentais podem ser utilizados para determinar a orientação da distribuição de tensões. Dentre as técnicas, podem ser citadas a eletroresistividade (com strain gages), transdutores de força e deslocamento, holografia, interferometria e a técnica da fotoelasticidade, que permite uma análise imediata da intensidade das tensões através de efeitos ópticos em estados planos ou tridimensionais, assim como suas respectivas distribuições. (SCHIAVON, 2010).

A fotoelasticidade, descoberta em 1912 por David Brewster, consiste em um fenômeno óptico observável em alguns materiais transparentes, que ao serem submetidos a uma luz polarizada, retratam níveis de tensão similares aos quais o material foi submetido, durante variação de tensões em sua estrutura interna. (SCHIAVON, 2010).

Os materiais utilizados em análises fotoelásticas são naturalmente isotrópicos, ou seja, possuem propriedades constantes para qualquer direção analisada, e tornam-se bi-refringentes – possui diferentes índices de refração para diferentes direções de propagação da luz - , o que promove uma certa defasagem na propagação do feixe de luz polarizada, gerando parâmetros fotoelásticos em formas de franjas, manifestadas em regiões de tração ou compressão, como evidenciado na figura 1. (ALCÂNTARA, 2006).

Figura 1: Franjas devidas aos esforços aplicados pela chave à porca



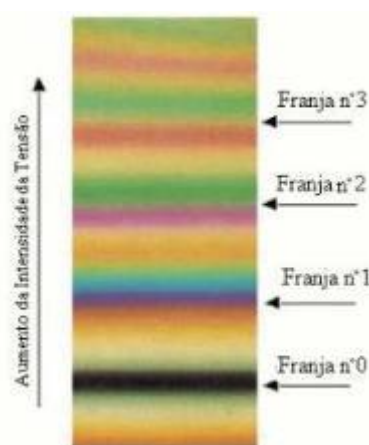
Fonte: MARTINS (2005)

Em uma outra dimensão, Spinelli define que o fenômeno fotoelástico pode ser explicado como uma rede de átomos interligados entre si por meio de uma nuvem de elétrons. As nuvens podem ser interpretadas como molas, com diferentes constantes de rigidez, que ao sofrerem deformações, modificam a sua estrutura interna. No momento em que uma luz polarizada incide sobre a estrutura anisotrópica do objeto, esta passa a viajar com diferentes velocidades, que dependem da orientação da nuvem e, portanto, responsável pelo conjunto de cores que demonstram as tensões/deformações no modelo mecânico.

Ao serem aplicados esforços em um material isotrópico, David (1912) observou em seus experimentos, que este se transforma em anisotrópico de forma proporcional à deformação causada em sua estrutura, ou seja, quanto maiores as tensões, maior o grau de anisotropia.

As tensões franjas de interferência luminosas produzirão franjas de interferência escuras (luz monocromática) ou coloridas e, a partir das figuras formadas, será possível analisa-las e medi-las a fim de determinar quais os pontos mais críticos para a geometria do material (SOUZA, 2011). Na figura 2, é possível observar a relação entre a distribuição das franjas isocromáticas com o aumento nas tensões em um material isotrópico.

Figura 2: Ordem das franjas



Fonte: ASSIS et al (2013)

A fotoelasticidade é utilizada no campo de verificação de soluções numéricas em estudos de tensões em geometrias diversas para otimização de formas, feitas por programas computacionais (PEREIRA; SMITH NETO; ALMEIDA, 2007), e pode ser

interpretada qualitativa e quantitativamente, podendo ainda serem classificadas como de transmissão, plana ou tridimensional (SOUZA, 2011).

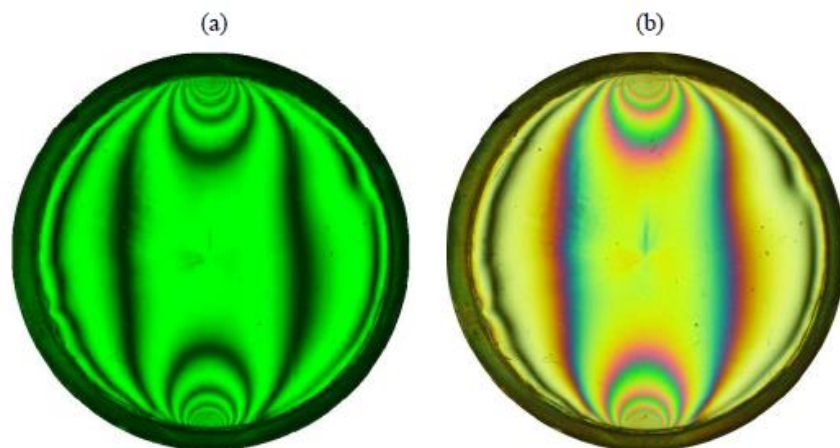
As deformações no objeto deformado só podem ser visualizadas mediante a incidência de uma luz polarizada em sua estrutura, emitida por um polariscópio. A interação da luz polarizada com a rede atômica do material sujeito a deformação, produz padrões característicos de cores, que também são conhecidos como padrões de tensões ou franjas, utilizadas para mensurar os níveis de tensão no componente (SPINELLI).

3.1.1 Padrão de Franjas

A análise fotoelástica permite a visualização de dois sistemas de franjas distintos e ao mesmo tempo, facilmente distinguíveis. Quando a luz utilizada é branca, as franjas produzidas por ela são coloridas como na figura 3 (b), ou seja, isocromáticas. Quando a luz utilizada é monocromática, o padrão de franjas evidenciadas é negro (SCHIAVON).

Ao submeter tensão em um corpo de prova anisotrópico, quando a luz incidida sobre ele é branca, uma série de cores será evidenciada. Cada uma dessas cores corresponde a um valor de $(\sigma_1 - \sigma_2)$, portanto, para uma mesma cor predominante em determinada faixa do material, isso corresponderá a uma mesma diferença de tensão entre os planos principais (SCHIAVON, 2010).

Figura 3: Franjas Isocromáticas (a) em luz monocromática e (B) em luz branca



Fonte: Schiavon (2010)

3.1.1.1 Franjas Isocromáticas

Ao submeter um corpo de prova a um carregamento qualquer e gradativo, ao ser posicionado em um polariscópio, este corpo de prova exibirá um padrão de franjas isocromáticas obtidas de um modelo bidimensional. O padrão de franjas exibidas ao longo do plano bidimensional do objeto exibe linhas ao longo de sua estrutura, onde a diferença entre as tensões primárias é constante e aumenta na mesma proporção da variação da carga de deformação (elástica). (SCHIAVON, 2010).

Novas franjas aparecerão com a variação (positiva) do carregamento nas regiões de maior tensão, fazendo com que outras sejam rearranjadas ao longo da estrutura do material (SCHIAVON, 2010).

3.1.2 Fotoelasticidade de transmissão plana

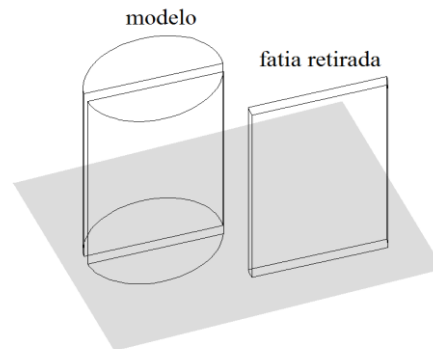
A fotoelasticidade de transmissão plana, consiste no estudo do comportamento das tensões em um molde plano, ao ser deformado. O material deve ter estrutura isotrópica homogênea, transparente e com propriedades óticas, fundamentais para que seja possível visualizar a dupla refração temporária ou anisotropia ótica (SPINELLI).

3.1.3 Fotoelasticidade de transmissão tridimensional

A análise do fenômeno da fotoelasticidade em materiais tridimensionais se dá pelo congelamento de tensões, técnica aplicada especificamente em casos de carregamento estático (FLEURY, 2001).

Nos polímeros, quando carregados sob altas temperaturas, a anisotropia ótica se mantém a mesma quando são resfriados rapidamente e seu carregamento retirado, evidenciando o mesmo comportamento de franjas que seriam visíveis se o esforço fosse mantido. Desta forma, a análise pode ser feita posteriormente por meio do fatiamento do modelo (figura 4), onde as tensões estarão congeladas (SCHIAVON, 2010).

Figura 4: Modelo resfriado rapidamente e sua respectiva fatia retirada para análise



Fonte: SCHIAVON (2010)

Apesar das franjas evidenciadas na fatia não serem planas, nela são evidenciadas as tensões principais secundárias naquele plano específico cuja direção e espessura são similares às utilizadas para modelos planos (ARAÚJO, 2006).

3.1.4 Fotoelasticidade de Reflexão

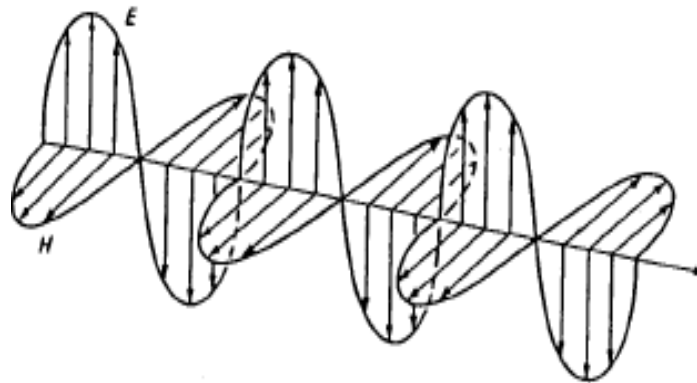
A fotoelasticidade pode ser observada também em objetos irregulares, anisotrópicos e reais, sujeitos a deformações elásticas e plásticas, que não seguem uma geometria bem definida, sem que seja necessário a criação de um modelo, feito de material isotrópico para análise (ARAÚJO, 2006).

Entretanto, para que seja possível a visualizar as deformações, é indispensável a adesão de uma película com propriedade fotoelástica sobre a superfície do material analisado com o auxílio de uma cola com propriedades reflexivas. Em seguida, o padrão de franjas poderá ser observado em um polariscópio, evidenciando o perfil das deformações no componente (SCHIAVON, 2010).

3.1.5 Luz Polarizada

A teoria da propagação eletromagnética afirma que a luz é uma onda luminosa que se propaga no espaço, associada a um campo elétrico e a um campo magnético, em planos perpendiculares entre si (figura 5). Uma radiação magnética se propaga no vácuo com a velocidade de 3.10^8 m/s (CHOUSAL, 1991).

Figura 5: Vetores elétrico e magnético em uma onda eletromagnética



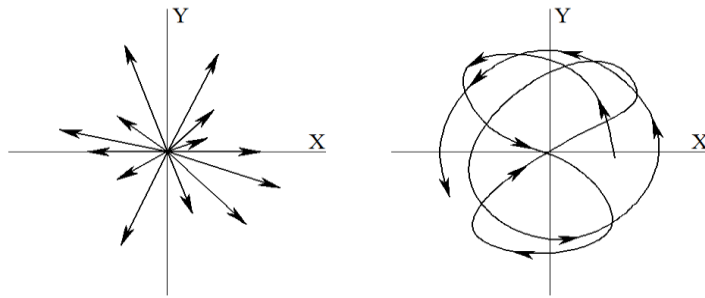
Fonte: CHOUSAL (1991)

Entretanto, apesar da luz ser resultado de um campo elétrico e um outro magnético, apenas o vetor campo elétrico é responsável pela interação entre a luz e as placas fotográficas, por isso, o campo elétrico está comumente associado a equações que envolvem fenômenos ópticos (CHOUSAL, 1991).

A luz natural pode também ser interpretada como um conjunto de ondas independentes com frequência e planos de orientação aleatórios em torno da direção em que se é propagada. O elemento vibrante é caracterizado por um vetor, cujas direções são variáveis, onde sua origem parte sempre do mesmo ponto e a extremidade representa a posição que este elemento ocupa (VASCONCELOS, 1947).

A posição em que se situa a extremidade deste vetor em função do tempo é descrita por uma curva de formato irregular, situada no plano normal à direção da propagação (figura 6) (SCHIAVON, 2010).

Figura 6: Elemento vibrante (esquerda) e luz natural (direita)



Fonte: SCHIAVON (2010)

Ao restringir o sentido de propagação do elemento vibrante, é possível que seja obtida a luz polarizada plana, como mostrado na figura 5. Para que isso aconteça, é necessário que se tenha um filtro polarizador plano, no sentido de propagação da fonte luminosa. A luz polarizada circular ou elíptica só é possível de se visualizar quando são utilizados dois elementos ópticos (FERREIRA & BERMUDES).

Os filtros polarizadores planos são capazes de absorver os componentes do vetor de luz que não vibram na direção do eixo polarizador. Quando a luz não polarizada passa através de um polarizador linear a componente do vetor perpendicular ao eixo do polarizador é absorvida e a paralela é transmitida (FERREIRA & BERMUDES).

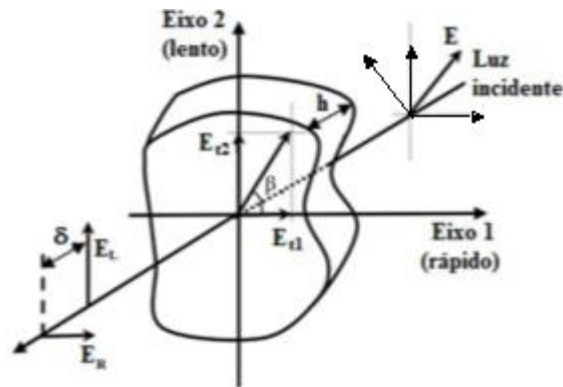
3.1.6 Polarizador Plano ou Linear

Um polarizador plano, é utilizado para absorver as componentes do vetor luminoso que não vibram na direção de seu eixo de propagação. Ao atravessar um polarizador plano, a luz é decomposta em duas componentes de onda que se propagam em direções perpendiculares entre si. A componente da luz, cuja direção é paralela ao eixo de polarização é transmitida (E_t), enquanto que a componente ortogonal pode ser absorvida ou refletida (E_a). Uma ilustração desse fenômeno é mostrada na figura 7.

$$\vec{E} = \vec{E}_t + \vec{E}_a \quad (1)$$

$$E_t = a \cdot \cos(\omega t) \cdot \cos(\alpha) \quad (2)$$

Figura 7: Luz polarizada incidindo em um polarizador plano



Fonte: ARAÚJO (2006 – modificado)

3.1.7 Propagação da luz em um meio Anisotrópico

Nos meios isotrópicos (ar, água e alguns plásticos), as ondas de luz são propagadas com velocidades iguais em todas as direções. Já no meio anisotrópico, as velocidades das ondas de luz são dadas em função das suas respectivas direções de propagação.

Se um feixe de luz incide sobre um meio anisotrópico, este mesmo feixe será decomposto em dois feixes polarizados e com direções perpendiculares entre si. Por se tratar de um meio anisotrópico, as velocidades de propagação serão diferentes, pois os feixes de luz emergentes, decompostos do feixe incidente, possuem direções distintas. A este fenômeno, atribui-se o nome de dupla refração temporária, cuja teoria afirma que duas vibrações não se propagam em um meio com a mesma velocidade (FIALHO, 1969).

Aos materiais transparentes que possuem a capacidade de decompor um feixe de luz em dois outros ortogonais e com velocidades diferentes, atribui-se a denominação de material bi-refringente. Segundo Fialho (1960), alguns materiais transparentes, ao serem submetidos a deformações, podem exibir o fenômeno da dupla refração temporária devido ao fato de possuírem propriedades fotoelásticas.

Maxwell indicou que as variações nos índices de refração em um elemento transparente, acontecem conforme variam-se as tensões principais em objetos de material fotoelástico. Estas variações podem ser determinadas pelas equações abaixo:

$$n_1 - n_0 = C_1\sigma_1 + C_2\sigma_2 \quad (3)$$

$$n_2 - n_0 = C_1\sigma_2 + C_2\sigma_1 \quad (4)$$

As equações (5) e (6) são válidas para uma faixa considerável de variações de tensões exercidas no componente, ultrapassando no geral o limite de proporcionalidade do material (DALLY; RILEY, 1991). Para determinar a constante fotoelástica do material, são combinadas as equações abaixo:

$$n_1 - n_2 = (C_1 - C_2)(\sigma_1 - \sigma_2) = C(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (5)$$

A diferença de fase linear δ entre uma componente de luz em relação à outra no eixo de propagação é dada por:

$$\delta = \delta_1 - \delta_2 = h(n_1 - n_2) \quad (6)$$

$$\delta_1 = h(n_1 - n_0) \quad (7)$$

$$\delta_2 = h(n_2 - n_0) \quad (8)$$

O tempo necessário para o feixe de luz transpassar a placa pode ser calculado por h/v , portanto, a fase entre os dois eixos pode ser determinada como:

$$\delta = c \left(\frac{h}{v_1} - \frac{h}{v_2} \right) = h(n_1 - n_2) \quad (9)$$

Combinando as equações (5) e (6), é possível determinar a diferença de fase linear em função da diferença de tensões principais.

$$\frac{h}{\delta} = C(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (10)$$

O vetor luz - representado por Δ - gira em torno do eixo de propagação com uma frequência angular ω . Sua intensidade pode ser obtida pela equação abaixo, cujo valor é diretamente proporcional à diferença de fase linear δ e inversamente proporcional ao comprimento de onda λ .

$$\Delta = \frac{2\pi}{\lambda} \delta = \frac{2\pi}{\lambda} h(n_1 - n_2) \quad (11)$$

Comparando as equações (10) e (11), obtém-se uma equação onde é possível determinar a diferença de fase angular Δ em função da diferença entre as tensões principais.

$$\frac{\Delta \lambda}{2\pi c h} = (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (12)$$

A ordem de aparecimento da franja isocromática é dada pela equação (13) e representada em números ordinais, 1, 2, 3... n ($n \in \mathbb{Z}$), enquanto a constante óptica (equação 14) determina quantitativamente o nível de tensão de uma franja.

$$N = \frac{\Delta}{2\pi} \quad (13)$$

$$f_\sigma = \frac{\lambda}{c} \quad (14)$$

Logo, a diferença entre as tensões principais pode ser calculada em função de variáveis de fácil obtenção (ARAÚJO, 2006).

$$(\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{N \cdot f_\sigma}{h} \quad (15)$$

$$\tau_{máx} = \frac{N \cdot f_\sigma}{2h} \quad (16)$$

Substituindo (14) em (15), tem-se:

$$(\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{N\lambda}{hc} \quad \text{ou} \quad C(\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{N\lambda}{h} \quad (17)$$

Comparando a equação (17) com a (10), obtém-se a equação (18)

$$\delta = N\lambda \quad (18)$$

Ao substituir (18) em (17), é possível obter a diferença entre as tensões principais em parâmetros de δ , h e C , como mostra a equação (19)

$$(\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{\delta}{hc} \quad (19)$$

De maneira similar, é possível determinar uma equação (20) que retorna a diferença entre as deformações principais. Esta equação é dita por Ferreira & Bermudes como a equação básica da fotoelasticidade.

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \frac{N \cdot f_\varepsilon}{h} \quad (20)$$

Nessas regiões, para cada franja, a diferença entre as tensões principais e a tensão máxima cisalhante é constante.

$$f_\varepsilon = \frac{1+\nu}{E} \cdot f_\sigma \quad (21)$$

Caso haja alguma variação entre as tensões principais, a primeira cor a ser extinta será a violeta. Quando isso ocorrer, uma franja amarela é poderá ser observada no modelo (FERREIRA & BERMUDES).

Se a diferença entre as tensões principais for nula, a região apresentará uma cor escura. Caso contrário, serão observadas regiões coloridas, onde cada uma das cores possui uma característica correspondente para cada diferença entre as tensões principais. Quando a diferença representar um número inteiro, a cor evidenciada será a púrpura. Na tabela 1 são mostrados os valores das diferenças entre tensões principais correspondentes a algumas das cores do espectro. (FERREIRA & BERMUDES).

Tabela 1: Relação da ordem de franja com algumas cores

Cor	Ordem de Franja (N)	Retardação Relativa (nm)
Preto	0	0
Cinza	0,20	160
Branco	0,45	260
Amarelo Pálido	0,6	345
Laranja	0,8	460
Vermelho Opaco	0,9	520
Roxo (tom de passagem)	1,00	575
Azul Escuro	1,08	620

Azul Verde	1,22	700
Verde/Amarelo	1,39	800
Laranja	1,63	935
Vermelho-Rosa	1,82	1050
Roxo (tom de passagem)	2,00	1150
Verde	2,35	1350
Verde Amarelo	2,50	1440
Vermelho	2,65	1520
Transição Vermelho-Verde	3,00	1730

Fonte: FERREIRA & BERMUDES

3.1.8 Retardadores de Onda

Quando um vetor luz incide em um retardador de onda com ângulo β diferente de 0, ela é decomposta em dois outros ortogonais entre si, E_R e E_L (figura 7), que se propagam em um eixo rápido e um eixo lento, com velocidades e tempos diferentes, estando uma defasada em relação a outra. Se a placa estiver em um campo de luz polarizada fizer um ângulo $\beta=0$ com o vetor luz transmitido E_t com qualquer um dos eixos, este vetor não terá decomposição (SCHIAVON, 2010).

Quando o ângulo proporcionado pela retardação angular de uma placa for de $\Delta = \pi/2$, pode se atribuir a denominação de um quarto de onda. As componentes decompostas do vetor luz no eixo rápido e no eixo lento, possuem equações representadas, respectivamente, por:

$$E_R = k \cdot \cos(\omega t) \cdot \cos(\beta) \quad (22)$$

$$E_L = k \cdot \cos(\omega t - \Delta) \cdot \sin(\beta) \quad (23)$$

Onde $k = a \cdot \cos(\alpha)$

O módulo do vetor de luz resultante é dado pela equação 24, enquanto que a tangente do ângulo γ com o eixo rápido é determinada pela equação 25.

$$E_t' = \sqrt{E_R^2 + E_L^2} = k \cdot \sqrt{\cos^2 \beta \cdot \cos^2(\omega t) + \sin^2 \beta \cdot \cos^2(\omega t - \Delta)} \quad (24)$$

$$\tan(\gamma) = \frac{E_R}{E_L} = \frac{\cos(\omega t - \Delta)}{\cos(\omega t)} - \tan(\beta) \quad (25)$$

Com a placa retardadora é possível controlar a amplitude e a rotação, obtidos pela polarização do tipo: plana, circular ou elíptica, que dependem diretamente da diferença de fase relativa (Δ) e do ângulo de orientação (β).

3.1.9 Luz Polarizada Plana

Caso o vetor de luz não gire ($\gamma = 0$) e, se houver efeito retardador ($\beta \neq 0$), este passará pela placa e emergirá com luz polarizada plana. Ocorrerá então apenas uma defasagem de onda, dependente da espessura e do índice de refração do material, associado ao eixo rápido. Este resultado é similar ao que se é obtido quando $\beta = \pi/2$

$$E_t = k \cdot \cos(\omega t) \quad (26)$$

3.1.10 Polariscópio

O polariscópio é o equipamento mais utilizado nas análises fotoelásticas, quando deseja-se determinar a diferença de fase produzida quando a luz polarizada atravessa um material de propriedades fotoelásticas submetido a esforços. Dentre as configurações mais comumente utilizadas estão os polariscópios planos e os circulares (DALLY, RILEY, 1991). Estes ainda podem ser classificados em modelos de transmissão e de reflexão (SCHIAVON, 2010).

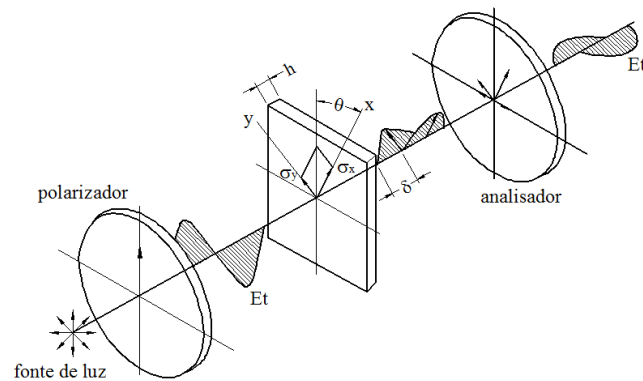
3.1.10.1 Polariscópio Plano

Um raio de luz natural pode ser ordenado de forma que as orientações do vetor luminoso sejam as mesmas ao longo do tempo. Para que seja possível analisar os efeitos ópticos produzidos pela passagem de luz polarizada plana através de um modelo fotoelástico sob tensão, é necessário um polariscópio de transmissão plana (SCHIAVON, 2010).

O polariscópio plano (figura 8) é composto essencialmente por dois filtros polarizadores, onde o primeiro deles absorve os vetores de luz que não se propagam na direção paralela ao eixo do polarizador. A luz polarizada plana pode ser produzida com apenas um polarizador plano (FERREIRA & BERMUDEZ, 2004).

O segundo filtro é utilizado para análise e o eixo de polarização é situado de tal forma que fique perpendicular em relação ao primeiro, impedindo dessa forma que os raios de luz que atravessaram o primeiro filtro não passem pelo segundo, pois estes se encontram cruzados entre si (HENDRY, 1966).

Figura 8: Luz incidindo em um polarizador plano



Fonte: Measurements Group (1981 – modificado)

A intensidade da luz em um polariscópio plano é dada por (GOMES, 1984).

$$I = K \cdot \text{sen}^2(2\theta) \cdot \text{sen}^2\left(\frac{\pi\delta}{\lambda}\right) \quad (27)$$

Quando o eixo polarizador está alinhado com as tensões sofridas pelo material, será produzida uma série de linhas escuras - denominadas franjas isoclínicas - no elemento ensaiado, onde não há incidência de luz. Uma outra condição para que ocorra o aparecimento dessas franjas, que definem as direções principais em cada ponto no modelo, acontece quando a defasagem entre os dois componentes de vibração for um número inteiro de comprimento de onda (SCHIAVON, 2010).

A intensidade da luz composta por um comprimento de onda λ , transmitida por um polariscópio em campo escuro é calculada pela equação 28.

$$I = \text{sen}^2 \left(\frac{\pi \delta}{\lambda} \right) \quad (28)$$

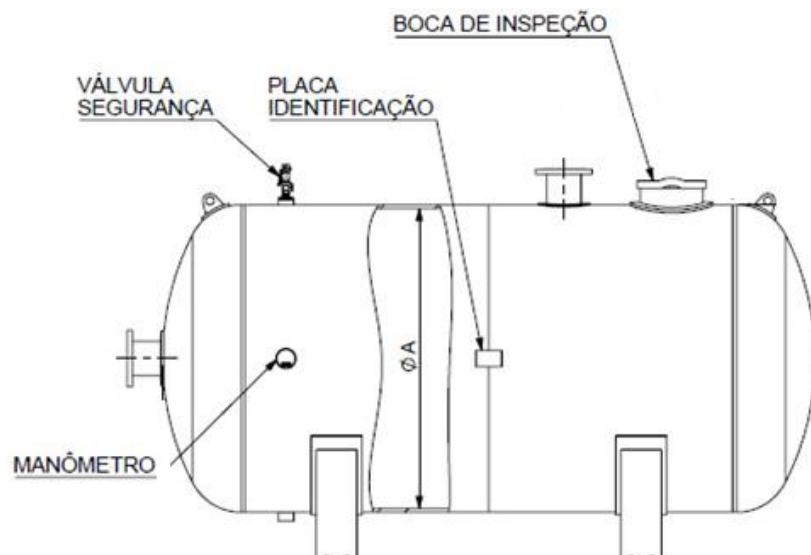
Quando a luz é monocromática, se $\delta = N\lambda = 0,1\lambda, 2\lambda \dots N\lambda; N \in \mathbb{Z}$, é produzido no componente uma franja isocromática nos pontos onde a diferença de fase é a mesma, ou seja, onde as tensões possuem os mesmos níveis. Quando a luz é branca, as franjas isocromáticas apresentarão amplas variações de cores. Cada comprimento de onda representa uma cor e somente uma delas será extinta de cada vez. Quando extinta, uma nova cor – complementar - aparece em seu lugar. (SCHIAVON, 2010).

3.2 Vaso de Pressão

Um vaso de pressão é um recipiente com dimensões, formato e aplicabilidades distintas, capaz de armazenar, com segurança, um fluido em estado líquido ou gasoso sujeitos à uma pressão de valor superior 1,02 kgf/cm², determinado pela ASME – Boiler and Pressure Vessel Code, padrão que regula o projeto e construção de caldeiras e vasos de pressão. O documento é escrito e mantido por voluntários escolhidos por seu conhecimento técnico.

É constituído de um corpo, que pode geralmente assumir formato cilíndrico, esférico, cônico ou elíptico, e uma tampa, cujos formatos são representados por superfícies de revolução (ASME, 2002). Alguns dos elementos que compõem um vaso de pressão, estão representados na figura 9.

Figura 9: Vasos de pressão e algumas de suas denominações



Fonte: FHAIZER (2019)

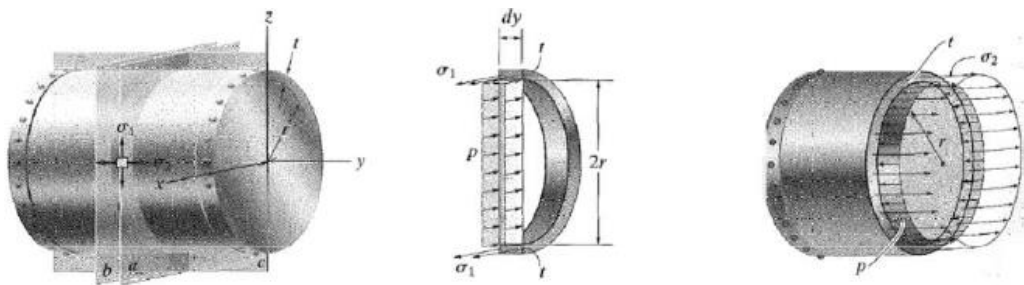
3.3 Tensão em Vasos Cilíndricos

Os cascos dos vasos de pressão cilíndricos possuem tampos de enclausuramento, os quais assumem diferentes formas geométricas. No tampo elíptico mais encontrado comercialmente, a relação entre semi-eixos é 2:1, portanto, o diâmetro é igual ao quádruplo da altura. A sua resistência é equivalente à do cilindro de mesmo diâmetro (IECKER, 2004).

A maioria dos vasos de pressão possuem formato cilíndrico, devido a facilidade de aproveitamento de chapas de forma integral para sua fabricação. Estes podem ainda serem classificados como horizontais, mais utilizados em trocadores de calor, e verticais, onde o formato é normalmente aproveitado para favorecer o escoamento do fluido, (NICOLA et al, 2012).

A distribuição de tensões radiais e longitudinais em um vaso de pressão cilíndrico, como o da figura 10, com paredes de espessura t , raio interno r e pressão manométrica P , podem ser visualizadas abaixo.

Figura 10: Distribuição de tensões em um vaso de pressão cilíndrico



Fonte: TELLES (2002)

As tensões que atuam na direção radial são determinadas pela equação (29)

$$\sigma_x = \frac{P_r}{t} \quad (29)$$

Enquanto as tensões que atuam no sentido longitudinal são determinadas pela equação (30).

$$\sigma_L = \frac{P_r}{2t} \quad (30)$$

Para Telles (2001), os vasos de pressão podem ser classificados das seguintes formas.

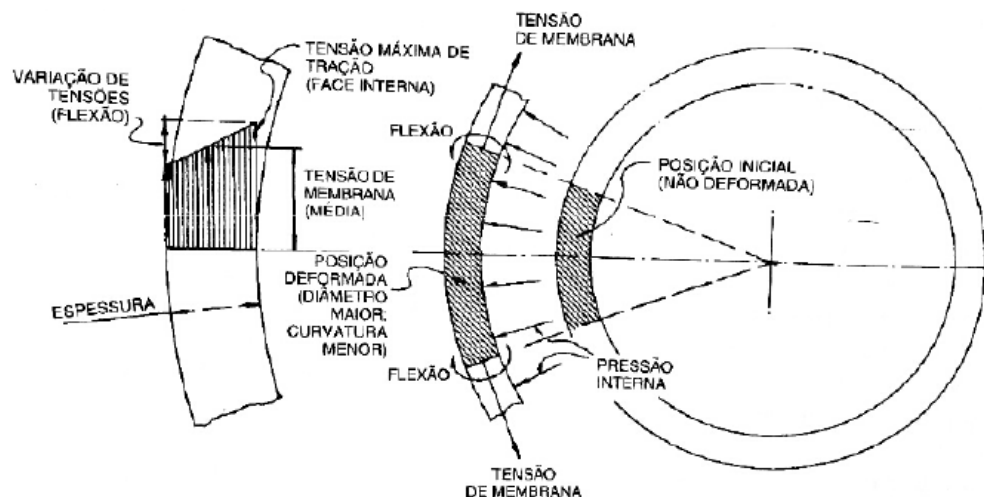
- Vasos sujeitos à incidência de chamas, como caldeiras e fornos
- Vasos não sujeitos à incidência de chamas, como trocadores de calor, condensadores, refeedores, reatores ou simplesmente armazenadores de gases.

De um modo geral, as tensões que atuam em um vaso de pressão podem ser classificadas em tensões primárias e tensões secundárias.

3.3.1 Tensões Primárias

Para determinar a espessura mínima a ser adotada no ato do projeto, são levadas em considerações as tensões que atuantes. Ao satisfazer as condições de equilíbrio estático no momento de operação, um vaso de pressão está submetido a tensões normais e de cisalhamento, causadas por esforços mecânicos permanentes. Estes esforços são classificados como tensões de ordem primária, devido a relação de proporcionalidade com as cargas das quais se originam. As tensões normais ainda podem ainda ser divididas nas classes de membrana ou de flexão, como mostra a figura 11 (TELLES, 2002).

Figura 11: Tensões de membrana e de flexão em um cilindro submetido à pressão interna



Fonte: TELLES (2001)

A tensão de membrana, causada pela pressão no interior do vaso, é sempre de tração, pois quanto maior a pressão armazenada, maior será a dilatação do recipiente. Já a tensão de flexão é proveniente do aumento do raio de curvatura da parede do vaso, decorrente da pressão existente e seu valor se eleva em função do aumento da espessura do material. Enquanto as tensões internas máximas são de teor compressivo, as tensões externas máximas são trativas (TELLES, 1996).

As tensões primárias são proporcionais às cargas das quais se originam, ou seja, quanto maiores os carregamentos, maior será a intensidade das tensões primárias. Além disso, ela permanece constante enquanto o carregamento estiver atuando no elemento. Quando estas tensões ultrapassam o limite de escoamento do material, poderão ocorrer deformações excessivas e irreversíveis (TELLES, 1996).

As tensões primárias de membrana circunferenciais e longitudinais, causadas pela pressão interna são parâmetros importantes no cálculo da espessura de vasos de pressão. As tensões radiais são desprezadas neste cálculo. São as tensões circunferenciais que tendem a romper o vaso segundo sua geratriz em detrimento da pressão interna. A sua intensidade pode chegar ao dobro das tensões longitudinais e a direção de rompimento é geralmente segundo a sua seção transversal (CARVALHO, 2008).

3.3.2 Tensões Secundárias

Telles (1996) afirma que as tensões secundárias são advindas de restrições geométricas, assim como de dilatações térmicas diferenciais, ou seja, não possuem dependência com esforços externos. Para controlar os níveis de tensões secundárias nos vasos de pressão, as normas de projeto fazem imposições em aspectos construtivos, amenizando transições de planos e de espessura (DONATO, 2007).

As tensões secundárias podem ser reduzidas com deformações plásticas locais, de modo que o valor máximo a ser atingido é o limite de escoamento do material. Quanto maior o esforço, maior será a deformação e a tensão secundária máxima continuará a ter o mesmo valor, e é por isso que estas tensões são incapazes de causar colapso plástico do equipamento (TELLES, 1996).

3.3.3 Tensão Máxima Admissível

A tensão máxima admissível representa o máximo de tensão que um material pode suportar em uma determinada condição de temperatura. Segundo a ASME, seção VII divisão 1, a tensão máxima admissível para diferentes materiais é dada em função da temperatura na Seção II, Parte D, Subparte 1, Tabelas 1A e 1B. Nestes valores não está incluído o ferro fundido.

Em vasos de pressão, a tensão admissível é calculada em função dos elevados fatores de segurança, aumentando a confiabilidade na segurança com o aumento na espessura das paredes destes equipamentos (MARTINS, 2009).

3.3.4 Pressão Máxima de Trabalho Admissível

A pressão máxima de trabalho admissível (PMTA) representa o maior valor suportável de pressão de trabalho em um vaso, usualmente empregado para a pressão de projeto. Este valor é medido no topo do recipiente durante a temperatura normal de operação para um vaso com espessura reduzida devido à corrosão. O valor de PMTA em um estado de corrosão deverá ser o menor dentre todos os outros para as partes mais essenciais do vaso.

3.3.5 Concentração de tensões

Em regiões onde a geometria varia de forma abrupta, como uma redução de seção transversal, este ponto se torna crítico em um objeto qualquer. Nesses pontos, são produzidas zonas, onde o aumento de tensão se dá pela diminuição da área. O efeito causado pelas variações na geometria se apresenta com maior intensidade nas proximidades da região, portanto quanto maior a distância do ponto crítico, maior será a garantia de constância nos níveis de tensão (FERREIRA & BERMUDEZ).

Este fator é o responsável por muitas das justificativas atribuídas aos modos de falha de alguns materiais. Isso é explicado devido à elevação das tensões na região crítica, que poderá exceder a tensão de escoamento do material, levando este ao

colapso. Estas regiões deverão ser previstas, a fim de garantir uma maior confiabilidade do equipamento projetado (FERREIRA & BERMUDES).

Para facilitar a identificação dessas zonas de maior concentração de tensão não identificadas na etapa de projeto, um polariscópio plano pode ser utilizado para avaliar se existem regiões críticas em um modelo – com propriedades fotoelásticas - similar ao real (FERREIRA & BERMUDES).

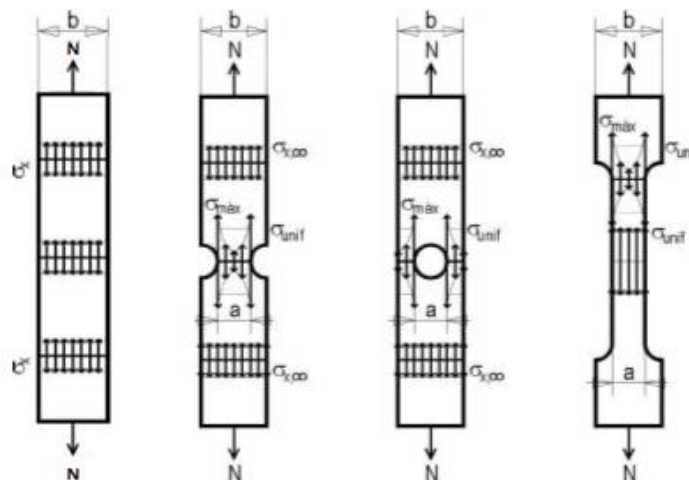
3.3.5.1 Concentradores de Tensão – Carregamento Axial

O estado tensional uniforme disposto em todos os pontos devido a um carregamento axial em uma barra de seção transversal uniforme é dado pela equação 31.

$$\sigma_x = \frac{P}{A} \quad (31)$$

Na figura 12, é possível visualizar a distribuição de tensões em 4 diferentes situações construtivas para quatro barras com geometrias similares. Na primeira delas a superfície é contínua, a segunda possui dois entalhes no centro, enquanto que a terceira possui um furo central e a quarta uma redução brusca de seção transversal.

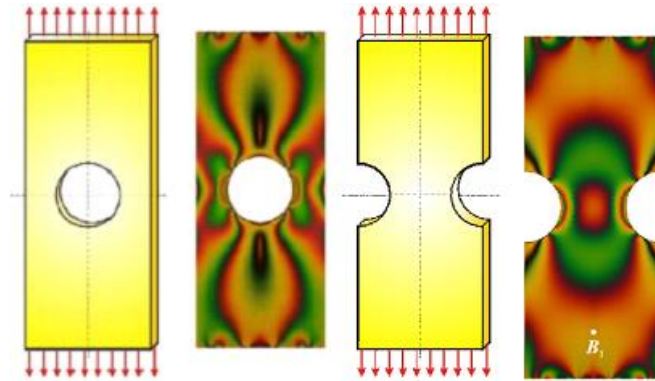
Figura 12: Distribuição de tensões axiais em corpos de prova



Fonte: FERREIRA & BERMUDES - Adaptado

Na figura 13, é evidenciado o comportamento das franjas policromáticas em uma região de descontinuidade de um corpo de prova qualquer submetido a esforços trativos

Figura 13: Distribuição das franjas nas proximidades de descontinuidades geométricas



Fonte: Frankovský et al (adaptado - 2012)

A relação entre o valor máximo de tensão na região de descontinuidade e o valor médio em pontos afastados é calculada em função do fator de concentração de tensão e fornecida pela equação 29 ou 30.

$$\sigma_{m\acute{a}x} = k\sigma_{x,\infty} \quad (32)$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} = k\sigma_{unif} \quad (33)$$

Se o tamanho da região de descontinuidade for consideravelmente inferior às dimensões do componente, o valor de k nas equações 32 e 33 são muito próximos, porém, quando as dimensões são comparáveis, a equação 33, mais frequentemente utilizada na prática, é a mais recomendada (FERREIRA & BERMUDES). O valor de k é sempre maior que 1, pode ser obtido experimentalmente e varia em função dos parâmetros a e b .

3.3.6 Deformações na parede de um Vaso de Pressão

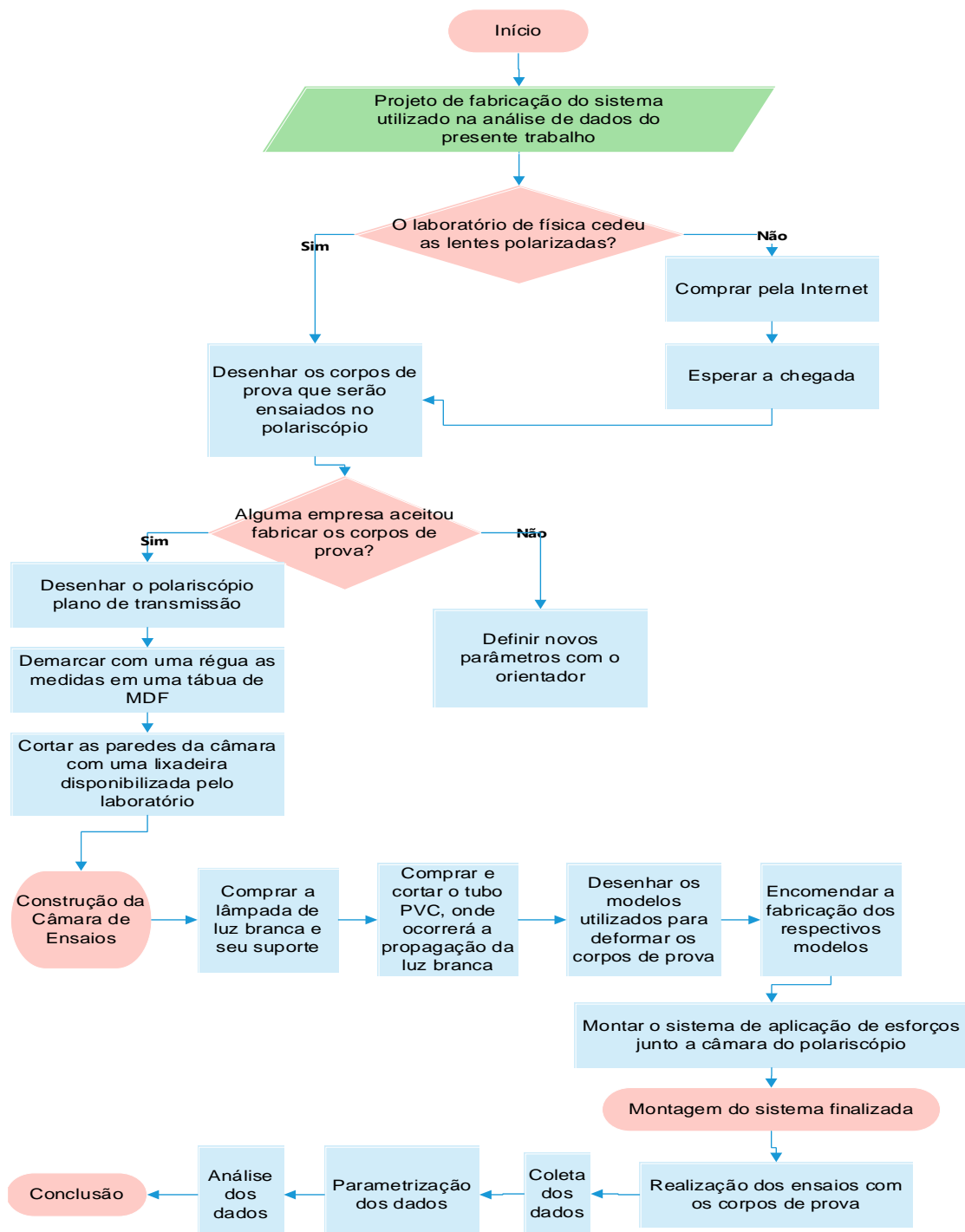
Para formalizar um modelo de análise de tensões nos corpos de prova estudados no presente trabalho, é necessário assumir que a área de seção transversal é constante e possui eixo de simetria perpendicular à direção do momento

aplicado a M , mesma suposição feita por Hibbeler (2004) para vigas curvas, cujas equações estão demonstradas no apêndice 2. Além disso, é assumido também que o material em análise é homogêneo, isotrópico, e se comporta de maneira linear-elástica quando a carga é aplicada.

É também necessário supor que as seções transversais do elemento permaneçam planas mesmo após a aplicação do seu momento, ou seja, qualquer distorção da seção transversal dentro de seu próprio plano será desprezada.

4 Metodologia

Neste capítulo, será descrita metodologia de construção de um sistema ótico de baixo custo denominado Polariscópio Plano de Transmissão, equipamento utilizado para analisar tensões em modelos fotoelásticos. O fluxograma que descreve as etapas necessárias à construção do sistema pode ser observado a seguir.



4.1 Projeto Polariscópio

4.1.1 Desenhos e dimensões dos Corpos de Prova

A análise de tensão atuante no elemento ensaiado, que simula a parede de um vaso de pressão submetido a esforços internos, só foi possível mediante a construção de um modelo cortado à laser em uma chapa de acrílico (estrudado), pois este material

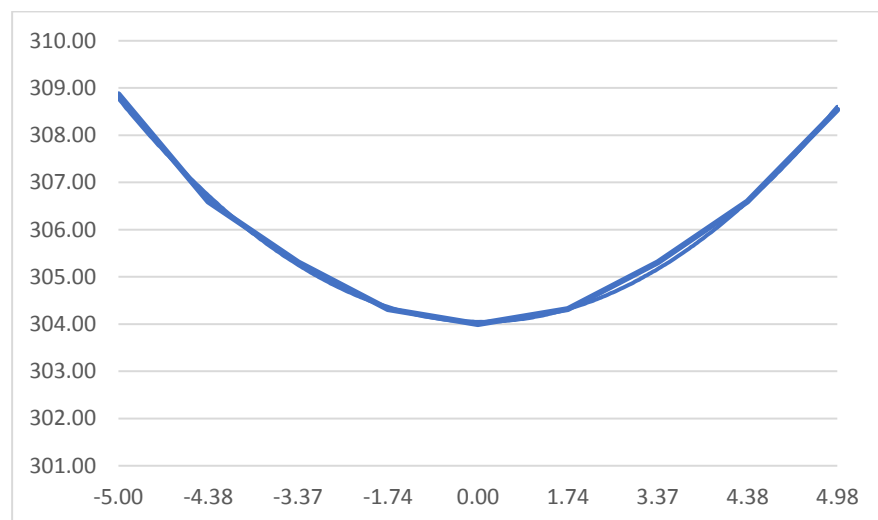
possui propriedade bi refringente e, quando submetido a passagem de luz polarizada, projeta um campo elétrico segundo os eixos que correspondem às tensões principais para um dado ponto.

Na figura 14 é possível observar os corpos de prova ensaiados e suas respectivas denominações, cujo formato representa um corte da seção de uma parede cilíndrica com raio de curvatura igual a 300mm. Entre o raio interno e a superfície externa, há alternância entre picos e vales, cujas distâncias entre si são de 10mm.

A equação (34) define o perfil de coroa central de C1 e C2 com uma precisão absoluta de $R^2 = 0,9978$, enquanto o gráfico 1 descreve o contorno superior da geometria.

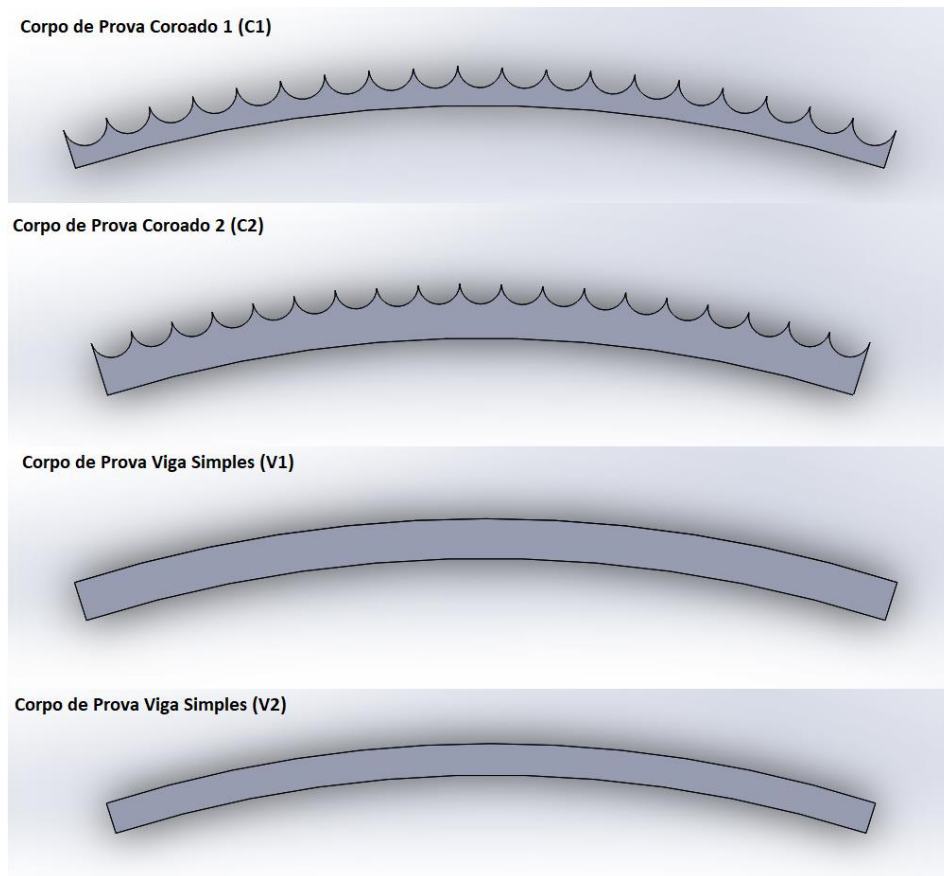
$$y = 0,2901x^2 - 2,9232x + 311,41 \quad (34)$$

Gráfico 1: Perfil parabólico da seção que representada os contornos de C1 e C2



Fonte: Autor (2019)

Figura 14: Corpos de prova coroados (C1 e C2) e vigas simples (V1 e V2)



Fonte: Autor (2019)

Tabela 2: Dimensões características dos corpos de prova

Corpo de Prova	Altura (h) – mm	Espessura (t) – mm	Área (A) – mm ²	Perímetro - mm
Corroado 1	8,92	10	940,59	490,99
Corroado 2	12,91	10	1709,97	496,63
Viga Simples 1	9,00	10	1683,64	392,14
Viga Simples 2	7,58	10	1415,16	388,44

Fonte: Autor (2019)

4.2 Propriedades dos Corpos de Prova

O material ensaiado consistiu no PMMA (Polimetil-Metacrilato), resina para propósitos gerais, (resina de copolímero, Acrigel), fornecida pela empresa Bold

Acrílicos, cujas propriedades mecânicas e ópticas estão devidamente registradas na tabela 3 e 4, respectivamente.

Tabela 3: Propriedades Mecânicas do corpo de prova

Propriedades Mecânicas	Método do teste e Condições	Unidade de Medida	Resultado
Resistência Flexível	ASTM D-638:203	MPa	71
Alongamento à Ruptura	ASTM D-785:2003	%	4
Resistência Flexural	ASTM D-790:2003	MPa	98
Módulo de Flexão	ASTM D-790:2003	MPa	2800
Resistência ao Impacto Izod	ASTM D-256:2003	J/m	20
Dureza Rockwel	ASTM D-785:2003	M scake	104

Fonte: Bold Acrílicos (2019)

Tabela 4: Propriedades ópticas do corpo de prova

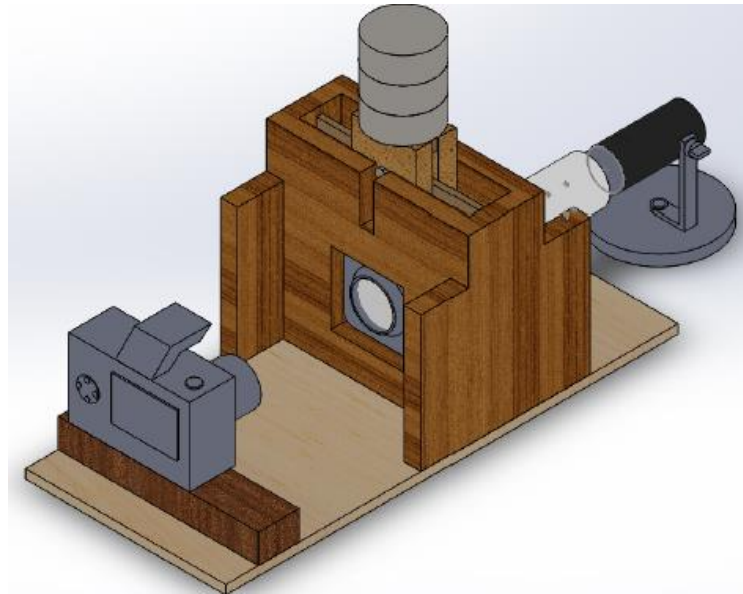
Propriedades Ópticas	Método do Teste e Condições	Unidade de Medida	Resultado
Deflexão de Calor	ASTM D-658	°C	105
Flamabilidade	ASTM D-635:2003	mm/min	30
Coefficiente de Dilatação Linear	ASTM D-831:2006	Mm/min/°C	$5,5 \cdot 10^{(-5)}$

Fonte: Canon (2019)

4.3 Polariscópio Plano de Transmissão

O polariscópio consistiu em uma bancada de madeira, usada como suporte para o canal de propagação da luz, assim como os seus suportes. Além disso, foi acoplada à bancada uma câmara, onde o corpo de prova foi posicionado para submissão de esforços mecânicos. Uma visão esquemática do projeto é ilustrada isometricamente na figura 15 e detalhada em vista explodida na figura 16.

Figura 15: Modelagem 3D do experimento



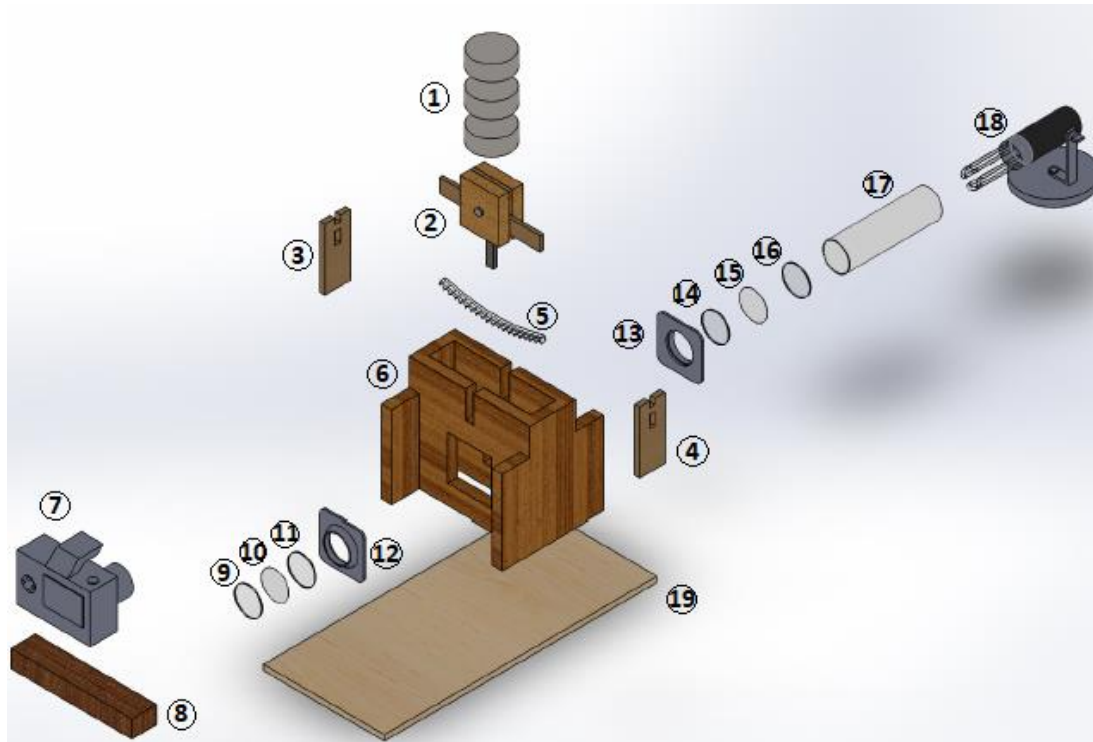
Fonte: Autor (2019)

A luz polarizada necessária para visualizar as franjas que representam as tensões no corpo de prova de propriedades birrefringentes foram obtidas mediante a utilização de uma lente e um filtro polarizador. O primeiro filtro, posicionado depois da fonte luminosa, projeta um campo elétrico segundo os eixos que correspondem às tensões principais para um dado ponto. Essas tensões são visualizadas no segundo filtro, o analisador.

Foi posicionada na região central a câmara de ensaios, confeccionada de material MDF (do inglês Medium Density Fiberboard ou Placa de Fibra de Baixa Densidade). Duas aberturas laterais foram feitas com o objetivo de encaixar um suporte quadrangular de filtro polarizador (circular e com diâmetro igual a 25mm), em cada uma das extremidades, posicionados antes e depois do corpo de prova.

O local de propagação da luz, consiste em um tubo PVC, utilizado em instalações sanitárias, com 25 mm de diâmetro interno. Em uma de suas extremidades, foi posicionado um suporte para lâmpada responsável pela emissão da luz. A outra extremidade, foi acoplada ao suporte do filtro polarizador.

Figura 16: Vista explodida do projeto do Polariscópio



Fonte: Autor (2018)

Onde:

- | | |
|--|---|
| 1- Blocos padronizados | 11- Lente de proteção do filtro polarizador |
| 2- Apoio dos blocos | 12- Suporte das lentes e do filtro |
| 3- Apoio dos corpos de prova | 13- Suporte das lentes e do filtro |
| 4- Apoio dos corpos de prova | 14- Lente de proteção do filtro polarizador |
| 5- Corpo de prova corroado | 15- Filtro polarizador |
| 6- Câmara de ensaios | 16- Lente de proteção do filtro polarizador |
| 7- Câmera fotográfica | 17- Tubo PVC de propagação da luz |
| 8- Apoio de nivelamento da câmera | 18- Lâmpada fluorescente |
| 9- Lente de proteção do filtro polarizador | 19- Apoio da bancada |
| 10- Filtro polarizador | |

4.4 Conjunto Utilizado para Deformar os Corpos de Prova

Para submeter o corpo de prova aos esforços, foi fabricado um modelo de madeira, de massa igual a 0,198 kg, onde foram apoiados os blocos padronizados. O

apoio possui duas placas de MDF, interligadas por um parafuso e uma porca, ambos sextavados. Entre as placas, existem duas placas menores de mesma espessura, sendo uma delas o ponto central de aplicação do esforço no corpo de prova, enquanto a funcionalidade da outra resume-se ao alinhamento entre as placas principais após o torque aplicado no parafuso.

Os pesos padrões utilizados foram fabricados a partir de um tarugo metálico de propriedades mecânicas desconhecidas, que foi dividido em cinco partes de dimensões similares. O corte do tarugo foi feito pelo disco de corte de 7" de uma lixadeira angular Makita com 2.200 W de potência.

O faceamento de suas bases circulares foi feito em um torno mecânico Nardini, com uma ferramenta de corte de metal duro. Depois de faceados, os pesos padrões foram pintados com tinta preta.

As dimensões e massas dos respectivos pesos padrões utilizados nos ensaios estão indicados na tabela 5. Para efetuar as medições de altura e diâmetro, foi utilizado um paquímetro Digimess, cuja escala de medição vai de 0 a 200mm e menor divisão igual a 0,02mm. Para quantificar a massa dos blocos, utilizou-se uma balança digital, modelo SCALA 20/1, cujo range abrange de 0,020kg a 19000,00kg e menor divisão igual a 0,001g.

Tabela 5: Medidas dos blocos de aço

Bloco	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Massa (kg)
A	69,92	29,16	0,872
B	69,60	29,14	0,864
C	69,84	29,08	0,867
D	69,90	28,96	0,866
E	69,72	29,00	0,861

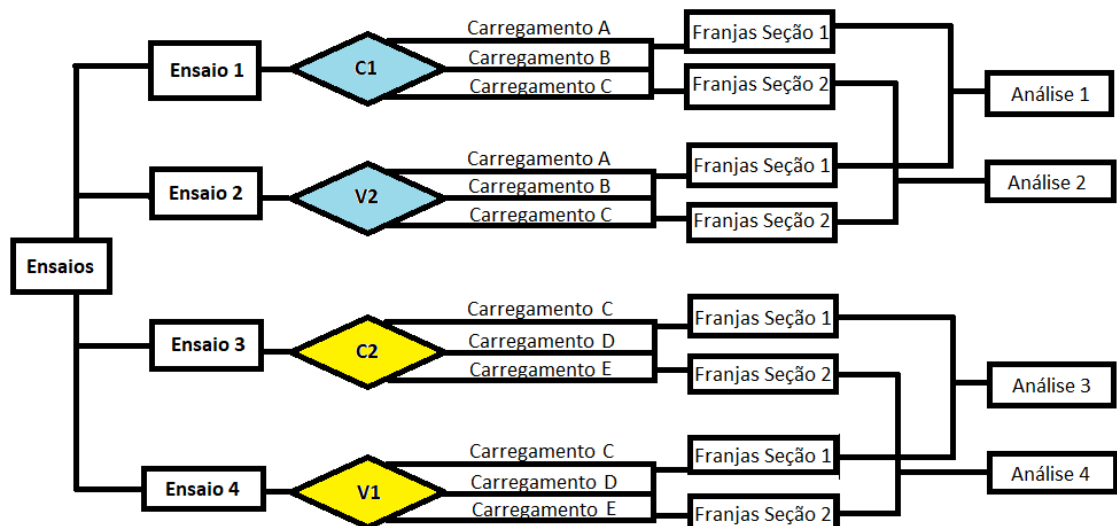
Fonte: Autor (2019)

4.5 Ensaios

No presente trabalho foram ensaiados corpos de prova de material acrílico fornecido pela Bold Acrílicos e cortado à laser. Na figura 17, está representado um

quadro esquemático que representa as etapas e critérios de execução, desde os ensaios até as análises.

Figura 17: Quadro esquemático de ensaios e análises



Fonte: Autor (2019)

Foram realizados quatro ensaios de flexão, sendo o primeiro e segundo deles com os corpos de prova C1 e V2, respectivamente, cujos carregamentos estão indicados nas tabelas 6 e 7, enquanto o terceiro e quarto consistiram em deformar C2 e V1 respectivamente por meio da aplicação dos carregamentos indicados na tabela 7 e 8.

Ao fim dos ensaios, verificou-se que os esforços gerados no corpo de prova não ultrapassaram o regime elástico, de forma que este recuperasse a sua distribuição inicial. Esta verificação foi feita a partir de uma comparação entre as franjas evidenciadas antes e depois do ensaio, sem a aplicação de carregamentos.

As imagens dos ensaios feitos nos corpos de prova foram feitas por uma câmera fotográfica Canon PowerShot SX520 HS semi-profissional de especificações ilustradas na tabela

Tabela 6: Especificações técnicas da máquina fotográfica

Resolução	13,2 Megapixels
Resolução Máxima	4608 x 3456 Pixels
Zoom Digital	1.9 x

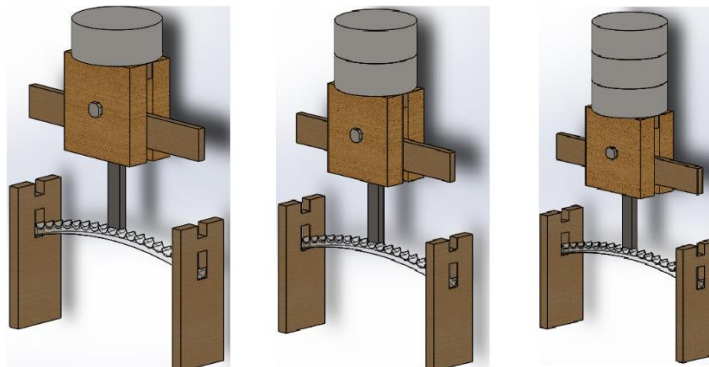
Zoom Óptico	65 x
Tamanho da Tela	7.1 Polegadas
Flash	Automático, Desligado, Forçado, Sincronização Lenta

Fonte: Canon (2018)

4.5.1 Ensaio com C1

O primeiro ensaio de flexão consistiu no posicionamento inicial de um apoio, para direcionar os esforços ocasionados somente pelos blocos A, B e C, ilustrados isoladamente, em estágios na figura 18. Os valores dos carregamentos correspondentes às etapas aplicadas estão indicados na tabela 7. Os resultados obtidos durante os ensaios com C1 foram comparados com V2, pois estes corpos de prova possuem áreas de seção transversal máxima iguais, fator este que pode ser determinante no aumento da resistência às tensões aplicadas.

Figura 18: Etapas de adição de esforços sobre o corpo de prova C1



Fonte: Autor (2019)

Tabela 7: Carregamentos aplicados no ensaio 1

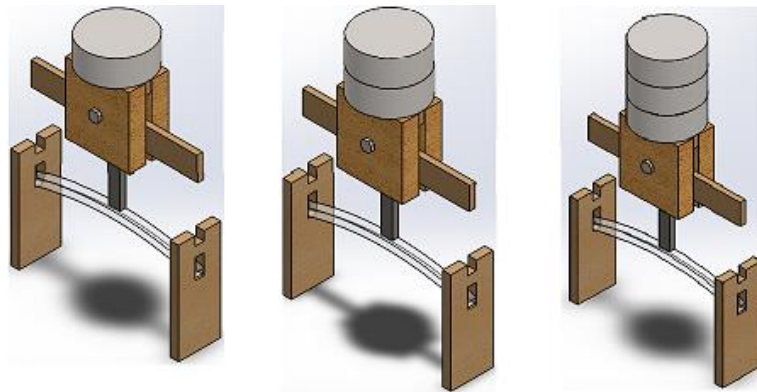
Etapa	Corpo de Prova	Valor (N)
A	C1	10,49
B	C1	18,97
C	C1	27,47

Fonte: Autor (2019)

4.5.2 Ensaio com V2

O segundo ensaio de flexão, com o corpo de prova V2. Assim como em C1, o ensaio consistiu na adição de 3 blocos (A, B e C) em sequência, como mostra a figura 19. Na tabela 8 estão explicitados os valores dos carregamentos aplicados durante o ensaio.

Figura 19: Etapas de adição de esforços sobre o corpo de prova V2



Fonte: Autor (2019)

Tabela 8: Carregamentos aplicados no ensaio 2

Etapa	Corpo de Prova	Valor (N)
A	V2	10,49
B	V2	18,97
C	V2	27,47

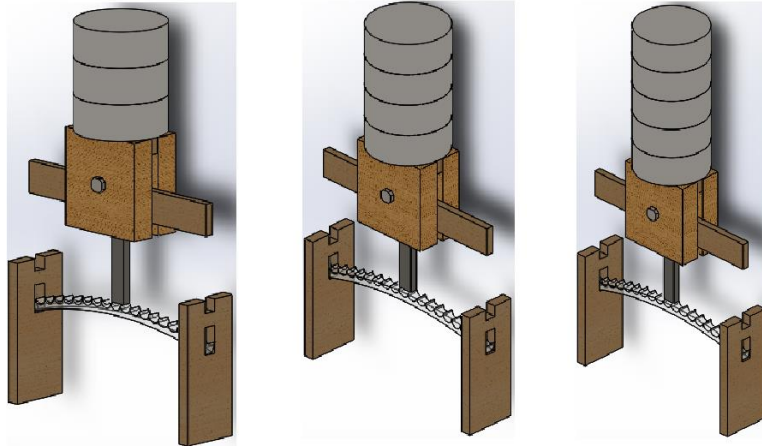
Fonte: Autor (2019)

4.5.3 Ensaio com C2

Durante o ensaio de flexão com C2, foram utilizados 5 blocos apoiados no corpo de prova durante o ensaio, pois este, assim como o V1 apresentou um grau de deflexão visivelmente menor do que o C1 e V2. Os resultados obtidos durante os ensaios com C2 foram comparados com V1, pois a área de suas respectivas superfícies mostradas na figura 14 são similares em uma ordem de 98,46%, fator este que pode ser determinante no aumento da resistência às tensões aplicadas.

Para analisar a distribuição de tensões em C2 no capítulo 5, foram selecionadas as imagens provenientes dos carregamentos – indicados na tabela 9 - da sequência mostrada na figura 20.

Figura 20: Etapas de adição de esforços sobre o corpo de prova C2



Fonte: Autor (2019)

Tabela 9: Carregamentos aplicados no ensaio 3

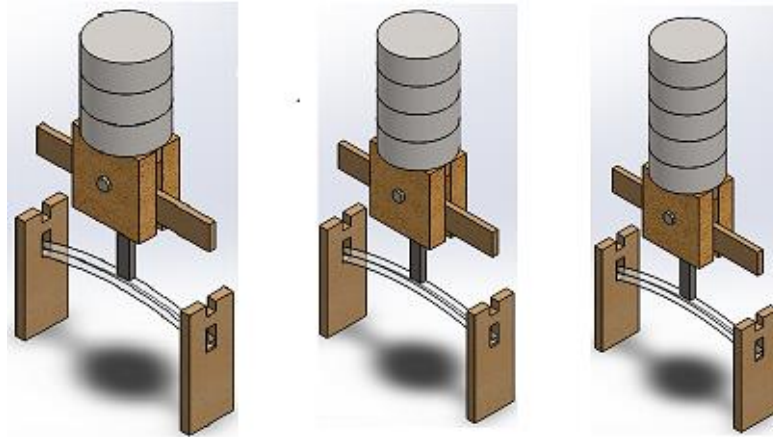
Etapa	Corpo de Prova	Valor (N)
C	C2	27,47
D	C2	35,97
E	C2	44,42

Fonte: Autor (2019)

4.5.4 Ensaio com V1

Ao ensaiar V1, por possuir maior resistência à flexão, foram utilizados até 5 blocos para que fosse possível visualizar uma distribuição de tensões de forma mais evidente. Para analisar este corpo de prova no capítulo 5, foram selecionadas as imagens provenientes dos carregamentos – indicados na tabela 10 - da sequência mostrada na figura 21.

Figura 21: Etapas de adição de esforços sobre o corpo de prova V1



Fonte: Autor (2019).

Tabela 10: Carregamentos aplicados no ensaio 4

Etapa	Corpo de Prova	Valor (N)
A	V1	27,47
B	V1	35,97
C	V1	44,42

Fonte: Autor (2019)

4.6 Parametrização das Cores do Espectro Fotoelástico

As imagens capturadas pela câmera fotográfica evidenciaram a distribuição de tensões ao longo dos corpos de prova, no entanto, se fez necessário a aplicação de um método capaz de qualificar o comportamento dessas tensões ao longo da estrutura.

Para que fosse possível determinar este comportamento, adotou-se como referência a figura 2 do capítulo 3, na qual é mostrada como se dá a distribuição de tensões em uma análise fotoelástica e suas cores correspondentes.

Em um software, foi possível aproximar a imensurável quantidade de tons da figura 2 em 256 cores – a partir da conversão da imagem, inicialmente no formato PNG, para o formato bmp - possíveis de serem determinadas e separadas em um espectro. Posteriormente foram quantificadas as distribuições proporcionais de azul,

vermelho e verde ao longo de cada camada do espectro obtido e ilustrado no anexo A.

Para as imagens obtidas no ensaio dos corpos de prova, foi repetido o mesmo procedimento de redução das cores mostradas na imagem original, tornando possível a determinação das cores (e suas proporções de vermelho, verde e azul) observadas no segundo filtro polarizador.

Com a disponibilidade de espectros de cores da distribuição de franjas na fotoelasticidade e espectros de cores em detrimento da aplicação de esforços nos corpos de prova, foi feita uma comparação entre os dois resultados para qualificar o comportamento da distribuição de tensões ao longo das respectivas estruturas analisadas.

4.6.1 Determinação do perfil da distribuição de tensões

Apesar dos registros fotográficos feitos nos ensaios terem permitido a visualização do quadro de evolução das franjas isocromáticas no material, estes resultados por si só não retornam valores numéricos da tensão ao longo da estrutura do corpo de prova.

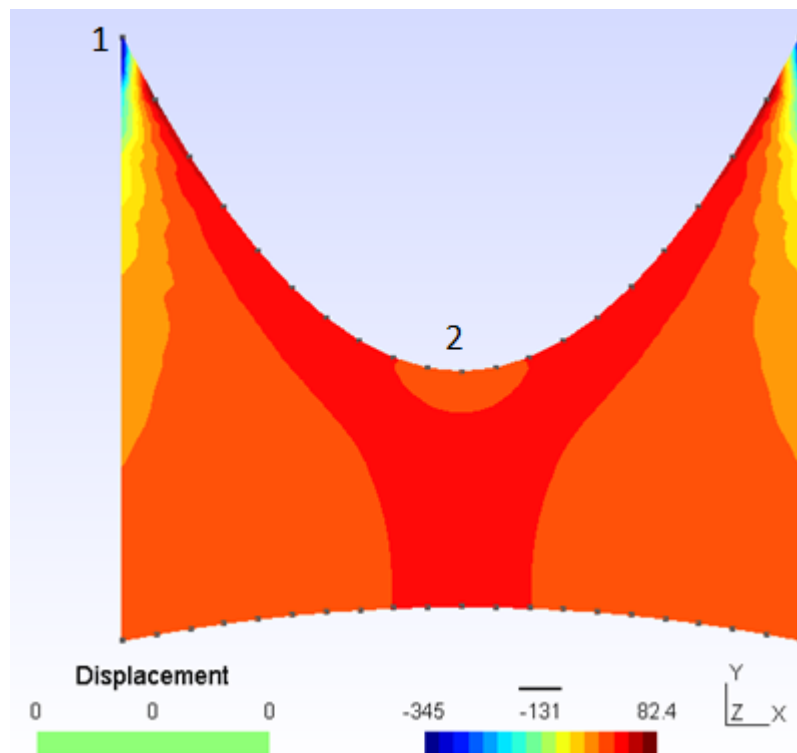
Portanto, foi realizado um tratamento nas imagens, que foram convertidas do formato PNG, o formato BMP para reduzir a quantidade de cores a 256, e criar regiões com faixas de cores próximas às mostradas, possibilitando mapear regiões onde ocorrem a maior concentração de tensões e seus respectivos perfis de distribuição através da comparação com o perfil de distribuição de franjas do anexo A, que quantifica a proporção de tons RGB, o número de franja e seu valor de δ .

Das figuras processadas, foram analisadas duas seções nos corpos de prova a fim de identificar e quantificar o perfil de cores e suas intensidades RGB ao longo de 1 pixel de seção da imagem.

Com os respectivos valores de delta definidos para cada cor, foram construídos gráficos no capítulo 5 para melhor visualização do comportamento da variação das tensões em cada corpo de prova.

Para determinar a natureza das tensões (de compressão ou de tração) atuantes no corpo de prova C1, foi utilizada uma simulação feita por VILLAS BOAS, Luan Mello, na qual as condições de contorno foram similares às utilizadas no ensaio.

Figura 21: Seções 1 e 2 representadas na simulação das condições de ensaio em C1



Fonte: Vilas Boas (2019)

5 Resultados e Discussões

Após finalização do projeto e construção do polariscópio e dos corpos de prova, verificou-se, antes da realização de ensaios, se haviam tensões residuais nos elementos devido ao processo de fabricação (corte a laser). Isso foi feito ensaiando-se as amostras sem aplicação de tensão no polariscópio.

Foi observada uma imagem clara na projeção, com franjas nas bordas, que caracterizariam uma distribuição de tensões no corpo de prova na região determinada, conforme a figura 22.

Figura 22: Corpo de prova C1 bi apoiado e sem carregamentos



Fonte: Autor (2019).

Na figura 22, mesmo que o corpo de prova não esteja submetido a aplicação de tensões de flexão, é possível observar franjas isocromáticas nas bordas do material.

Um dos problemas mais críticos associados à fabricação de materiais por processos que envolvem grandes concentrações de calor em uma região estreita é formação de tensões residuais (MIRIM et al). Segundo o autor, o estado interno de tensão é causado quando um material é submetido a processo térmico e/ou mecânico, como por exemplo, na estampagem, na laminação corte à laser, processo de fabricação dos corpos de prova.

Devido ao grande aporte térmico e a rápida solidificação da zona de fusão, essa geração de tensões pode resultar em distorções geométricas de um componente, tornando-se visível a olho nu (MIRIM et al).

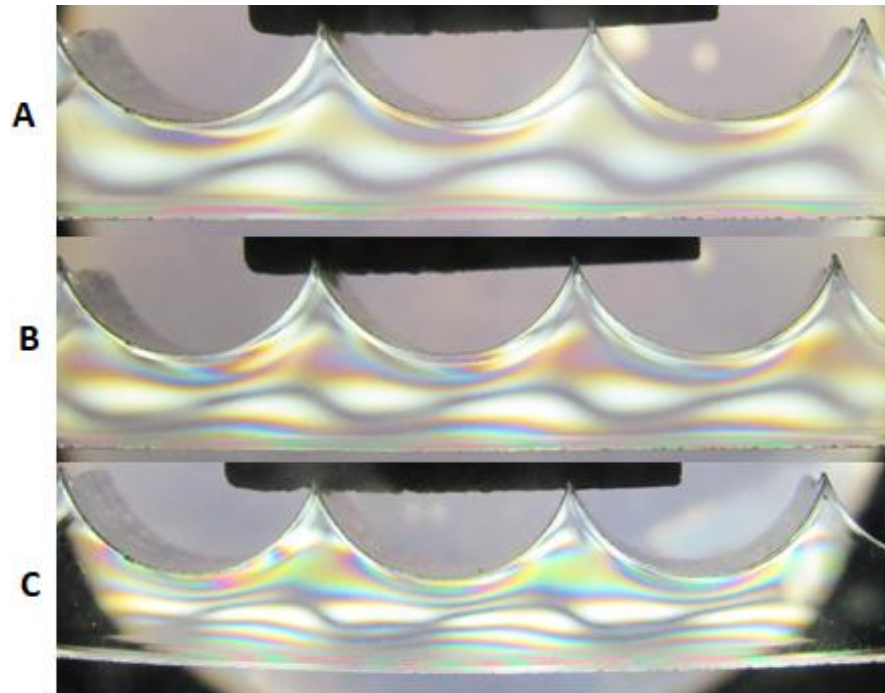
Algumas dessas distorções podem ser percebidas a olho nu, e ainda mais quando submetidas à passagem de luz polarizada.

A luz policromática incidida sobre o primeiro filtro, foi refletida pelo material acrílico com direções de acordo com as tensões aplicadas e suas deformações consequentes. Depois de refletida, a luz atravessou o segundo filtro, onde foi possível visualizar as direções e as diferenças das tensões principais por meio de franjas isocromáticas (SOUZA, 2011).

5.1 Ensaio de flexão 1

A figura 22 mostra a progressão na formação de franjas no corpo de prova C1 sobre a ação de carregamentos (apoio + bloco A, A+B e A+B+C), cujos valores são detalhados na tabela 7.

Figura 23: Ensaio com corpo de prova C1



Fonte: Autor (2019).

Como a luz utilizada foi policromática, observou-se o aparecimento de franjas coloridas ao longo da superfície dos corpos de prova ensaiados, assim como mencionado por FERREIRA & BERMUDES. Em razão do aumento da carga aplicada ao corpo de prova, é possível observar de forma mais clara o aparecimento de novas cores de franjas diferentes ao longo da estrutura do material, segundo SPINELLI.

Segundo Hibbeler (2005), todo corpo de prova reto ou curvo, sujeito a deformações por flexão, possuem regiões de compressão e de tração. Além disso, é dito também que há uma linha neutra que divide as regiões de tração das regiões de compressão, onde as tensões atuantes tendem a 0.

No ensaio 1, assim como nos demais, foram observados diversos segmentos em cinza, visível de forma mais clara na figura 22 para o carregamento A. De acordo

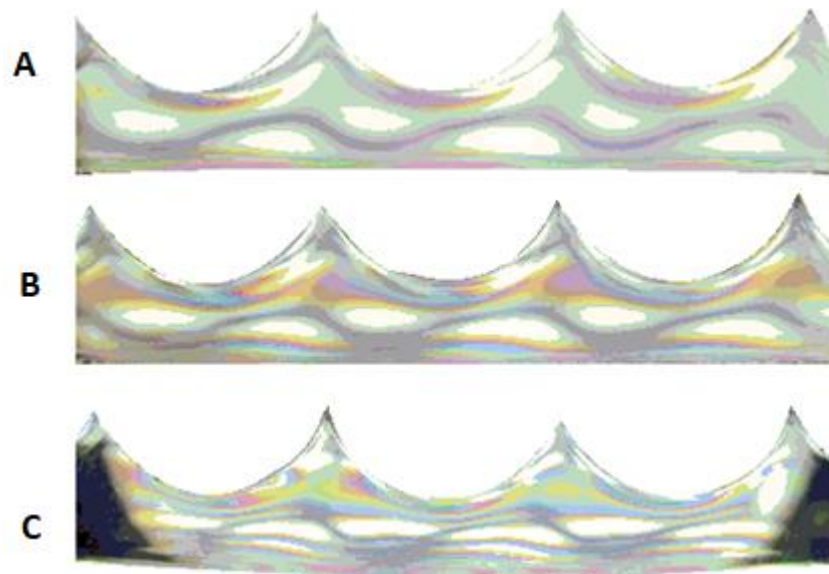
com o espectro de cores para fotoelasticidade, a região mais escura representa um nível menor de tensões, onde a cor preta representa o 0.

Ainda que não seja perceptível a olho nu a presença de pontos na cor preta, o cinza observado indica uma tendência de posicionamento de uma linha neutra em C1 para o carregamento A e B, além de várias outras linhas para o carregamento C, que podem ser interpretadas como regiões de transição de um nível de franja menor para outro maior, observação também pontuada por SCHIAVON

5.1.1 Processamento de Imagens do Ensaio 1.

Na figura 24, estão representadas as cores fotoelásticas evidenciadas após o processamento das imagens obtidas com os ensaios no corpo de prova C2 em razão dos carregamentos exercidos.

Figura 24: Processamento de imagens obtidas com o ensaio do corpo de prova C1



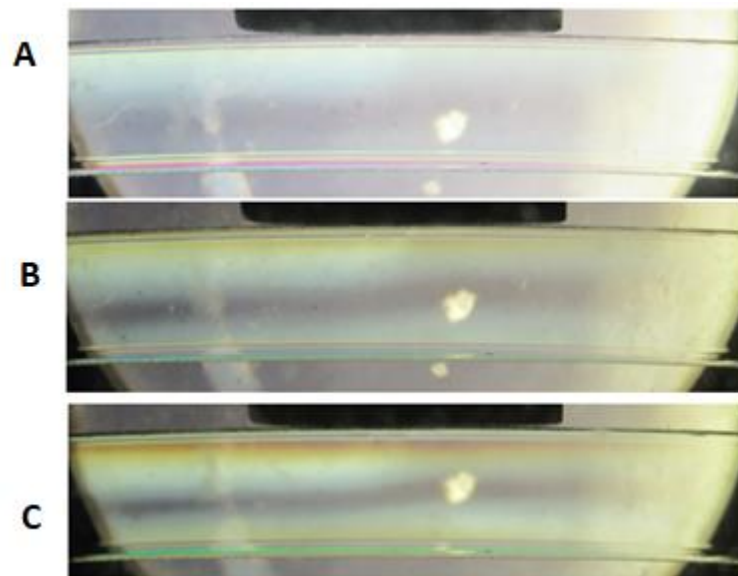
Fonte: Autor (2019)

Após o processamento das imagens, as regiões de predominância de uma cor em relação às outras de intensidade menor ficam perceptíveis pela diminuição da paleta de cores do espectro de luz visível ao olho humano. As regiões em cinza ficam ainda mais evidentes e contrastadas em relação as outras, reforçando a afirmação de que estas faixas representam a linha neutra de C1.

5.2 Ensaio de Flexão 2

A figura 25 mostra a progressão da distribuição de tensões em V2, em razão dos carregamentos A, B e C, exercidos em sua estrutura e quantificados na tabela 8.

Figura 25: Ensaio com o corpo de prova V2



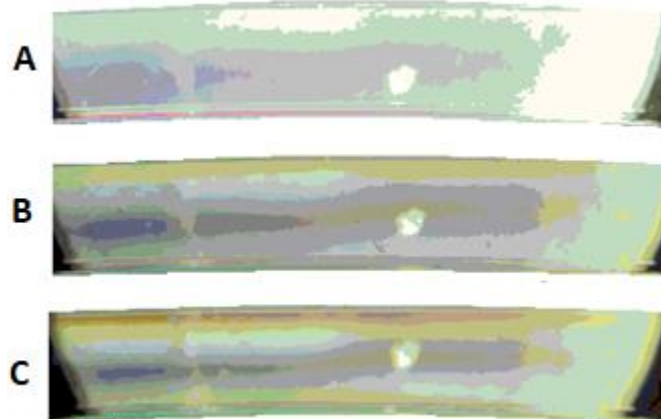
Fonte: Autor (2019)

É perceptível o realce de uma região de cor mais escura, posicionada entre as regiões onde ocorre tração (superior) e de compressão (inferior), assim especificadas por Hibbeler. Conforme os esforços são aumentados gradativamente de A até C, a intensidade da linha neutra aumenta e sua região diminui, da mesma forma que diferentes cores passam a ser percebidas na superfície de V1. Em um ponto Isotrópico, a franja é zero e tem-se $\sigma_1 = \sigma_2$. A linha neutra representa um ponto isotrópico e pode ser visualizada na região central do corpo da figura teste, onde sua cor é cinza. MARTINS (2005).

5.2.1 Processamento de imagens do ensaio de flexão 2

Na figura 26, são observadas as cores fotoelásticas evidenciadas com os ensaios em V2, após o processamento da imagem 25.

Figura 26: Processamento de imagens obtidas com o ensaio em V2



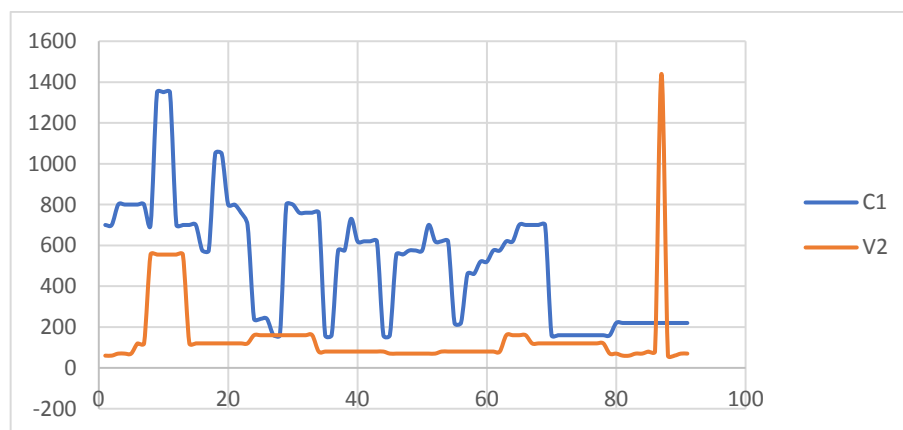
Fonte: Autor (2019)

5.3 Distribuição de tensões em C1 e V2

5.3.1 Análise na Seção 1

No gráfico 1, observa-se a distribuição de tensões nos corpos de prova C1 e V2, na seção 1 para o carregamento de 27,47N, de acordo com as análises retiradas dos anexos B e B1, correspondentes à C1, além dos anexos C e C1, referentes à V2.

Gráfico 1: Distribuição seção 1 de C1 e V2



Fonte: Autor (2019)

Os valores médios e máximos de δ retirados do gráfico 1, para os dois corpos de prova em questão, estão devidamente identificados na tabela 11.

Tabela 11: Valores médios e máximos de δ para o gráfico 1

Corpo de Prova	$\delta_{médio}$ (nm)	$\delta_{máx}$ (nm)
----------------	-----------------------	---------------------

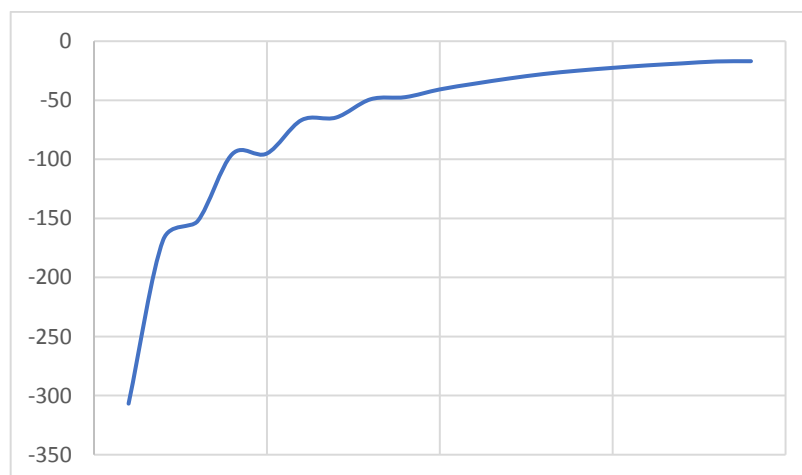
C1	372,15	1050
V2	287,96	1440

Fonte: Autor (2019)

Nota-se que, para o carregamento analisado (27,47N), C1 apresenta um valor médio de δ maior do que o valor médio de δ em V2. De acordo com a relação de proporcionalidade entre δ e o aumento da tensão, mostrada na figura 2, segundo ASSIS et al, e confirmada na tabela 1, por FERREIRA & BERMUDEZ, pode se afirmar a tensão média na seção 1 de C1 é 29,23% maior do que em V2.

Ao analisar os dados de saídas retornados pela simulação de VILAS BOAS, foi verificado que a relação entre os pontos e suas respectivas tensões (gráfico x) não seguem o mesmo padrão evidenciado na análise da distribuição de tensões por meio das cores evidenciadas pelas franjas. Isso pode ser explicado pelo fato do corpo de prova simulado em software não sofrer as deformações que C1 sofre, além de não possuir os mesmos defeitos e tensões residuais que C1 evidencia na análise fotoelástica. Além disso, todas as tensões na seção 2 foram indicadas como compressivas de acordo com os dados de saída gerados pelo software.

Gráfico x: Tensão x Deslocamento ao longo da seção 1

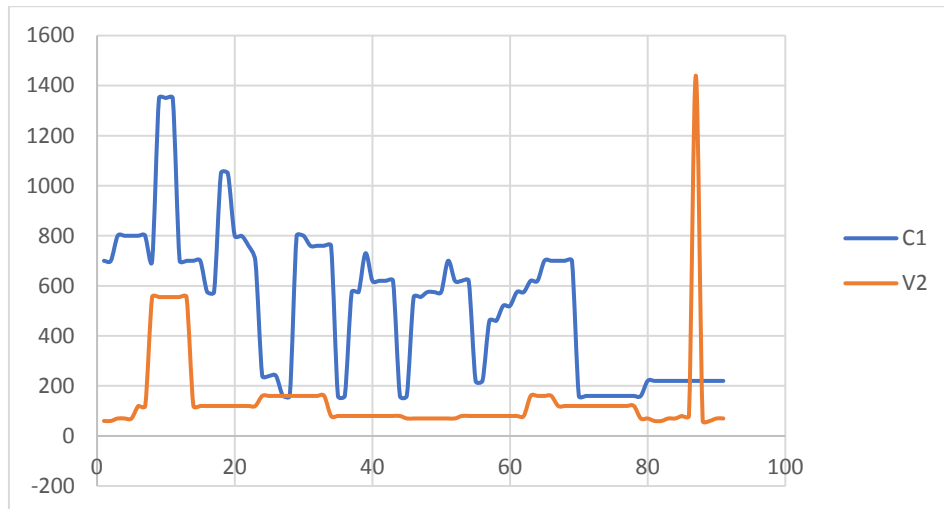


Fonte: Autor (2019)

5.3.2 Análise na Seção 2

No gráfico 2, é mostrada a distribuição de tensões para o carregamento de 27,47N em C1 e V2, na seção 2, de acordo com os anexos B e B1, correspondentes à C1, além dos anexos C e C1, referentes à V2.

Gráfico 2: Distribuição de tensões seção 2 de C1 e V2



Fonte: Autor (2019)

Os valores médios e máximos de δ retirados do gráfico 2, para os dois corpos de prova em questão, podem ser visualizados na tabela 12.

Tabela 12: Valores médios e máximos de δ para o gráfico 2

Corpo de Prova	$\delta_{médio}$ (nm)	$\delta_{máx}$ (nm)
C1	525,99	1350
V2	145,93	1440

Fonte: Autor (2019).

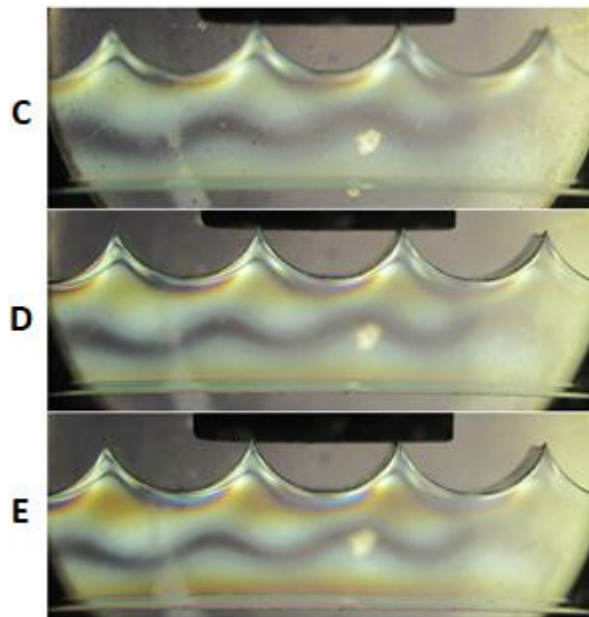
De forma análoga a análise da seção 1, observa-se que, para o carregamento analisado, em C1 o $\delta_{médio}$ é maior do que o $\delta_{médio}$ em V2. Consequentemente, pode-se afirmar que a tensão média na seção 2 de C1 é 260,44% maior do que em V2.

Na seção 2, não foi possível analisar o comportamento das tensões utilizando o método de VILAS BOAS, devido a dificuldade de mapear os pontos no centro do elemento de simulação no software disponibilizado

5.4 Ensaio de Flexão 3

A figura 27 mostra a progressão distribuição de tensões através das franjas isocromáticas no corpo de prova C2 sobre a ação dos carregamentos indicados na tabela 9.

Figura 27: Ensaio com o corpo de prova C2

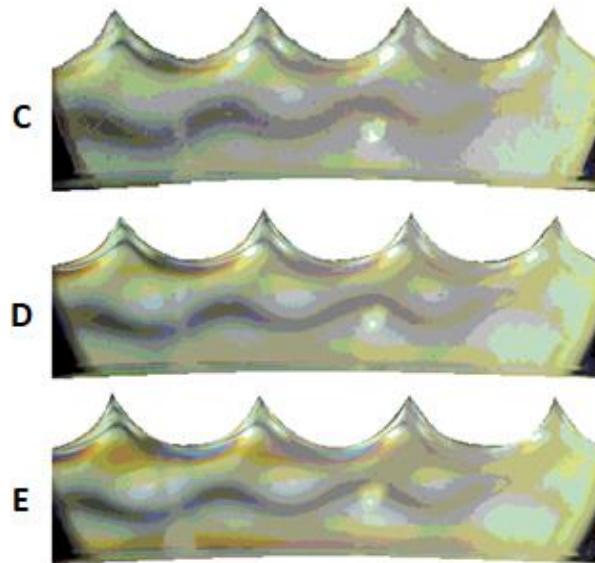


Fonte: Autor (2019)

5.4.1 Processamento de imagens do ensaio 3

Na figura 28, são observadas as franjas isocromáticas após o processamento da imagem 27, evidenciadas com os ensaios em C2.

Figura 28: Processamento de imagens obtidas com o ensaio do corpo de prova C2

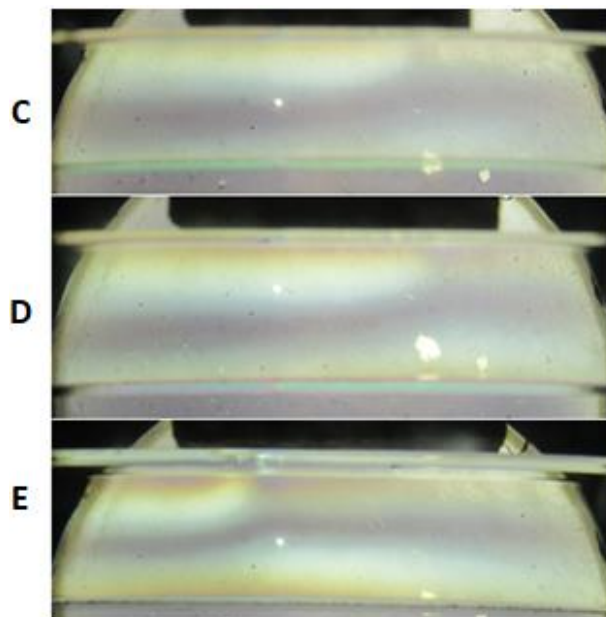


Fonte: Autor (2019)

5.5 Ensaio de Flexão 4

A figuras 29 ilustra a progressão do corpo de prova V1 sobre a ação de carregamentos C, D e E, cujos valores estão indicados na tabela 10.

Figura 29: Ensaio com o V1

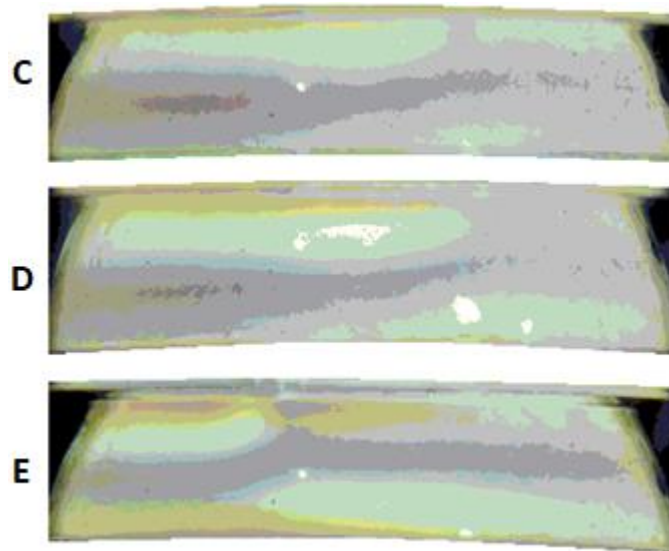


Fonte: Autor (2019)

5.5.1 Processamento de Imagens do Ensaio 4

Na figura 30, são observadas as franjas isocromáticas após o processamento da imagem 29, evidenciadas com os ensaios em V1.

Figura 30: Processamento de imagens obtidas com o ensaio em V1



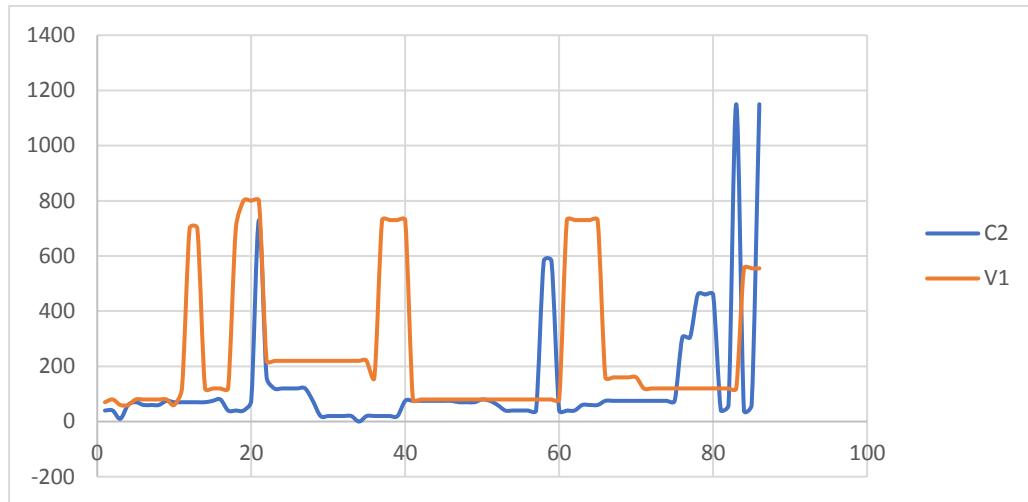
Fonte: Autor (2019)

5.6 Distribuição de tensões em C2 e V1

5.6.1 Análise na Seção 1

No gráfico 3, é mostrada a distribuição de tensões para o carregamento de 44,42N nos corpos de prova C2 e V1, na seção 1, de acordo com os anexos D e D1, correspondentes à C2, além dos anexos E e E1, referentes à V1.

Gráfico 3: Distribuição de tensões seção 1 de C2 e V1.



Fonte: Autor (2019)

Os valores médios e máximos de δ retirados do gráfico 3, para os dois corpos de prova em questão, podem ser visualizados na tabela 13.

Tabela 13: Valores médios e máximos de δ para o gráfico 3

Corpo de Prova	$\delta_{m\u00e9dio}$ (nm)	$\delta_{m\u00e1x}$ (nm)
C2	124,53	1150
V1	246,95	800

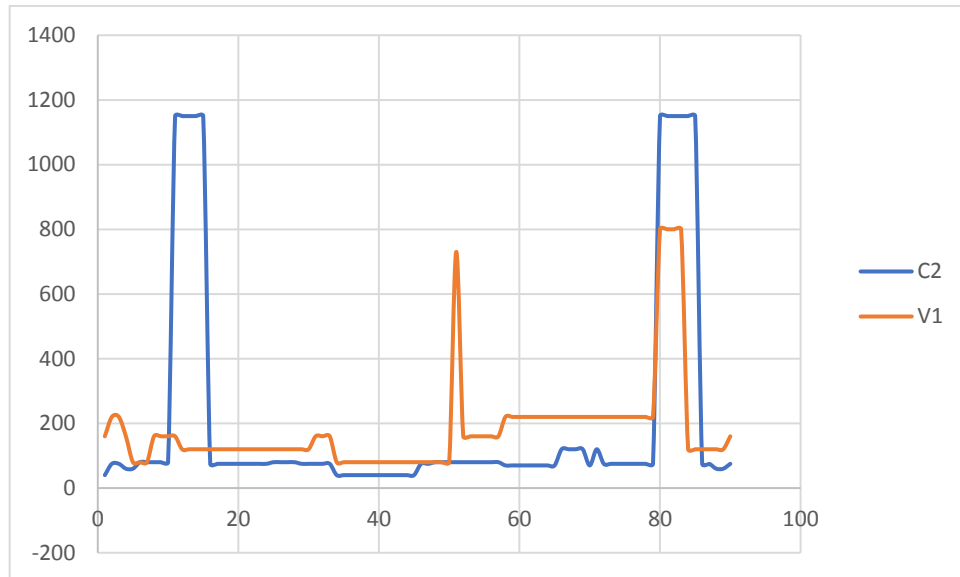
Fonte: Autor (2019)

Nota-se que, para o carregamento de 44,42N, C2 apresenta um valor médio de δ 98,30% menor do que o valor médio de δ em V1. De acordo com a relação de proporcionalidade entre δ e o aumento da tensão, mostrada na figura 2 por ASSIS et al, e na tabela 1, por FERREIRA E BERMUDES, pode se afirmar que a tensão média em V1 é maior do que em C2 na seção 1.

5.6.2 Análise da seção 2

No gráfico 4, é mostrada a distribuição de tensões para o carregamento de 44,42N nos corpos de prova C2 e V1, na seção 2, de acordo com os anexos D e D1, correspondentes à C2, além dos anexos E e E1, referentes à V1.

Gráfico 4: Distribuição de tensões seção 2 de C2 e V1.



Fonte: Autor (2019)

Os valores médios e máximos de δ retirados do gráfico 4, para os dois corpos de prova em questão, estão distinguidos na tabela 14.

Tabela 14: Valores médios e máximos de δ para o gráfico 4.

Corpo de Prova	$\delta_{médio}$ (nm)	$\delta_{máx}$ (nm)
C2	203,72	1150
V1	181,89	800

Fonte: Autor (2019)

De forma análoga a análise da seção 1, observa-se que, para o carregamento de 44,42N, em C2 o $\delta_{médio}$ é maior do que o $\delta_{médio}$ em V1. Conseqüentemente, pode-se afirmar que a tensão média na seção 2 de C1 é 10,71% maior do que em V2.

6 Conclusões

A partir dos objetivos gerais e específicos apresentados no capítulo 2 do presente trabalho, conclui-se que todos estes foram alcançados de acordo com as etapas descritas ao longo do texto.

Um polariscópio plano de transmissão foi construído para viabilizar a análise de franjas isoclínicas em corpos de prova, fabricados com material birrefringente, e ensaiados com a intenção de parametrizar as tensões atuantes.

A partir dessas etapas, foi possível entender que C1 apresentou, para uma carga de 27,47N, uma distribuição de tensões de uma ordem de 29,23% maior do que V2 na seção 1 e 260,44% maior do que V2 na seção 2. Estes resultados comprovam ineficácia de C1 quando se comparada a V2 quando o parâmetro de comparação em questão é a área de seção transversal dos dois corpos de prova, que possuem valores iguais.

Porém, quando comparados os corpos de prova C2 e V1, os quais possuem as mesmas áreas de superfície, mostradas na figura 13 do capítulo 4, notou-se que, na seção 1, região onde C2 apresenta maior área de seção transversal, a distribuição de tensões em C2 se apresenta 98,30% menor do que no mesmo trecho de V1.

Enquanto que na seção 2, onde a área de seção transversal de C2 é menor do que a de V1, a distribuição de tensões em C2 se mostra apenas 10,71% maior do que a de V1.

Ou seja, se por um lado, na seção 2, C2 concentra um maior número de tensões de baixas proporções, por outro lado, na seção 1, há uma diminuição de 98,30% em relação às tensões que atuam em V1.

É perceptível que na seção 2, há uma região concentradora de tensões, que pode ser prejudicial à estrutura de um vaso de pressão, por exemplo, entretanto, este fator de pequena proporção (se comparado ao ganho em resistência na seção 1), pode ser contornado com tratamentos térmicos localizados, com o objetivo de controlar estes pontos críticos de tensão no projeto.

7 Referências

ALCÂNTARA, Ronan Machado, **Estudo da distribuição das tensões provenientes de molas helicoidais utilizadas na verticalização de molares pelo método da Fotoelasticidade de Transmissão Plana**, 2006.

ARAÚJO, C. A.; NEVES, F. D.; BERNARDES, S. R. **Análise de tensões em implantes dentários utilizando a técnica fotoelástica**. In: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 3, Belém, Brasil. 2004, 13 p.

ASME, **Rules for Construction of Pressure Vessels**, 2002 Addenda ed., vol. Section VIII. Division 1, New York: ASME Boiler and Pressure Vessel Committee, 2002.

ASSIS, Altair de. et Al. **Uma História de Inovação Tecnológica no Espectro da Luz**. Publicação Research Gate, 2013.

Bold – **Propriedades mecânicas da chapa de acrílico fundido** – Disponível em: <<https://www.bold.ind.br/chapa-de-acrilico/>> Acesso: 15 de dezembro de 2018.

BOWDEN, P.B., In: **The Physics of Glassy Polymers**, Ed. By R. N. Haward, Applied Science Publishers, Ltd, London, (1973), 279 p.

BOWDEN, P.B., In: **A Criterion for Inhomogeneous Plastic Deformation**, Philosophical Magazine, 1478-6443, 22, Issue 177, (1970), 455-462 p.

Canon – **Principais características Canon PowerShot SX520**; Disponível em: <<https://www.canon.com.br/produtos/produtos-para-voce/cameras/linha-powershot/serie-sx/powershot-sx520-hs>> Acesso: 10 de dezembro de 2018.

CARVALHO, Nestor Ferreira de, **Apostila do Curso de Inspeção e Manutenção em Vasos de Pressão**, Universidade Petrobrás, 2008.

CHOUSAL, José A. G. **Processamento de Imagem na Interpretação de Franjas Interferométricas em Análise Experimental de Tensões**. Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto – 1991.

DONATO, G.V.P, **Integridade de equipamentos e critérios de aceitação**, 3 INSPEQ – Encontro de inspeção de equipamentos, 2007.

Experiências da Física – Holografia Interferométrica. Disponível em: <<http://fisrede.ua.pt/page.asp?id=2958>> Acesso: 04 de fevereiro.

FALCÃO, CARLOS. **Apostila de projeto mecânico de vasos de pressão e trocadores de calor casco e tubos**, 2002.

FATEC SP – Materiais para Construção Civil III – Apostila

FERREIRA A. L. S & BERMUDEZ R. L. Projeto de Graduação. **Análise fotoelástica: construção e utilização de um polariscópio plano de transmissão**. Universidade Federal do Espírito Santo – UFES. Vitória – ES, 2004.

FHAIZER ; **Tanques Industriais**. Disponível em: <<http://tanquesindustriais.com/vasos-de-pressao/>> Acesso: 14 de dezembro de 2018

FRANKOVSKÝ, P.; Ostertag, O.; Ostertagová, E. **Automation of Experiments in Photoelasticity**. Procedia Engineering, v. 48, p.153-157, 2012.

HENDRY, A. W. **Photoelastic Analysis**. 1a Ed. London: Pergamon Press Ltd. 1966. 155 p.

HERTZ H. et al. **Desenvolvimento da técnica de Moiré de sombra como alternativa de baixo custo para análise postural**. Artigo Científico. Scientia Medica, Porto Alegre: PUCRS, v. 15, n. 4, out./dez. 2005

IECKER, Thyago. **Análise de Tensões em Vasos de Pressão através do Método de Elementos Finitos**. Trabalho de Conclusão de Curso. Centro Federal De Educação Tecnológica Celso Suckow Da Fonseca – CEFET/RJ. 2004

IRWIN, G. R., **Structural Aspects of Brittle Fracture**, Appl. Mater Res., 3, nº 2, (1964). 65-81 p.

SOUZA, Joelmir Mariano de., **Estudo do Ensaio de Determinação da Tenacidade à Fratura em Deformação Plana (K_{IC}) em PMMA e Análise das Tensões Desenvolvidas por Fotoelasticidade**. Tese de Doutorado em Engenharia – USP - São Paulo – 2011

MARTINS, Filipe. **Análise da possibilidade de crescimento subcrítico de descontinuidades durante a realização de testes hidrostáticos em vasos de pressão e seus possíveis efeitos**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRS. Dissertação de Mestrado, 2009.

MARTINS, Geraldo de P. **Fotoelasticidade – Primeiros passos**. Publicação CTD-944/2005. Belo Horizonte, 2005.

MEASUREMENT GROUP, INC. Introduction to stress analysis by photostress method. **Tech Note** TN-702, Raleigh, USA, 12 p. 1981.

MIRIM, Denilson de Carvalho, et al. **Estudo da tensão residual na soldagem laser entre o aço carbono AISI 1010 e o aço inoxidável AISI 304**; Congresso brasileiro de engenharia de fabricação.

NICOLA, Marcelo Dalvi, VIEIRA, Marcos Fernando N. **Projeto Mecânico e Construção de Vaso de Pressão: Estudo do Caso Serviço com Sulfeto de Hidrogênio.**, Universidade Federal do Espírito Santo, Trabalho de Conclusão de Curso, 2012

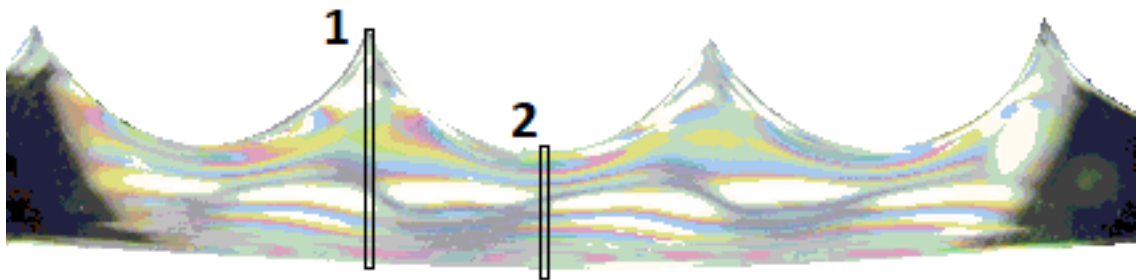
PEREIRA, Jorge. **Análise de efeitos de teste hidrostático em vaso de pressão**. Dissertação de Mestrado. Universidade federal de santa catarina - Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica, 2004.

SCHIAVON, José Antônio. **Aplicação da técnica da fotoelasticidade na análise de fundações por estacas helicoidais**. Universidade de São Paulo – USP, 2010

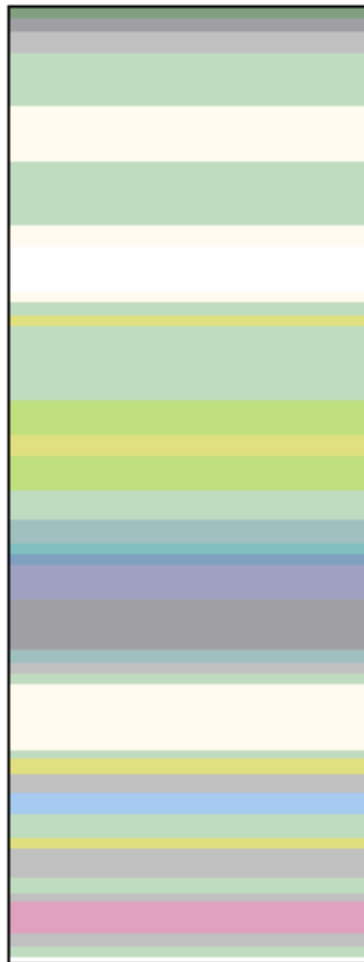
SPINELLI, H. A., **Aplicação da Fotoelasticidade na Análise Estrutural de uma Junta Rebitada de Uso Aeronáutico**; FEG, UNESP.

TELLES, Pedro Carlos da Silva; **Vasos de Pressão**, 2^a ed. Rio de Janeiro, LTC, 2001.

Anexo B



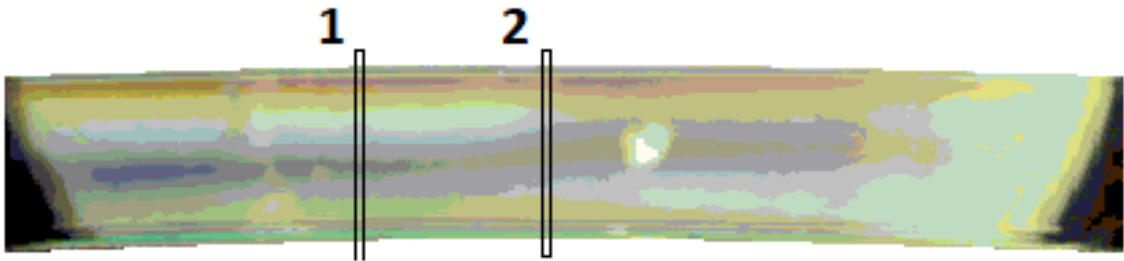
Seção 1



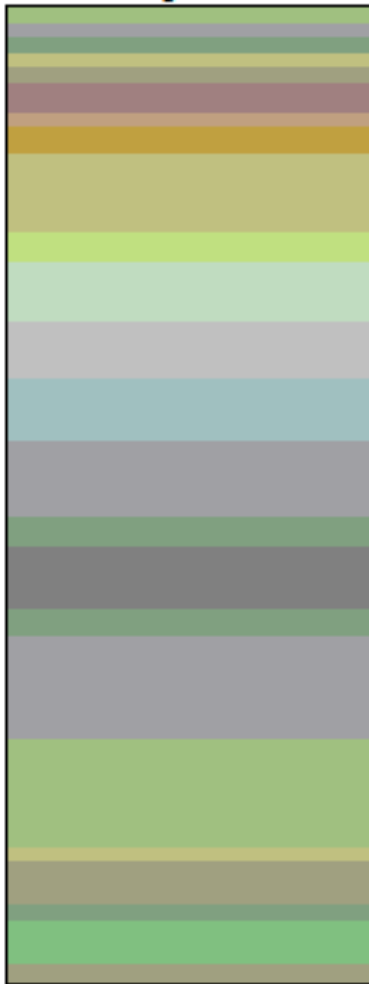
Seção 2



Anexo C



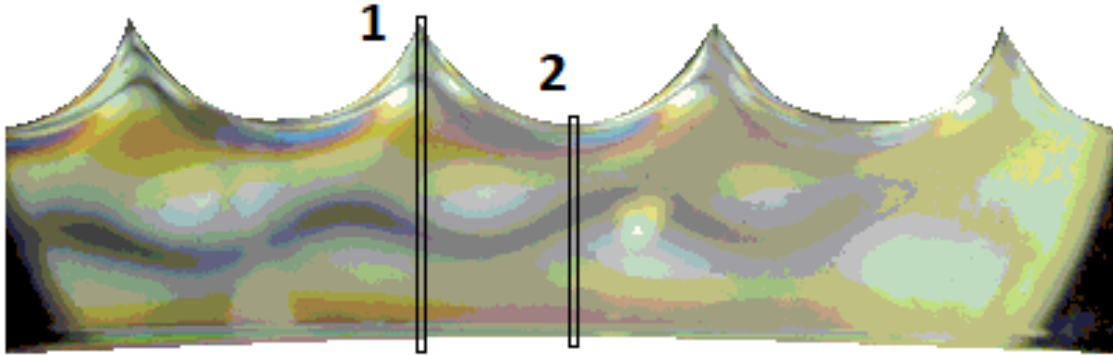
Seção 1



Seção 2



Anexo D



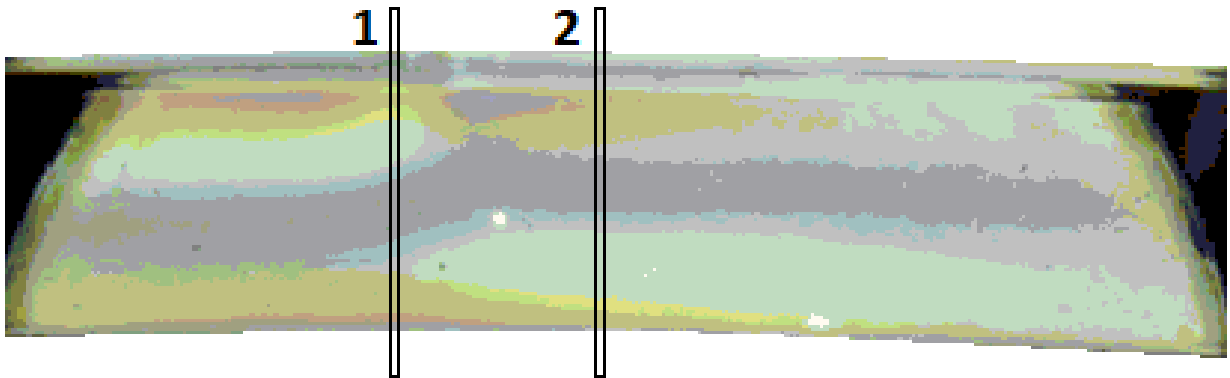
Seção 1



Seção 2



Anexo E



Seção 1



Seção 2



8 Apêndice 1

8.1 Projetos de vasos de pressão

Existem órgãos que regulamentam e fiscalizam critérios dimensionais necessários ao projeto, materiais utilizados na fabricação e requisitos de teste e inspeção em vasos de pressão, a fim de controlar as tensões máximas admissíveis em pontos críticos do recipiente. (FALCÃO, 2002).

Com o avanço na teoria, conceitos e nos métodos de análises de projetos, foi possível inserir uma nova abordagem, visto que a necessidade de suportar tensões mais elevadas passou a ser mais presente. Esta abordagem envolvendo cálculos no projeto de vasos de pressão de geometrias não convencionais, se baseia no dimensionamento dependente da análise e classificação das tensões no vaso, comparadas aos valores admissíveis (FALCÃO, 2002).

Os vasos de pressão estão sujeitos a elevados níveis de tensões, portanto é indispensável que os valores de tensões admissíveis sejam menores do que os valores correspondentes ao limite de resistência e limite de escoamento do material em nas faixas de temperaturas específicas de operação do sistema (TELLES, 1996).

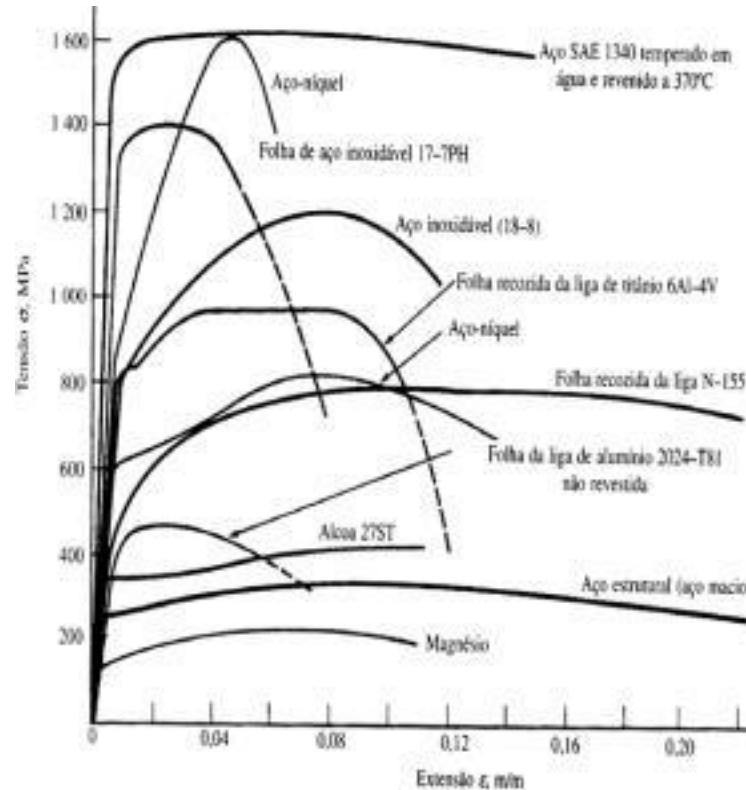
No Brasil, o código mais popular dentre os projetos de engenharia na área de dimensionamento de vasos de pressão, é o ASME, pois a confiabilidade de seus dados é reconhecida, além dos coeficientes de segurança serem elevados. A divisão da estrutura do código aborda etapas que vão desde o dimensionamento, além da fabricação, materiais utilizados, instalação, inspeção, incluindo testes, dentre outros itens (MARTINS, 2009).

8.1.1 Seleção e Especificação de Materiais para o Vaso de Pressão

Ao projetar este componente, o responsável deve estar ciente da importância da seleção do material e suas tensões limites de escoamento, levando-se em considerações diversos aspectos, como o fluido que está contido no vaso, existência ou não de gases dissolvidos e de sólidos em suspensão, temperatura, pH, caráter oxidante ou redutor, inflamabilidade, ponto de fulgor, toxidez, explosividade e entre

outras propriedades do fluido armazenado (TELLES, 1996). Na figura 31 é possível observar a curva de tensão x deformação de alguns materiais.

Figura 31: Curva Tensão x Deformação para materiais metálicos



Fonte: FATEC – SP

O aço carbono é, de longe, o material mais utilizado no projeto de vasos de pressão, por se tratar de um material de baixo custo em relação aos outros e que consegue fornecer uma boa resistência mecânica ao componente, além de possuir boa conformabilidade e boa soldabilidade. Onde não se tem restrição do seu uso, como por exemplo a interação química com o fluido armazenado, é possível utilizar o aço carbono graças a relação de custo benefício para o projeto (TELLES, 1996).

Os aços de baixo carbono (até 0,25%) chegam a resistir a tensões da ordem de 310 a 370 MPa (31 a 37 kgf/mm²) e limite de escoamento entre 150 e 220 MPa (15 a 22 kgf/mm²). Em aços de médio carbono, estes valores são entre 370 e 540 MPa e 220 enquanto que os limites de escoamento estão entre 220 e 280 MPa. Para temperaturas superiores a 370°C, esses valores decaem em detrimento do fenômeno de fluência no material (TELLES, 1996).

9 Apêndice 2

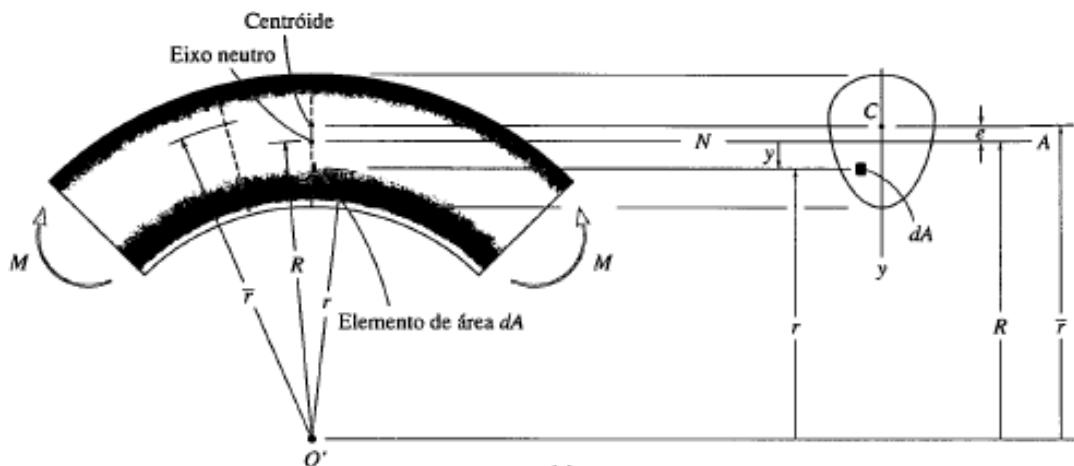
9.1 Deformações na parede de um Vaso de Pressão

A partir da figura 32, são considerados 3 raios que partem do centro de curvatura O' do elemento, onde:

- \bar{r} indica a localização conhecida do centróide da área da seção transversal
- R indica a localização ainda não especificada do eixo neutro
- r indica o ponto arbitrário ou elemento de área dA na seção transversal.

Observe que o eixo neutro se localiza no interior da seção transversal, uma vez que o momento M gera uma região de compressão na superfície superior e tensão na região inferior do corpo. Por definição, o eixo neutro constitui uma reta de tensão e deformação nulas.

Figura 32: Elemento curvo



Fonte: HIBBELER (2005)

Ao isolar um elemento infinitesimal da parede da figura x, a tensão fará com que o material se deforme até que sua seção transversal rotacione numa proporção de $\delta\theta/2$. A deformação ϵ na tira arbitrária do material, localizada em r , será então determinada. O comprimento inicial desta tira é dado por $rd\theta$, de acordo com a figura y. Ao ser rotacionado, haverá uma mudança no seu comprimento de proporção dada por $\delta\theta(R - r)$. Portanto, ϵ pode ser calculado pela equação x.

$$\epsilon = \frac{\delta\theta(R-r)}{rd\theta}$$

Fazendo $\delta\theta/d\theta$, cujo valor é constante para qualquer elemento, temos:

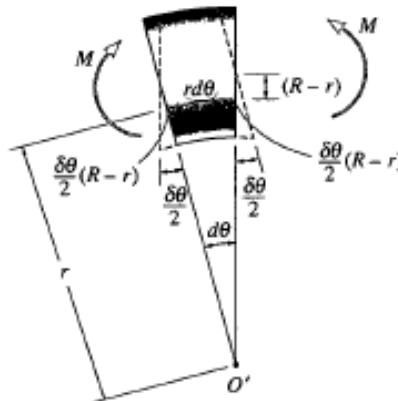
$$\epsilon = \frac{k(R-r)}{r} (y)$$

A partir da equação y , é possível observar que a deformação normal é uma função não-linear de r e sua variação ocorre de maneira hiperbólica, ainda que sua seção transversal permaneça plana após a deformação. O momento faz com que o material se comporte de forma elástica, permitindo assim a aplicação da lei de Hooke, onde a equação (y) pode ser adaptada para a (z) .

$$\sigma = Ek \left(\frac{R-r}{r} \right) (z)$$

O perfil desta variação é de também de caráter hiperbólico e a partir da equação (z) , é possível determinar a localização do eixo neutro e relacionar a distribuição de tensão ao momento interno resultante M .

Figura 33: Representação do elemento infinitesimal de parede



Fonte: HIBBELER (2005)

Para determinar o eixo neutro, é preciso que a força interna resultante ocasionada pela distribuição de tensão na seção transversal do corpo seja nula, ou seja:

$$\int_A \sigma dA = 0$$

$$\int_A Ek \left(\frac{R-r}{r} \right) = 0 \quad (k)$$

E_k e r são constantes, logo:

$$R = \frac{A}{\int_A \frac{dA}{r}} (w)$$

Onde:

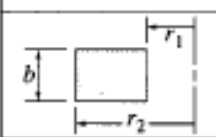
R = Localização do eixo neutro, especificada a partir do centro de curvatura O' do elemento

A = Área da seção transversal do elemento

r = posição arbitrária do elemento de área dA na seção transversal, especificada a partir do centro de curvatura O' do elemento

Em seções transversais com formatos retangulares, a solução da integral da equação (w) pode ser representada de acordo com a figura 32

Figura 34: Solução da integral para uma geometria de seção transversal retangular

Forma	Área	$\int_A \frac{dA}{r}$
	$b(r_2 - r_1)$	$b \ln \frac{r_2}{r_1}$

Fonte: HIBBELER (2005 - Modificado)

Para relacionar a distribuição de tensão com o momento fletor resultante, é necessário que momento interno resultante tenha valor igual ao momento da distribuição de tensão calculado em torno do eixo neutro (HIBBELER, 2005).

A tensão σ exercida no elemento de área dA , está posicionado a uma distância y do eixo neutro, como mostrado na figura x1. Esta tensão, cria uma força $dF = \sigma dA$ no elemento e um momento em torno do eixo neutro $dM = y(\sigma dA)$, cujo valor é positivo de acordo com a regra da mão direita (HIBBELER, 2005). Para toda a seção transversal, temos:

$$M = \int y \sigma dA$$

Como $y = R - r$, e σ é definido pela equação (k), temos

$$M = \int_A (R - r)Ek \left(\frac{R - r}{r} \right) dA$$

Expandindo e lembrando que Ek e R são constantes, temos:

$$M = Ek \left(R^2 \int_A \frac{dA}{r} - 2R \int_A dA + \int_A r dA \right) \quad (L)$$

Pela equação (w), é possível afirmar que a primeira integral equivale a A/R . Como a área é constante, a segunda integral se resume a área da seção transversal A . A localização do centroide na seção transversal é dada por $\bar{r} = \int r dA/A$, logo, a terceira integral pode ser representada por $\bar{r}A$. Desta forma, a equação (L) pode ser reescrita como:

$$M = EkA(\bar{r} - R) \quad (j)$$

Substituindo Ek e colocando a equação (j) em termos da equação (z):

$$\sigma = \frac{M(R-r)}{Ar(\bar{r}-R)} \quad (m)$$

Onde:

σ = tensão normal no elemento

M = momento interno determinado pelo método das seções e pelas equações de equilíbrio e calculado em torno do eixo neutro da seção transversal. Seu valor é positivo e, quando aplicado, aumenta o raio de curvatura da parede.

A = área da seção transversal do elemento

R = distância entre o centro de curvatura e o eixo neutro, dado pela equação (w)

\bar{r} = distância entre o centro de curvatura e o centroide da área da seção transversal

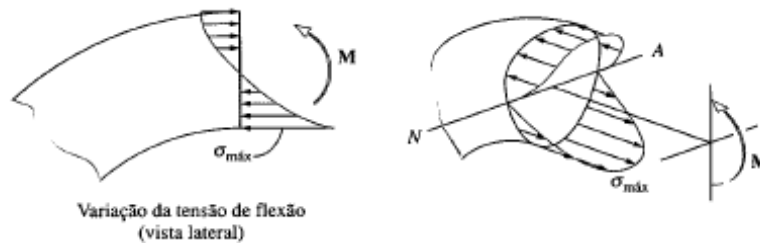
r = distância entre o centro de curvatura e o ponto onde a tensão σ deve ser determinada

Segundo a figura x1, $y = R - r$ ou $r = R - y$. Além disso, a distância constante é muito pequena $e = \bar{r} - R$. Ao substituir estes valores na equação (m), esta poderá ser reescrita como:

$$\sigma = \frac{My}{Ae(R-y)} \quad (g)$$

As equações (m) e (g) são representações distintas da fórmula da viga curva, que pode ser usada para determinar a distribuição de tensão normal em um elemento curvo (HIBBELER, 2005). Sua distribuição hiperbólica pode ser visualizada na figura 33

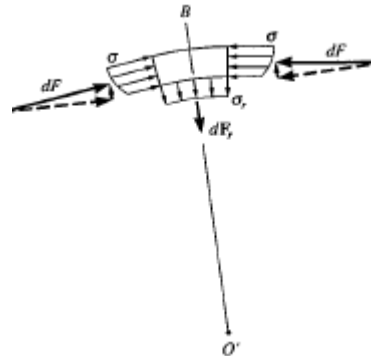
Figura 35: Variação da tensão de flexão. Vista lateral (esquerda) e perspectiva isométrica (direita)



Fonte: HIBBELER (2005).

A tensão circunferencial que atua no sentido da circunferência da parede, produz uma componente de tensão no sentido radial. A partir do diagrama de corpo livre ilustrado na figura c, onde é representado um segmento superior do elemento infinitesimal da figura 34.

Figura 36: Projeção da tensão radial proveniente da tensão circunferencial



Fonte: HIBBELER (2005).

Geralmente, a fórmula da viga curva é utilizada quando a curvatura do elemento é muito acentuada, como em ganchos e anéis, onde o raio de curvatura é menor do que cinco vezes a largura da viga.

A deformação normal na viga não varia de forma linear devido a sua curvatura, logo, o eixo neutro não passa pelo centroide da seção transversal. Além disso, o

componente radial da tensão é desprezado quando a seção transversal em questão é maciça (HIBBELER, 2005).

10 Apêndice 3

10.1 Ensaio com C2

Figura 37: C1 sem apoio

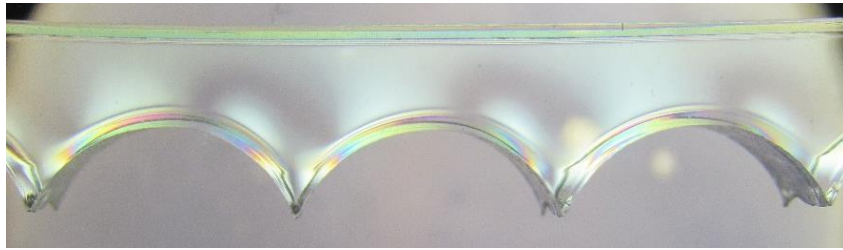


Figura 38: C1 com peso do apoio somente.



Figura 39: C1 com bloco A

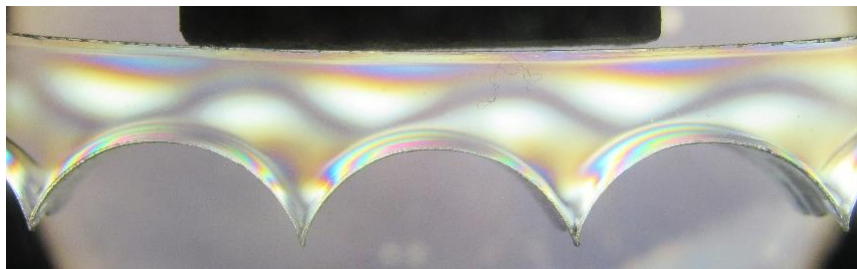


Figura 40: C1 com bloco A+B

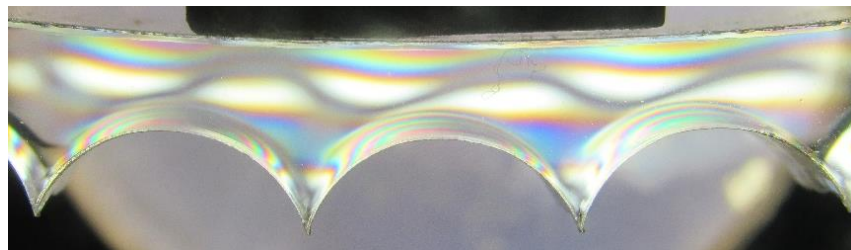


Figura 41: C1 com bloco A+B+C

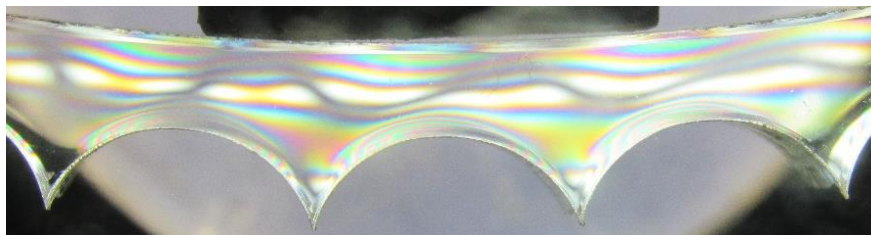


Figura 42: C1 sem apoio

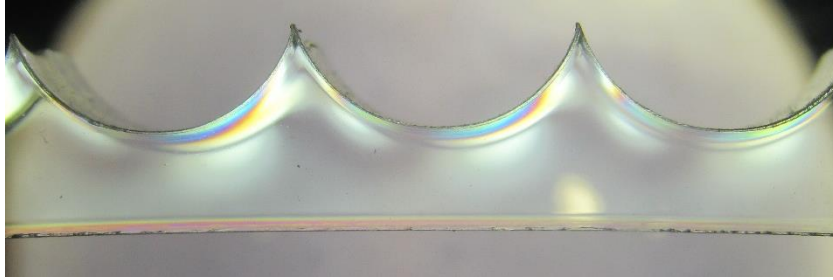


Figura 43: C1 somente com apoio

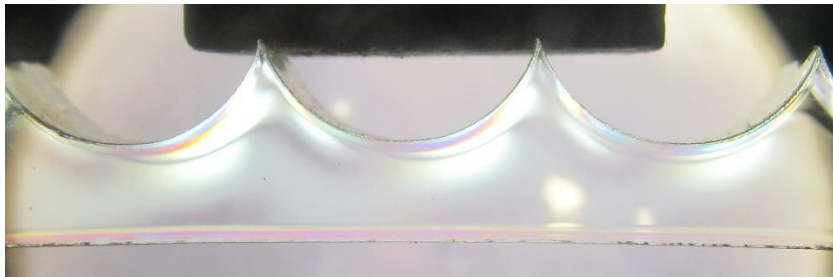


Figura 44: C1 com bloco A

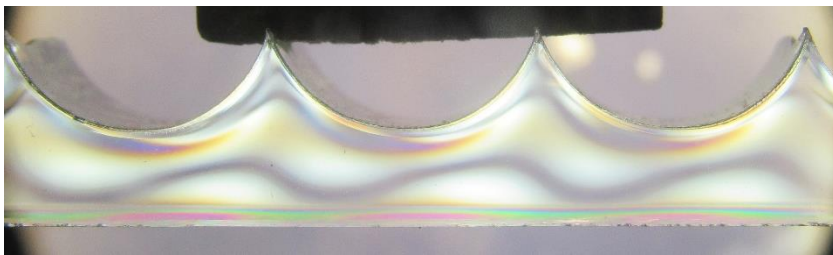


Figura 45: C1 com blocos A+B

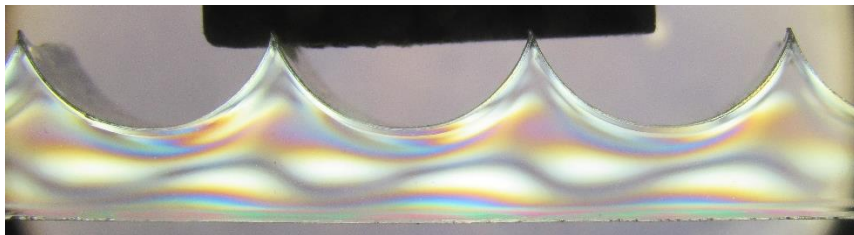
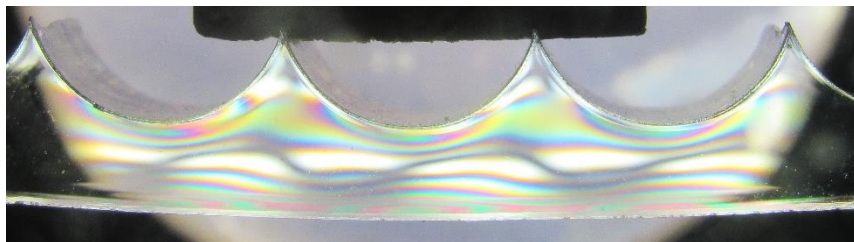


Figura 46: C1 com blocos A+B+C



10.2 Ensaio com V2

Figura 47: C2 sem apoio

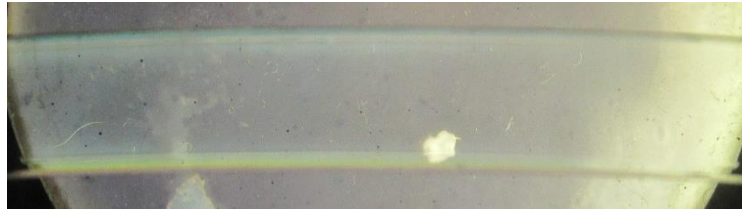


Figura 48: C2 somente com apoio

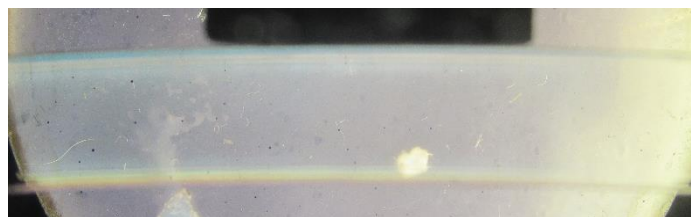


Figura 49: C2 com apoio + peso A

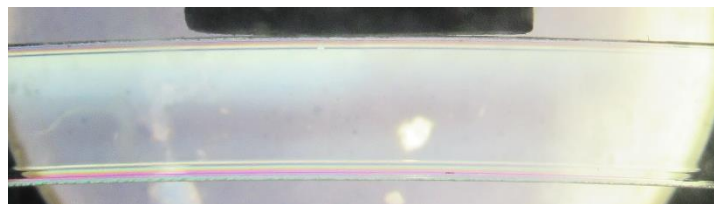


Figura 50: C2 com apoio + peso A + B

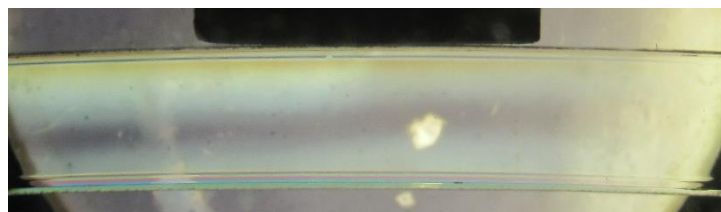


Figura 51: C2 com apoio + peso A + B + C

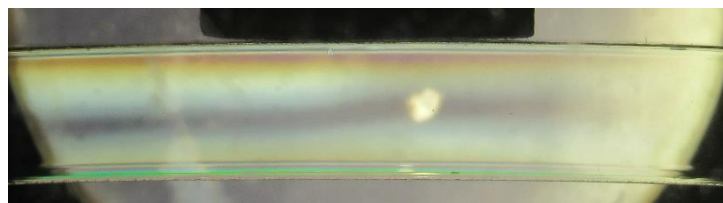


Figura 52: C2 com apoio + peso A + B + C + D

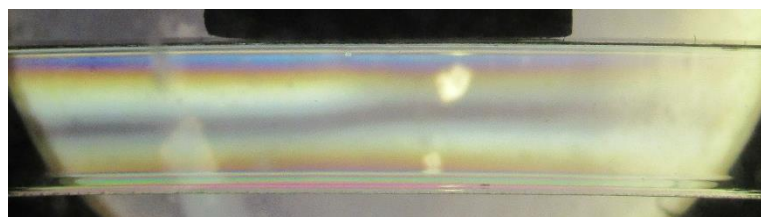


Figura 53: C2 com apoio + peso A + B + C + D + E

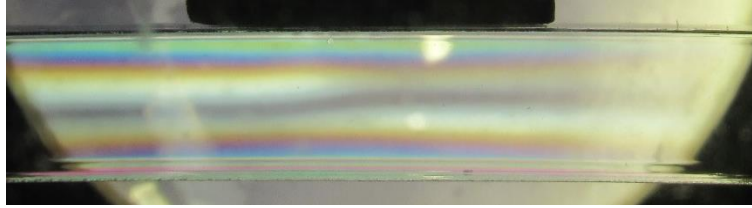


Figura 54: C2 sem apoio (invertido)

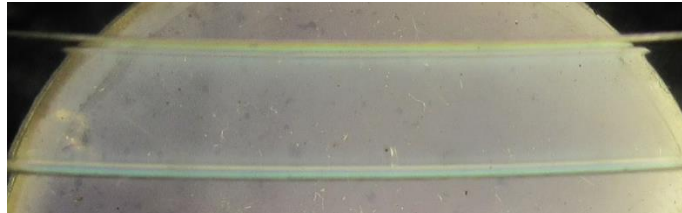


Figura 55: C2 somente com apoio (invertido)

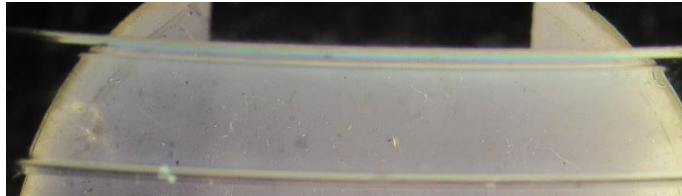


Figura 56: C2 com apoio + peso A (invertido)

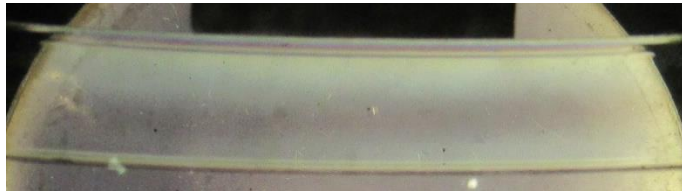


Figura 57: C2 com apoio + peso A + B (invertido)

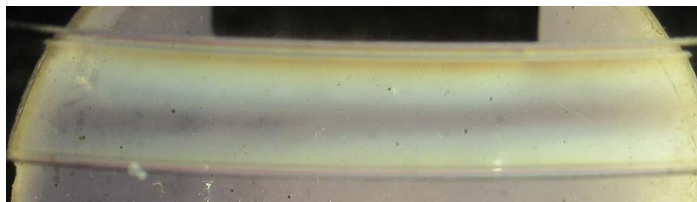


Figura 58: C2 com apoio + peso A + B + C (invertido)

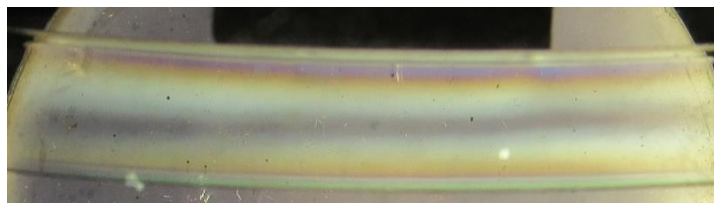


Figura 59: C2 com apoio + peso A + B + C + D (invertido)

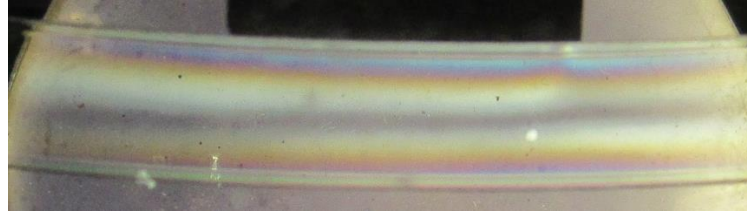
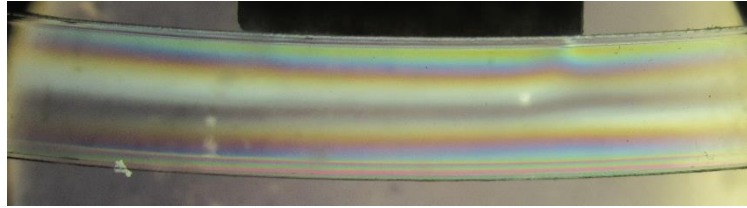


Figura 60: C2 com apoio + peso A + B + C + D + E (invertido)



10.3 Ensaio com C2

Figura 61: C2 sem apoio (invertido)

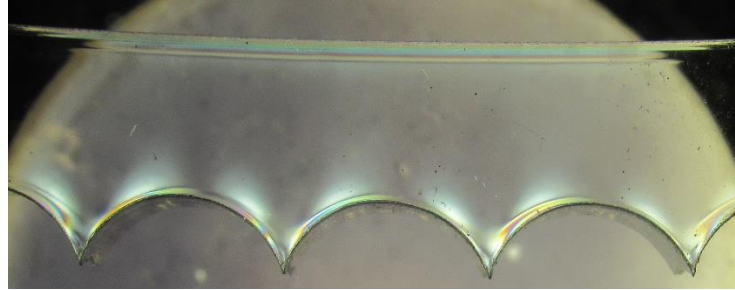


Figura 62: C2 somente com apoio (invertido)

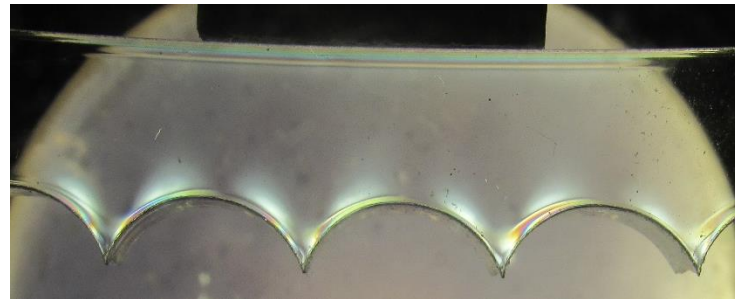


Figura 63: C2 com apoio + peso A (invertido)

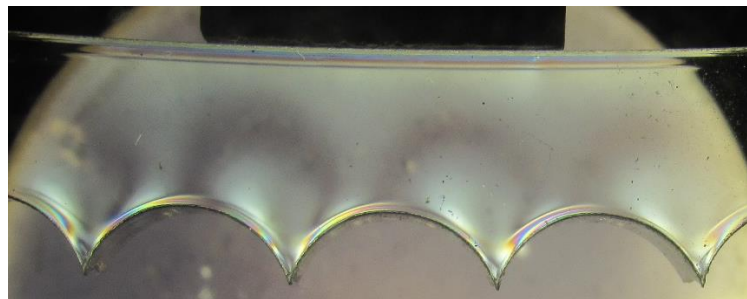


Figura 64: C2 com apoio + peso A + B (invertido)

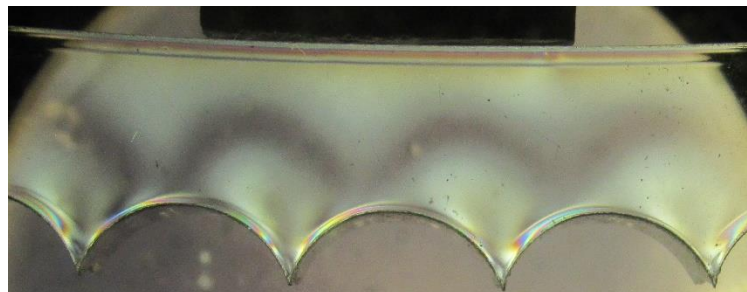


Figura 65: C2 com apoio + peso A + B + C (invertido)

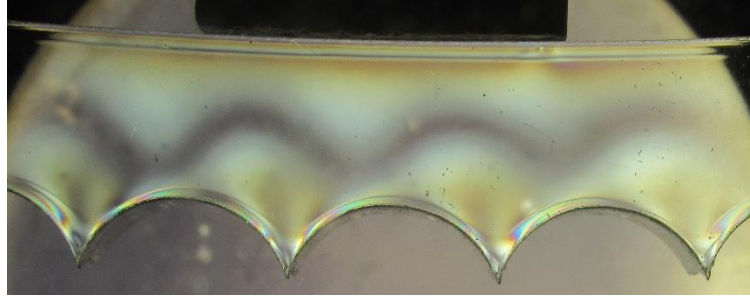


Figura 66: C2 com apoio + peso A + B + C + D (invertido)

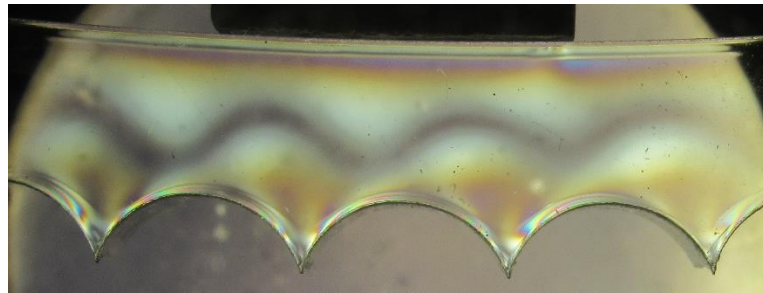


Figura 67: C2 com apoio + peso A + B + C + D + E (invertido)

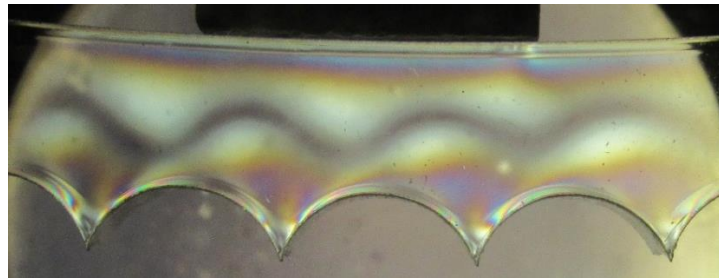


Figura 68: C2 sem apoio

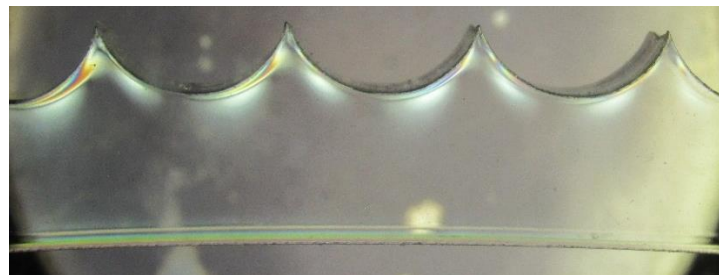


Figura 69: C2 somente com apoio

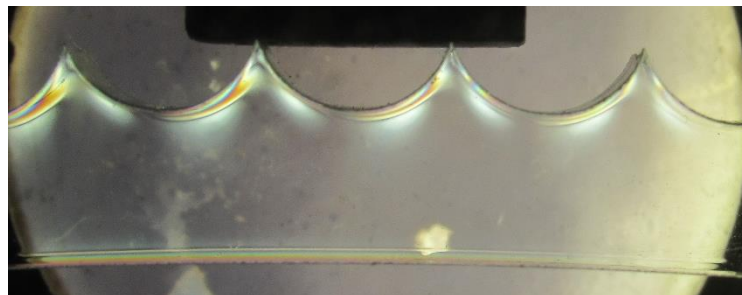


Figura 70: C2 com apoio + peso A

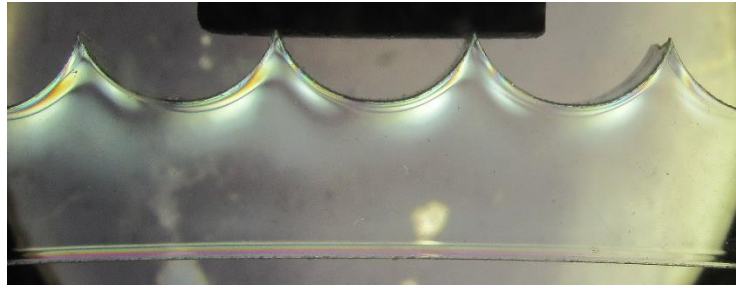


Figura 71: C2 com apoio + peso A + B

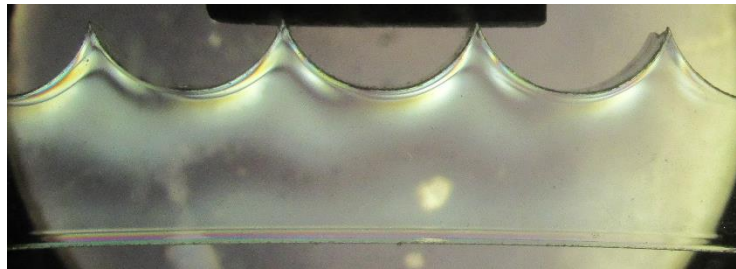


Figura 72: C2 com apoio + peso A + B + C

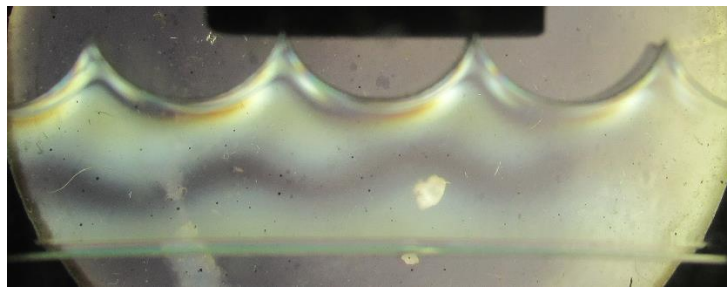


Figura 73: C2 com apoio + peso A + B + C + D

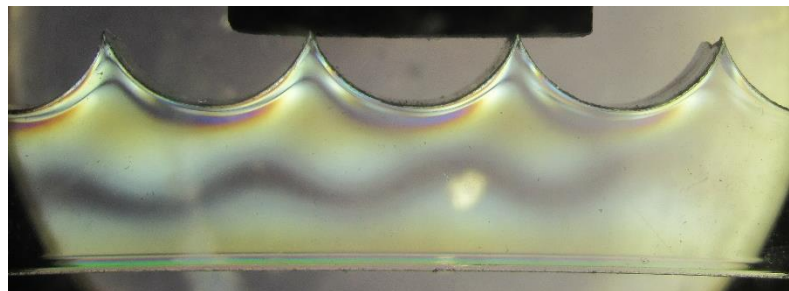
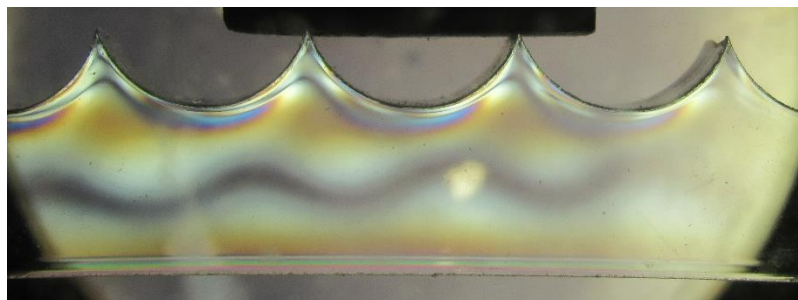


Figura 74: C2 com apoio + peso A + B + C + D + E



10.4 Ensaaios com V1

Figura 75: V1 sem apoio

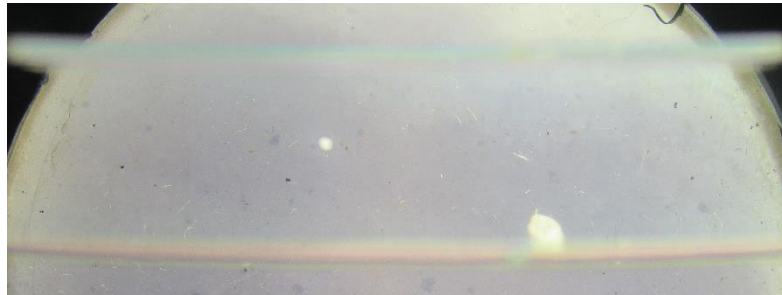


Figura 76: V1 com apoio

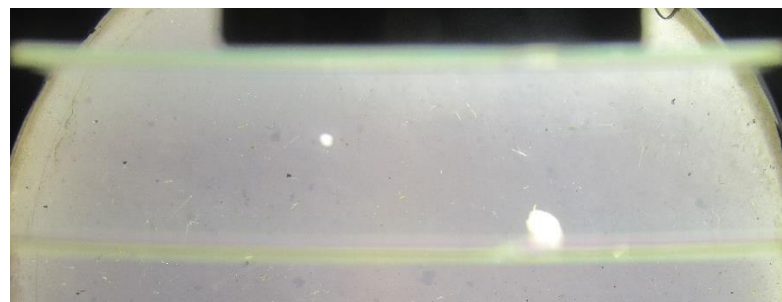


Figura 77: V1 com blocos A

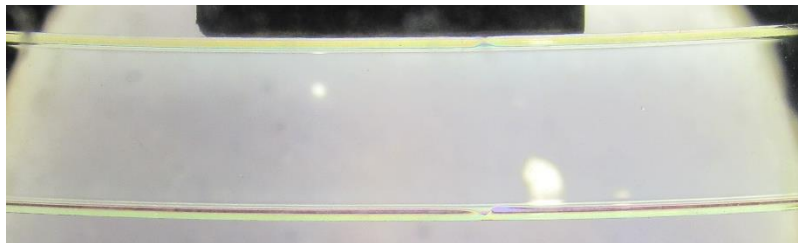


Figura 78: V1 com blocos A+B

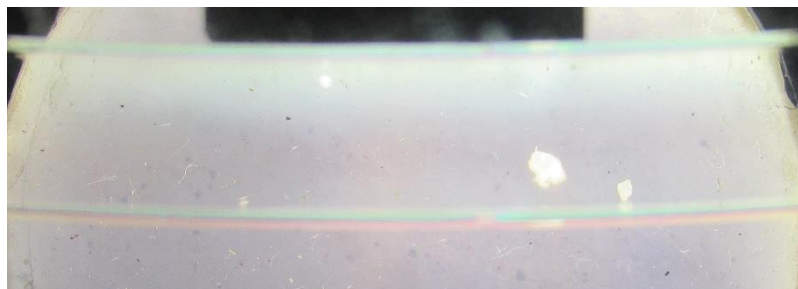


Figura 79: V1 com blocos A+B+C

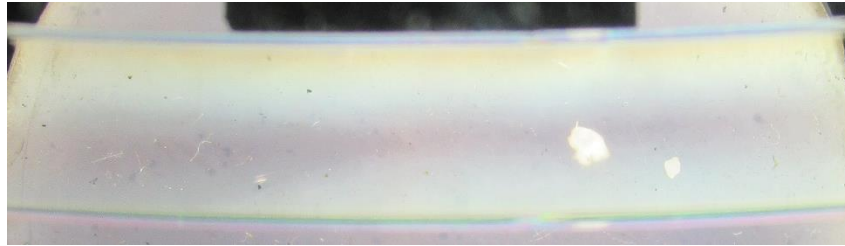


Figura 80: V1 com blocos A+B+C+D

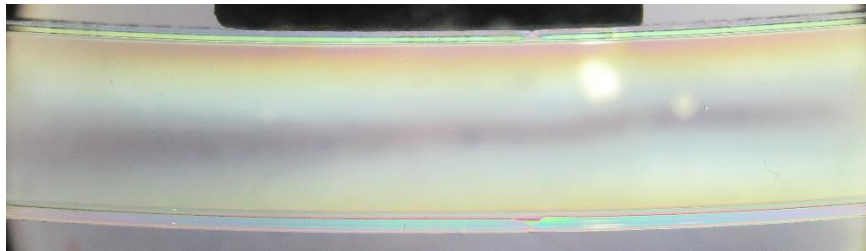


Figura 81: V1 com blocos A+B+C+D+E

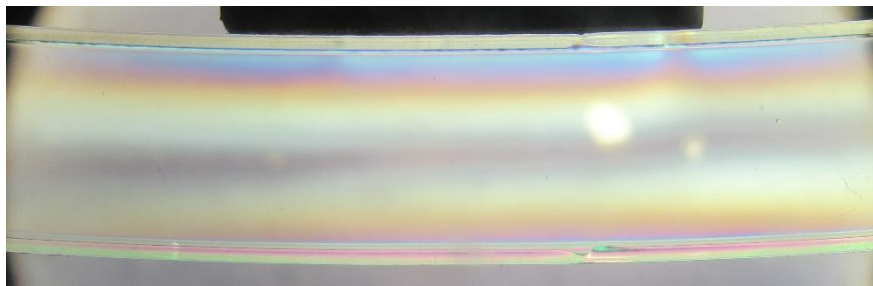


Figura 82: V1 com apoio

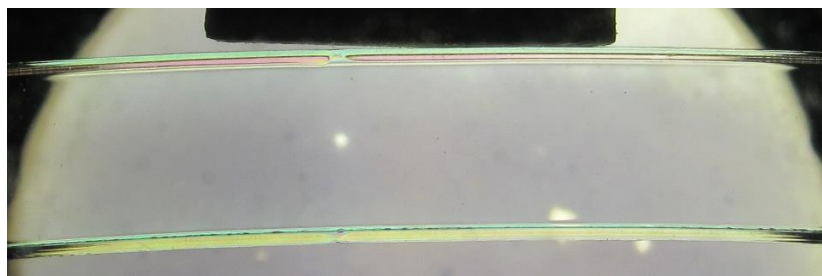


Figura 83: V1 com bloco A

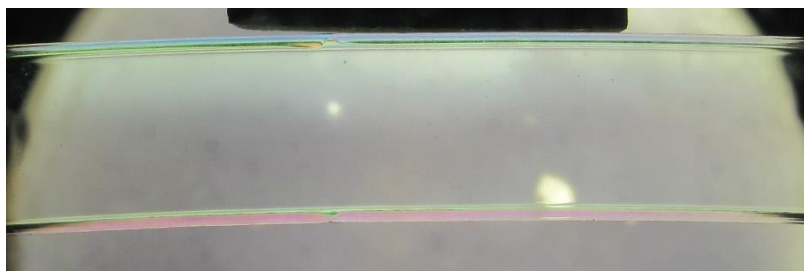


Figura 84: V1 com blocos A+B

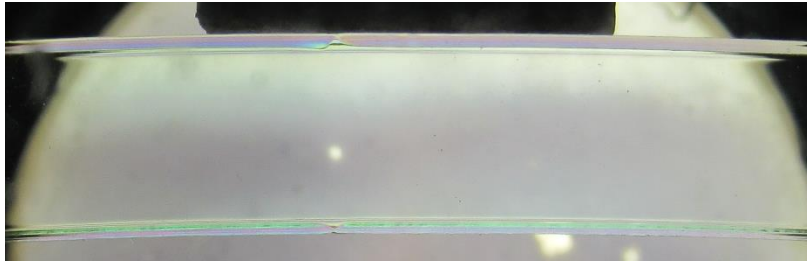


Figura 85: V1 com blocos A+B+C

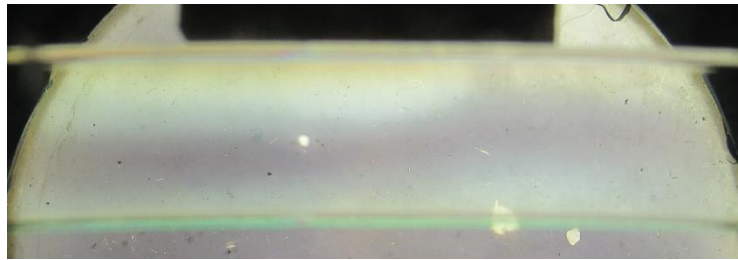


Figura 86: V1 com blocos A+B+C+D

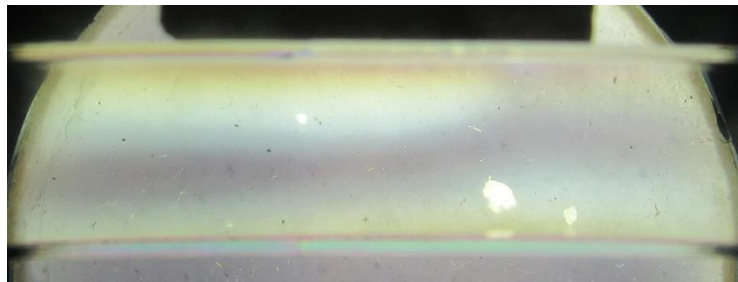


Figura 87: V1 com blocos A+B+C+D+E

