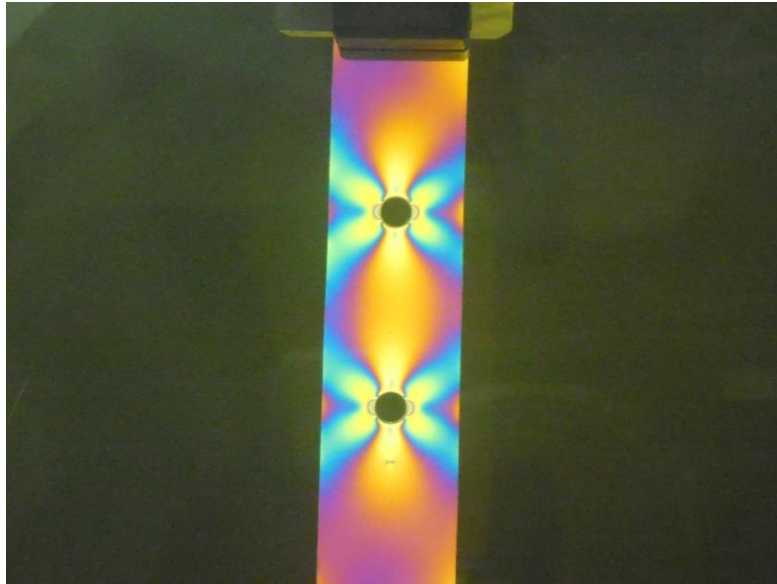




ISEL

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Área Departamental de Engenharia Mecânica



Estudo da iniciação de falha usando fotoelasticidade e simulação computacional

MAFALDA LOPES VIEGAS
(Licenciada em Engenharia Mecânica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Mecânica

Orientadores:

Prof.^a Dr.^a Maria Amélia Ramos Loja
Prof. Mestre Afonso Manuel Leite

Júri:

Presidente: Prof. Dr. José Augusto da Silva Sobral

Vogais:

Prof.^a Dr.^a Maria Alexandra Sousa Rodrigues
Prof. Mestre Afonso Manuel Leite

Janeiro de 2018



ISEL

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Área Departamental de Engenharia Mecânica

Estudo da iniciação de falha usando fotoelasticidade e simulação computacional

MAFALDA LOPES VIEGAS
(Licenciada em Engenharia Mecânica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Mecânica

Orientadores:

Prof.^a Dr.^a Maria Amélia Ramos Loja
Prof. Mestre Afonso Manuel Leite

Júri:

Presidente: Prof. Dr. José Augusto da Silva Sobral

Vogais:

Prof.^a Dr.^a Maria Alexandra Sousa Rodrigues
Prof. Mestre Afonso Manuel Leite

Janeiro de 2018

Agradecimentos

Com um fim de mais uma etapa, não poderia deixar de reconhecer o apoio de algumas das pessoas que tornaram este fim possível.

Gostaria de agradecer, antes de mais, aos meus orientadores. À Professora Maria Amélia Loja, pelo constante apoio e prontidão a responder e ajudar-me. Ao Professor Afonso Leite, pela enorme ajuda em ANSYS e conhecimentos em polímeros. Considero-vos exemplos de inspiração para quem tenciona seguir a área computacional, tal como eu.

Agradeço também o apoio financeiro e convite como colaboradora do projeto IPL/2016/SoftImob/ISEL - “Conceção e produção de máscaras de imobilização para diagnóstico e terapêutica”.

Aos meus colegas e amigos. Estes foram aqueles que estiverem mais presentes em todo o processo; com as minhas constantes dúvidas e desabafos.

À minha família. O carinho e as oportunidades que me proporcionaram ao longo da minha vida permitiram que eu chegasse a esta fase. Por isso, um GRANDE obrigado por tudo.

Agradeço ao meu namorado, Mário, pela ajuda na construção e furação dos *quase* infinitos provetes feitos para este estudo. A paciência e perseverança valem sempre a pena!

Por fim, agradeço a todos os que me ajudaram de alguma forma a tornar este sonho possível.

Resumo

Ao longo dos anos, tem havido uma forte procura de novos materiais que possam ser seguros, leves e económicos. Ao mesmo tempo, pretende-se que tenham boas propriedades mecânicas e que sejam fáceis de fabricar, de modo a substituir os metais em várias aplicações. Neste contexto, os polímeros deverão ser considerados como um potencial material a ser usado como substituição, devido as suas características únicas. No entanto, os polímeros possuem um comportamento um pouco mais complexo, o que causa alguns obstáculos nas fases iniciais do seu design. Essas fases incluem análise estática, tensões cíclicas e ocorrência de falha, na presença de entalhes ou concentradores de tensões. Deste modo, uma compreensão mais profunda do comportamento mecânico dos polímeros, principalmente na presença de concentradores de tensões, é muito importante.

A fotoelasticidade poderá ser um método experimental conveniente de forma a permitir prever a distribuição de tensões em modelos poliméricos com concentradores de tensões, ao mesmo tempo permitindo uma observação a olho nu dessa mesma distribuição. Quando um provete fotoelástico, ao possuir propriedades birrefringentes, encontra-se sob o efeito de um carregamento e iluminado com uma luz vulgar, este exhibe um padrão de franjas fotoelásticas que estão relacionadas com a diferença das tensões principais e sua direção. Estas franjas são conhecidas como isocromáticas e isoclínicas.

Com o presente trabalho, pretende-se observar e interpretar o estado de tensão e calcular a diferença de tensões principais num modelo em carregamento de Polimetil-Metacrilano (PMMA) e Poliestireno (PS), contendo um furo ou dois furos centrais circulares. Estes materiais foram selecionados por serem birrefringentes e por se enquadrarem no contexto do projecto IPL/2016/SoftImob/ISEL, como materiais radiotransparentes. Com estes objetivos, irão ser realizados ensaios experimentais estáticos.

Numa fase final, os resultados experimentais irão ser comparados aos resultados alternativos obtidos através de simulações pelo Métodos dos Elementos Finitos, em comportamento linear-elástico.

Palavras-Chave: Polímeros, PMMA, PS, Fotoelasticidade, Viscoelasticidade, Método dos Elementos Finitos

Abstract

Over the years, there has been an intense quest for new materials that can be safe, lightweight and economical. While maintaining good mechanical properties, they need to be also easy to fabricate, in order to substitute metals in many applications. In this context, polymers should be considered as a potential material to be used in that replacement, due to its unique properties. Polymers have, though, a more complex behavior, whose poses additional difficulties at design stage. This stage usually includes static analysis, cyclic stresses and crack occurrence, in the presence of notches. Therefore, a deeper understanding of polymers mechanical behavior, in the presence of those stress raisers, is very important.

Photoelasticity may be a convenient experimental method to enable the prediction of stresses distributions in polymeric parts with notches, while allowing for its illustrative visualization. When a photoelastic specimen, having birefringent properties, is under load and illuminated with an ordinary light, it exhibits photoelastic fringe patterns that are related with the principal-stress difference and their direction. These fringes are called isochromatic and isoclinic.

With the present work, it is intended to observe and interpret the stress distribution and to calculate the principal-stress difference in a loaded Polymethyl-Methacrylate (PMMA) and Polystyrene specimens, containing one or two central circular holes. There two materials were selected due to their birefringence and due to their relation to the project IPL/2016/SoftImob/ISEL, as radiotransparent materials. To these purposes, static experiments will be carried out.

Finally, the experimental results will be compared with alternative results obtained through Finite Element Method simulations, modeling the linear elastic behavior.

Keywords: Polymers; PMMA; PS; Photoelasticity; Viscoelasticity; Finite element method

Índice

1. Introdução.....	1
1.1. Motivação	1
1.2. Objetivos.....	2
2. Comportamento mecânico de polímeros.....	3
2.1. Fratura Frágil em Polímeros	6
2.2. Fratura Dúctil em Polímeros.....	8
2.3. Comportamento Linear-Elástico.....	9
2.4. Comportamento viscoelástico.....	11
2.4.1. Modelo Viscoelástico	11
3. Ensaio Mecânicos em provetes poliméricos.....	15
3.1. Teste de Relaxação	15
3.2. Teste de Fluência	17
3.3. Teste de Resistência à Fratura (<i>KIc</i>).....	18
3.3.1. <i>KI</i> – Factor de Concentração de Tensões.....	18
4. Fotoelasticidade.....	25
4.1. Efeito ótico de carregamento num material.....	26
4.2. Luz (onda eletromagnética)	28
4.3. Refração e Reflexão.....	29
4.4. Polarização da Luz (Eletromagnética).....	31
4.5. Propriedade birrefringente	33
4.6. Análise de franjas de fotoelasticidade.....	36
4.6.1. Técnicas utilizadas para estudo bidimensional.....	36
4.7. Princípio de Saint Venant	39
5. Calibração.....	41
5.1. Influência da espessura do material	43
6. Polariscópio.....	45
6.1. Polarizador	45
6.2. Placa de Onda	46
6.3. Placa de quarto de onda	47
6.4. Polariscópio Plano	48
6.5. Polariscópio Circular	49
6.5.1. Polariscópio Circular – Campo escuro	49
6.5.2. Polariscópio circular – campo iluminado.....	50

6.6.	Isocromáticas e Isoclínicas	51
7.	Ensaio Experimentais	53
7.1.	Materiais e Métodos.....	53
7.2.	1º Ensaio	56
7.3.	2º Ensaio	61
7.4.	3º Ensaio	69
7.5.	4º Ensaio	71
7.6.	5º Ensaio	76
7.7.	6º Ensaio	80
7.8.	7º Ensaio	87
8.	Simulação Numérica (Método dos Elementos Finitos).....	97
8.1.	1º Modelo.....	97
8.2.	2º Modelo.....	102
9.	Discussão de Resultados	107
10.	Conclusões.....	109
10.1.	Desenvolvimento futuro.....	111
11.	Bibliografia.....	113

Índice de Figuras

Figura 1 - Comportamento mecânico dos polímeros submetidos a determinada carga mecânica	4
Figura 2 - Estrutura amorfa (lado esquerdo) e estrutura cristalino (lado direito) (adaptado de [2]).....	4
Figura 3 - Localização dos “vazios” e do crazing (esfarrapamento) (adaptado de [2]) ...	7
Figura 4 - Esquema de crazing na ponta da fenda (retirado de [1])	7
Figura 5 - Cedência plástica (retirado de [1]).....	8
Figura 6 – Carregamento uniaxial de uma placa com furo central (retirado de [6])	10
Figura 7 – Representação gráfica do teste de relaxação em materiais poliméricos (adaptado de [7]).....	15
Figura 8 – Representação gráfica do teste de fluência em materiais poliméricos (adaptado de [7]).....	17
Figura 9 - Tamanho da fenda (ρc) e largura da fenda (CTOD) (adaptado de [2]).....	19
Figura 10 - Três tipos de comportamento num ensaio KIc (adaptado de [25])	20
Figura 11 - Provete CT (adaptado de [7]).....	21
Figura 12 - Provete SENB (adaptado de [7])	21
Figura 13 - Ângulo e comprimento da fenda (adaptado de [15])	23
Figura 14 – Modelo Generalizado de Maxwell (retirado de [2])	12
Figura 15 – Representação de uma onda de luz no plano	28
Figura 16 - Reflexão e refração na interface entre dois meios	30
Figura 17 – Representação da luz polarizada no plano (adaptado de [17]).....	31
Figura 18 - Representação da luz polarizada circularmente (adaptado de [17])	32
Figura 19 - Efeito birrefringente (retirado de [18])	34
Figura 20 – Disco em compressão (adaptado de [25])	41
Figura 21 – Exemplo de Isoclínicas num disco em compressão (retirado de [18])	36
Figura 22 – Exemplo de isocromáticos num disco em compressão (retirado de [18]) ..	37
Figura 23 - Exemplo do efeito de furação em polímeros (Retirado de [22])	38
Figura 24 – Polarizador (adaptado de [18]).....	45
Figura 25 – Placa de onda (retirado de [18])	46
Figura 26 – Placa de um quarto de onda (adaptado de [18]).....	47
Figura 27 – Exemplo de disposição do Polariscópio plano (adaptado de [6])	48
Figura 28 – Polariscópio circular (campo escuro) (retirado de [6])	49
Figura 29 - Polariscópio TERCO MT 3100	54
Figura 30 - Máquina de Tração Universal Shimadzu AG-IS	54
Figura 31 – Montagem (adaptação) de polariscópio na máquina de tração	55
Figura 32 – Esquema da junta aparafusada das chapas com provete PMMA ou PS	55
Figura 33 – a) Chapa de 20x40 mm ; b) Chapa de 50x50mm.....	56
Figura 34 – Provete PMMA e chapas ligadas através de porcas e parafusos.....	57
Figura 35 – Exemplo de tipo de ligação entre provete e máquina uniaxial (retirado [22])	57
Figura 36 – Primeiro ensaio de tração com protótipo com PMMA Extrudido	58
Figura 37 - Rotura do PMMA na zona aparafusada.....	58
Figura 38 – Parte do provete que sofreu rotura	59

Figura 39 – Vários modos de falha de ligações ao corte (retirado e adaptado de [26]) .	60
Figura 40 – Destaque no descentramento do furo do meio	60
Figura 41 - Placa com furo central em PMMA	61
Figura 42 - Polariscópio plano utilizado no 2º ensaio	61
Figura 43 - isoclínicas e isocromáticas observadas com polarizador e analisador cruzados.....	62
Figura 44 – Polariscópio Circular do 2º ensaio	62
Figura 45 – Esquema possível do polariscópio retirado do Manual TERCO MT 7300 (adaptado).....	63
Figura 46 – Carregamento de 1500 N com as placas de ¼ de onda cruzados.....	63
Figura 47 – Carregamento de 1500 N com as placas de ¼ de onda rodados 30º.....	64
Figura 48 – Carregamento de 1500 N com as placas de ¼ de onda rodados 50º	64
Figura 49 – Carregamento de 2000 N com as placas de ¼ de onda rodados 60º.....	65
Figura 50 – Equipamento montado da experiência laboratorial (2º Ensaio).....	66
Figura 51 – Equipamento auxiliar (software e computador) da máquina uniaxial SHIMADZU	66
Figura 52 – Curva Carregamento vs. Deslocamento Vertical para uma velocidade de teste de 1mm/min	67
Figura 53 – Resultado do 3º Ensaio com Poliestireno (1600 N).....	69
Figura 54 – Resultado do 3º ensaio com Poliestireno (1600 N).....	70
Figura 55 - Resultado do 4º ensaio com PMMA com polariscópio plano	71
Figura 56 – Zoom do resultado do 4º ensaio com PMMA com polariscópio plano	72
Figura 57 – Resultado do 4º Ensaio com PMMA, parte 2 (polariscópio plano)	72
Figura 58 – Zoom in do resultado do 4º ensaio com polariscópio plano	73
Figura 59 – Representação dos resultados do 4º ensaio em polariscópio plano (à esquerda, analisador na direita; à direita, analisador na esquerda).....	73
Figura 60 – Resultados do 4º ensaio em campo escuro no polariscópio circular (824 N)	74
Figura 61 – Resultados do 4º ensaio em campo iluminado no polariscópio circular	75
Figura 62 - Comparação entre os dois ensaios constituintes do 5º ensaio (à esquerda, campo escuro; à direita campo iluminado).....	75
<i>Figura 63 – Resultado do 5º ensaio com poliestireno (PS) em polariscópio plano</i>	<i>76</i>
Figura 64 – Zoom in do resultado do 5º ensaio com poliestireno (PS) em polariscópio plano	77
Figura 65 - Resultado do 5º ensaio com poliestireno (PS) em polariscópio plano.....	77
Figura 66 - Resultado do 5º ensaio com rotura do poliestireno (Polariscópio Circular) 78	
Figura 67 - Poliestireno (PS) a 350 N em campo iluminado.....	78
Figura 68 – Zoom in do resultado do 5º ensaio (Polariscópio Circular)	79
Figura 69 – Resultado do 6º Ensaio (Polariscópio Circular – 700 N).....	80
Figura 70 – Resultado do 6º Ensaio (Polariscópio Circular – 1000 N).....	81
Figura 71 – Resultado do 6º Ensaio (Polariscópio Circular – 1100 N).....	82
Figura 72 – Resultado do 6º Ensaio (Polariscópio Circular – 1600 N).....	82
Figura 73 – Resultado do 6º Ensaio (Polariscópio Circular – 1900 N).....	83
Figura 74 – Resultado do 6º Ensaio (Polariscópio Circular – 2100 N).....	83
Figura 75 - Resultado do 6º Ensaio (Polariscópio Plano – 2000 N).....	85
Figura 76 - Resultado do 6º Ensaio (Polariscópio Plano – 2500 N).....	85
Figura 77 - Resultado do 6º Ensaio (Rotura a 2800 N)	86

Figura 78– Resultado do 7º Ensaio (Polariscópio Plano – 2000 N)	87
Figura 79 – Zoom in do resultado do 7º Ensaio (Polariscópio Plano – 2000 N).....	88
Figura 80 – Resultado do 7º Ensaio (Rotura a 2100 N)	88
Figura 81 – Zoom in do resultado do 7º Ensaio (Rotura a 2100 N)	89
Figura 82 – Resultado do 7º Ensaio (Polariscópio Circular – 1000 N).....	89
Figura 83 – Zoom in resultado do 7º Ensaio (Polariscópio Circular – 1000 N).....	90
Figura 84 - Resultado do 7º Ensaio (Polariscópio Circular – 1300 N).....	90
Figura 85 – Zoom in do resultado do 7º Ensaio (Polariscópio Circular – 1300 N).....	91
Figura 86 – resultado do 7º Ensaio (Polariscópio Circular – 1600 N)	91
Figura 87 – Zoom in resultado do 7º Ensaio (Polariscópio Circular – 1600 N).....	92
Figura 88 – resultado do 7º Ensaio (Polariscópio Circular –1700 N)	92
Figura 89 – Zoom resultado do 7º Ensaio (Polariscópio Circular – 1700 N).....	93
Figura 90 – resultado do 7º Ensaio (Polariscópio Plano – 1900 N)	93
Figura 91 - resultado do 7º Ensaio (Polariscópio Plano – 1900 N).....	94
Figura 92 – resultado do 7º Ensaio (Polariscópio Plano – 2100 N)	94
Figura 93 – zoom in do resultado do 7º Ensaio (Polariscópio Plano – 2100 N)	95
Figura 94 - Pontos e linhas para criar áreas do modelo com um furo	97
Figura 95 – Área do modelo em ANSYS com furo central.....	98
Figura 96 – Primeira refinação de modelo em ANSYS com furo central	98
Figura 97 – Modelo final em ANSYS do provete com furo central.....	99
Figura 98 - Tensão principal 1 da 1ª Refinação (1º Modelo)	100
Figura 99 - Tensão principal 2 da 1ª Refinação (1º Modelo)	100
Figura 100 – Resultado do 6º Ensaio (Provete com 1 furo central circular)	101
Figura 101 – Pontos e linhas para do modelo com dois furos circulares	102
Figura 102 – Área do modelo de dois furos	103
Figura 103 – Modelo final em ANSYS do provete com dois furos	103
Figura 104 - Tensão principal 1 (2º Modelo)	104
Figura 105 – Tensão principal 2 (2º Modelo).....	105
Figura 106 - Resultado do 7º Ensaio (Provete com 2 furos circulares).....	105

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Valores típicos da temperatura de transição vítrea para alguns polímeros.....	6
Tabela 2 – Tabela representativa da velocidade, comprimento de onda e frequência para algumas cores [adaptado de [18]).....	29
Tabela 3 – Tabela com vários valores de retardação para cada cor observada (adaptado de [21])	52
Tabela 4 – Propriedades do provete em Polimetil-Metacrilato utilizado	56
Tabela 5 – Propriedades do Poliestireno (retirado de [27]).....	70
Tabela 6 – Nível de refinação e resultados obtidos do 1º modelo em ANSYS.....	99
Tabela 7 - Nível de refinação e resultados obtidos do 2º modelo em ANSYS	104
Tabela 8 – Tabela de Erros do 1º modelo experimental e numérico	107
Tabela 9 – Tabela de Erros do 2º Modelo experimental e numérico.....	107

Glossário

a – Amplitude de onda

$A_{resistente}$ – Área útil da secção do provete

λ – Comprimento de onda

ν – Coeficiente de Poisson

C – Coeficiente relativo de tensão-ótica

D(t) – Complacência de Fluência

γ_o – Constante de extensão de corte

f_σ – Constante de franja

δ_c – *Crack Tip Opening Displacement*

D – Diâmetro

S – Distância entre apoios no provete SENB

B – Espessura provete CT e SENB

h – Espessura do material

K_{Ic} – Fator crítico de concentração de tensões

K_{cand} – Fator de concentração de tensões candidato

K_I – Fator de concentração de tensões

$f(\frac{a}{W})$ – Factor de forma

F – Força

P – Força aplicada

f – Frequência

ω – Frequência angular

n – Índice de refração

J_v – Integral J viscoelástico

t_ρ – Intervalo de tempo que a ponta da fenda demora a atingir o CTOD (δ_c)~

W – Largura provete CT e SENB

G(t) – Módulo de tensão de corte de relaxação

$E(t)$ – Módulo de Relaxação

G_o – Módulos de relaxação para t= 0

α_{∞}^G – Módulos relativos a $G(t)$
 α_{∞}^K – Módulos relativos a $K(t)$
 $K(t)$ – Módulo de relaxação em massa
 ξ – Número de onda
 N – Número de ordem de franja
 δ_N – Número de ordem de franja fracionada
 R – Retardação relativa que emerge do modelo
 ρ_c – Tamanho de fenda
 a – Tamanho de fenda no provete CT e SENB
 t – Tempo
 $\sigma_{E,o}$ – Tensão aplicada constante
 σ_{ced} – Tensão de cedência
 $\tau_{m\acute{a}x}$ – Tensão de corte máxima
 $\tau_{r\theta}$ – Tensão de corte radial-tangencial
 σ_r – Tensão normal radial
 σ_{θ} – Tensão normal tangencial
 σ_1 – Tensão principal na direção 1
 σ_2 – Tensão principal na direção 2
 $\sigma(t)$ – Tensão uniaxial
 $\sigma_E(t)$ – Tensão uniaxial aplicada
 T – Período
 ε_o – Valor de deformação constante
 \dot{a} – Velocidade de crescimento de fenda

Acrónimos

ASTM – American Society of Testing Materials

CT – Compact Tension

CTOD – Crack Tip Opening Displacement

SENB – Single Edge Notch Bending

1. Introdução

1.1. Motivação

Os materiais poliméricos, ao contrário do que se pensa, são materiais já utilizados desde os primórdios da origem do ser humano. Os polímeros são materiais essencialmente orgânicos, com longas cadeias moleculares que dificultam a rotura.

Todos os plásticos são polímeros, mas nem todos os polímeros são necessariamente plásticos. Os plásticos são um termo comercial e são polímeros artificialmente modificados. Podem conter outras substâncias na sua estrutura para além da estrutura básica de um polímero, como aditivos que permitem melhorar alguma propriedade.

A quantidade de materiais plásticos usada pela indústria aumentou significativamente nas últimas décadas, principalmente na indústria automóvel. Quando o Cadillac foi construído, em 1959, foi verificado com surpresa que tinham colocado 11,4 kg de materiais plásticos nessa viatura. Este valor foi aumentado ao ponto de chegar aos 111,4 kg, em 1993, tanto em plásticos como em compósitos à base de plástico [1].

A fotoelasticidade é um método bastante antigo, mas que caiu em desuso, não pela falta de capacidade em obter resultados, mas pelo crescimento tecnológico a nível de *software* de simulação numérica que permite obter as distribuições do estado de tensão de um material, sem necessitar de equipamentos extra para realizar ensaios experimentais. Este método permite obter facilmente uma noção da variação do estado de tensão quando o material está sob carregamento. Deste modo, consegue-se visualizar indicadores de concentração de tensões que poderão por em causa a integridade física do modelo em estudo.

1.2. Objetivos

O propósito central deste trabalho foi visualizar e caracterizar estados de tensão, bem como determinar a diferença das tensões principais em alguns modelos poliméricos. Por outro lado, pretendeu-se também comparar a resposta entre dois tipos de materiais fotoelásticos, tanto a nível de tenacidade à fratura, como a facilidade de se observar franjas fotoelásticas.

De modo a atingir o objetivo pretendido, procedeu-se a vários ensaios experimentais, com um modelo de um furo central circular, e outro com modelo de dois furos circulares. Os materiais utilizados foram Polimetil-Metacrilato (PMMA), do tipo extrudido e vazado, e Poliestireno (PS), sendo estes materiais birrefringentes e radiotransparentes, no contexto do projeto SoftImob. De forma a comparar estes ensaios experimentais, utilizou-se o Método dos Elementos Finitos, em ANSYS, em que foi modelado e simulado computacionalmente o mesmo tipo de modelo dos ensaios experimentais.

2. Comportamento mecânico de polímeros

O comportamento mecânico dos materiais é caracterizado pela resposta que estes apresentam quando são submetidos a determinada sollicitação. Os polímeros são materiais orgânicos, compostos por longas cadeias moleculares e ricas em carbono. As cadeias moleculares formam um emaranhado (estrutura amorfa), que reforça as ligações intermoleculares, constituindo um mecanismo de coesão do material. [1]

Todos os materiais estruturais exibem um certo grau de viscoelasticidade. O seu grau depende, essencialmente, da temperatura a que o mesmo está submetido. Por um lado, os metais são fundamentalmente elásticos na temperatura normal de trabalho. Os materiais poliméricos, por outro lado, apresentam, em geral, um comportamento viscoelástico à temperatura ambiente.

Os polímeros estão divididos em três grandes grupos [2]:

- Termoplásticos – estes necessitam de calor para serem enformados e, após o arrefecimento, mantêm a forma que adquiriam durante a enformação. Estes materiais podem ser várias vezes reaquecidos e reenformados em novas formas, sem que ocorra alteração significativa das suas propriedades;
- Termoendurecíveis – estes materiais são enformados para uma determinada forma permanente e depois endurecidos através de uma reação química. Não podem ser refundidos e reformados, uma vez que se degradam quando aquecidos a temperaturas muito elevadas.
- Elastómeros – as suas dimensões podem variar bastante quando submetidos a sollicitações mecânicas e voltam às suas dimensões iniciais (ou quase) quando se retira a carga inicial.

O material polimérico tem algumas semelhanças aos metais, ao nível do seu comportamento mecânico quando submetido a uma carga, e poderá apresentar os seguintes comportamentos (Figura 1) [3]:

- Frágil – este quebra durante ou logo após o início da deformação elástica (Curva A)
- Elasto-plástico – deformação elástica com ponto de cedência seguido de deformação plástica (Curva B)
- Elastomérico – elevada deformação elástica (Curva C)

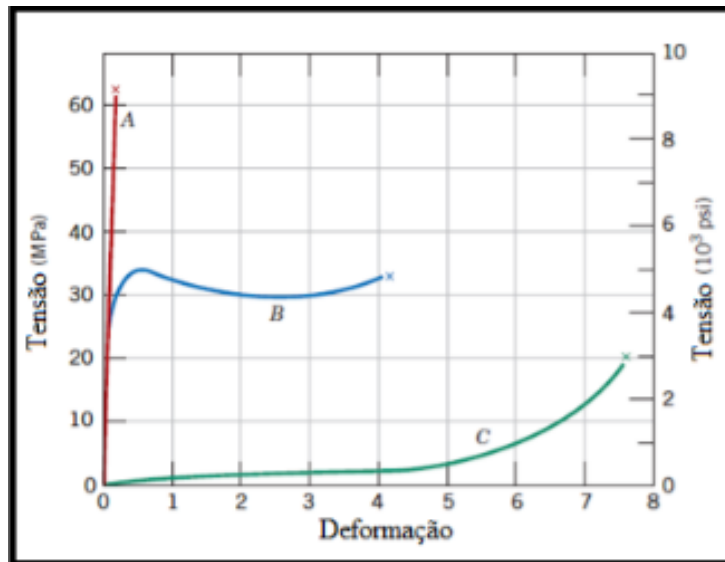


Figura 1 - Comportamento mecânico dos polímeros submetidos a determinada carga mecânica

Como já foi mencionado, a deformação de um provete polimérico tem um comportamento semelhante ao de um provete metálico, com a diferença que as propriedades mecânicas do polímero dependem bastante mais da temperatura, velocidade de deformação e das condições de ambiente do ensaio [3]. Diminuindo a velocidade de deformação do ensaio, este provoca um aumento da ductilidade do material, semelhante ao metal. A deformação pode ser elástica, plástica (permanente) ou uma combinação das duas. [1]

Os polímeros podem ainda ser amorfos ou cristalinos. Se as cadeias poliméricas estiverem agrupadas com um padrão regular, estas serão cristalinas (Figura 2, lado esquerdo). Se estiverem agrupadas em ordem aleatória, são amorfas (Figura 2, lado direito). [1] Um exemplo relevante é o material acrílico ou Polimetil-Metacrilato (PMMA). Este é um material termoplástico semi-dúctil, transparente e amorfo. Algumas das utilizações deste material podem encontrar-se em aviões e barcos. Para além de se considerar este material polimérico neste estudo, considera-se ainda o Poliestireno (PS). Este é também um material amorfo, mas mais frágil do que o PMMA e, dado que ambos são birrefringentes, são também materiais radiotransparentes, o que é um aspeto relevante no contexto do projeto SoftImob.

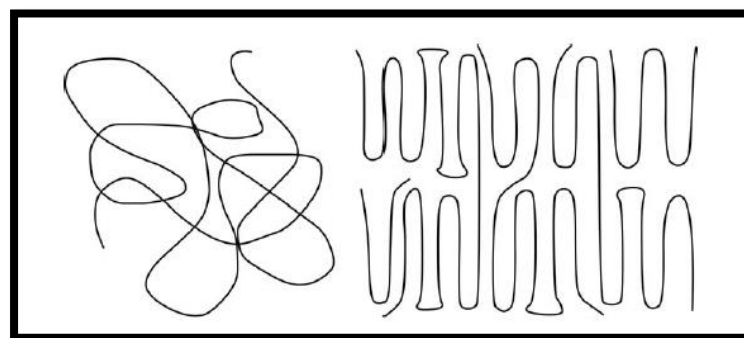


Figura 2 - Estrutura amorfa (lado esquerdo) e estrutura cristalino (lado direito) (adaptado de [2])

Comparando de forma genérica o metal ao polímero, os materiais poliméricos têm como algumas vantagens o peso e o baixo custo. Para além destas, é possível mencionar [1]:

- Bons isoladores elétricos;
- Bons isoladores de som;
- Podem eliminar a necessidade de lubrificação;
- Facilidade de processamento;
- Resistentes à corrosão;

Contudo, os polímeros são materiais pouco tolerantes a temperaturas altas, atingindo modificação considerável nas suas propriedades físicas a partir dos 120°C, em casos gerais. A baixa resistência à tração também é vista como uma desvantagem estrutural.

2.1. Fratura Frágil em Polímeros

A fratura de polímeros é mais complexa devido às ligações e forças entre as moléculas. As forças principais são as chamadas ligações covalentes entre átomos de carbono e as forças secundárias são as de van der Waals, que resistem à deformação. [2]

Os termoplásticos podem fraturar de modo frágil ou dúctil. Essa transição dá-se tendo em conta a temperatura de transição vítrea típica do material em estudo. Essa é a temperatura a partir da qual um termoplástico amorfo ou sem cristalino passa de frágil a dúctil, sendo este um processo reversível (Tabela 1). Se a fratura de um termoplástico ocorrer abaixo da transição vítrea, então o modo de fratura é frágil. Se ocorrer acima da temperatura vítrea, a fratura será dúctil. A temperatura de transição vítrea num polímero não é considerada uma constante física, como por exemplo, a temperatura de fusão. Esta irá depender, até certo de ponto, de variáveis como o grau de cristalinidade, o peso molecular médio das cadeias poliméricas e a velocidade de arrefecimento do polímero. [1]

Tabela 1 – Valores típicos da temperatura de transição vítrea para alguns polímeros

Polímero	Temperatura de Transição Vítrea (°C)	
Polimetil-Metacrilato (Acrílico ou PMMA)	165	[4]
Poliestireno	110	
PTFE (teflon)	123	
Policloreto de vinilo (PVC)	105	
Polietileno	-15	

A energia necessária para fraturar os termoplásticos vítreos (com temperatura de transição vítrea) é muito mais elevada que nos vidros inorgânicos. Este comportamento deve-se ao facto de se formarem regiões distorcidas designadas por esfarrapamentos (*crazes* ou *crazing*) antes de ocorrer fratura. Este *crazing* começa a partir de defeitos ou fendas pré-existentes. Um esfarrapamento num termoplástico vítreo ocorre numa região do material submetida a uma elevada concentração de tensões, e consiste no alinhamento das cadeias moleculares combinado com uma elevada densidade de vazios dispersos (Figura 3). Se a tensão aplicada for suficientemente elevada, forma-se uma fissura a partir do esfarrapamento. À medida que a fissura se propaga ao longo da região esfarrapada, a concentração de tensões na ponta da fenda estende-se ao longo do comprimento do esfarrapamento. A quantidade de energia que é necessária no alinhamento das moléculas poliméricas no interior do esfarrapamento depois dessa aplicação de tensão, é a razão pela qual são necessárias forças elevadas para fraturar materiais poliméricos vítreos (Figura 4). [1] [2]

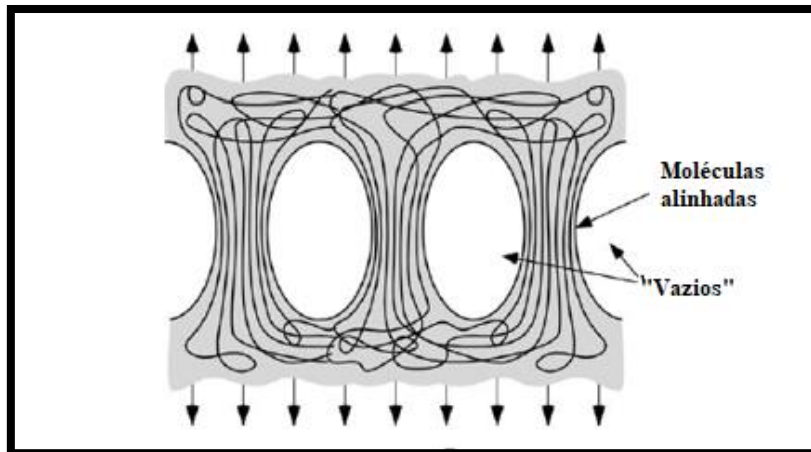


Figura 3 - Localização dos "vazios" e do crazing (esfarrapamento) (adaptado de [2])

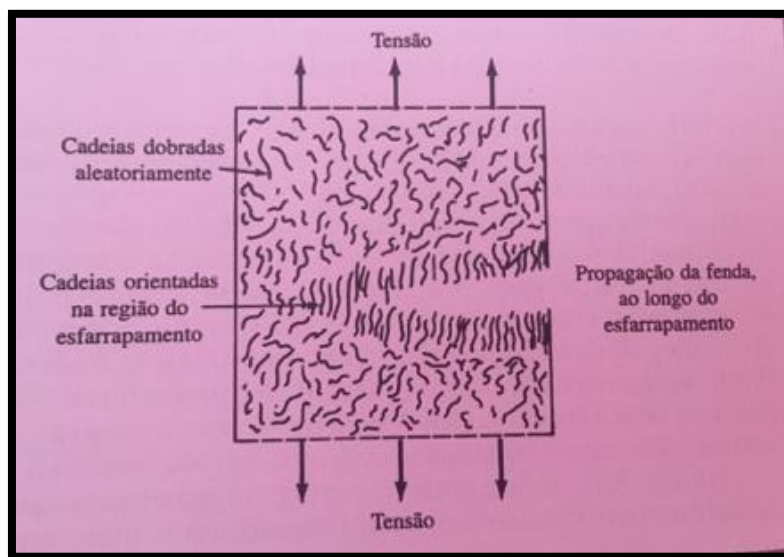


Figura 4 - Esquema de crazing na ponta da fenda (retirado de [1])

A fratura ocorre na "craze zone" quando cada fibrila se parte. Este processo pode ser instável, fazendo com que a tensão seja suficiente para partir uma ou mais fibrilas vizinhas. A fratura na "craze zone" normalmente inicia-se devido a poeiras inorgânicas que ficam presas dentro do polímero. [2]

2.2. Fratura Dúctil em Polímeros

Os termoplásticos podem apresentar deformação plástica antes da rotura. Durante a deformação plástica, as cadeias moleculares desenrolam-se e escorregam umas sobre as outras, aproximando-se e alinhando-se gradualmente segundo a direção da tensão aplicada. Quando a carga aplicada é muito elevada, as ligações das cadeias principais quebram-se e ocorre a fratura do material (Figura 5). [1]

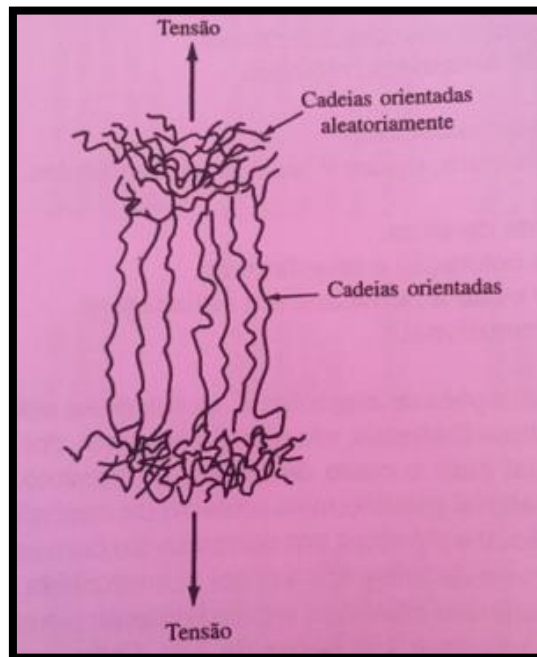


Figura 5 - Cedência plástica (retirado de [1])

O comportamento mecânico apresentado pelos polímeros varia com o aumento ou diminuição da temperatura, como já foi mencionado anteriormente. No caso do PMMA e do PS, estes são polímeros amorfos pois não ocorre cristalização no arrefecimento a partir do estado líquido. Estes polímeros apresentam, com a diminuição da temperatura, os seguintes tipos de comportamento [3]:

1. Líquido viscoso, a temperaturas elevadas;
2. Sólido viscoelástico (simultaneamente comportamento viscoso e elástico), a temperaturas intermédias;
3. Vítreo, a baixa temperatura.

2.3. Comportamento Linear-Elástico

Um material polimérico exibe um comportamento mecânico que se encontra entre o perfeitamente elástico e o perfeitamente viscoso, sendo estes denominados por materiais viscoelásticos. Por esta razão, é considerado relevante elucidar inicialmente sobre o comportamento (linear) elástico, começando pelas relações de tensão e extensão elementares.

A filosofia mais comum aplicada ao estudo do teste uniaxial a um polímero assume que o material é isotrópico, elástico e o coeficiente de *Poisson* é independente do tempo e da temperatura, e que o teste é feito numa gama de temperaturas entre -54°C até 74°C. [5]

Para obter a curva Tensão-Extensão utiliza-se usualmente a Lei de *Hooke* para um estado unidimensional dado por:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (1)$$

Contudo, para um estudo mais realístico do estado de tensão de um material que, numa situação mais geral envolverá um estado de tensão triaxial, deverá ser considerada a Lei de *Hooke* Generalizada:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{1}{E} [\sigma_{xx} - \nu(\sigma_{yy} + \sigma_{zz})] \quad (2)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{1}{E} [\sigma_{yy} - \nu(\sigma_{zz} + \sigma_{xx})] \quad (3)$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{1}{E} [\sigma_{zz} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})] \quad (4)$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2G} \sigma_{xy} \quad (5)$$

$$\varepsilon_{yz} = \frac{1}{2G} \sigma_{yz} \quad (6)$$

$$\varepsilon_{xz} = \frac{1}{2G} \sigma_{xz} \quad (7)$$

Em que E é o Módulo de *Young*, ν é o coeficiente de *Poisson*, ε_{xx} , ε_{yy} e ε_{zz} são as extensões, isto é, a deformações unitárias normais associadas ao respetivo eixo em estudo (x, y, z) ou deformações de corte no caso de ε_{xy} , ε_{yz} e ε_{xz} e σ é também a tensão associado ao respetivo eixo ou tensão de corte. G é o módulo de corte dado por:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (8)$$

A lei de *Hooke* afirma também que esta só é aplicável para extensões e tensões reduzidas, sendo esta possível aplicar no presente caso de estudo. Estas relações Tensão-Extensão serão posteriormente utilizadas em testes experimentais de materiais poliméricos, considerando estes com comportamento maioritariamente linear-elástico.

Em adição a estas relações, é importante abordar as equações de Kirsch devido à geometria do provete que será utilizado nos testes experimentais na presente dissertação. Estas equações descrevem a distribuição de tensões à volta de um furo numa placa infinita, assumindo um comportamento linear-elástico. Estas equações são as seguintes [6] [7]:

$$\sigma_r = \frac{S}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + \frac{S}{2} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} - \frac{4a^2}{r^2} \right) \cos(2\theta) \quad (9)$$

$$\sigma_\theta = \frac{S}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \frac{S}{2} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos(2\theta) \quad (10)$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{S}{2} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} + \frac{2a^2}{r^2} \right) \sin(2\theta) \quad (11)$$

Em que σ_r é a tensão normal radial, σ_θ é a tensão normal tangencial e $\tau_{r\theta}$ é a tensão de corte radial-tangencial dado por coordenadas polares r, θ . S é a tensão uniaxial aplicada à placa com furo central e a é o raio do furo (Figura 6).

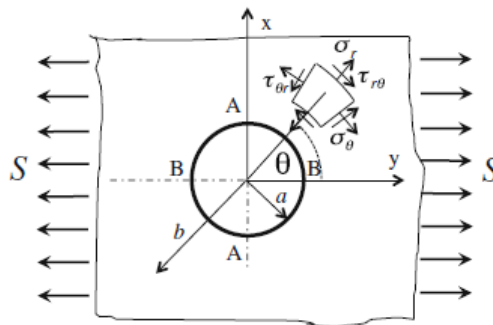


Figura 6 – Carregamento uniaxial de uma placa com furo central (retirado de [6])

É importante mencionar que, enquanto que estas definições de tensão e deformação são inalteradas independentemente do material, as relações elementares mencionadas anteriormente no caso do furo, não são aplicáveis para polímeros na região de deformação viscoelástica pois aplicam-se apenas ao comportamento linear-elástico. [8]

2.4. Comportamento viscoelástico

Após a introdução do comportamento linear elástico na secção anterior, o comportamento que será abordado de seguida será o caso mais realista do comportamento mecânico dos polímeros: o viscoelástico. Os polímeros têm a peculiaridade de apresentarem um comportamento intermédio entre o líquido viscoso e o vítreo, dependendo da temperatura e da velocidade de deformação. [2]

Um material viscoso resiste à tensão de corte de forma linear, em função do tempo, quando uma carga é aplicada no material. Estes também dependem da temperatura, pois quando a temperatura aumenta, a sua viscosidade diminui. Em relação aos materiais elásticos, a sua resposta em deformação ocorre quase instantaneamente e quando a carga é removida, o material volta ao seu estado físico inicial, no caso geral.

Como estes materiais dependem da temperatura e do tempo [8], não é correto tratar deste tipo de material pelas Leis relativas a materiais viscosos, exclusivamente, ou a materiais elásticos, exclusivamente. [8]

Pelas razões atrás mencionadas, é necessário adotar alguns métodos de teste diferentes para caracterizar a propriedade única viscoelástica do material. Deste modo, é possível determinar como as propriedades variam com o tempo e evitar rutura prematura. [8] [9]

2.4.1. Modelo Viscoelástico

As últimas relações matemáticas apresentadas, relativamente ao teste de fluência e ao teste de relaxação, são inteiramente independentes da estrutura do material em causa. Podem ser aplicadas para qualquer tipo de material desde que seja uniforme e isotrópico, como, por exemplo, o metal (em casos gerais). Como o objetivo deste trabalho é o estudo de materiais poliméricos, considera-se de extrema importância representar a fluência e relaxação destes materiais utilizando modelos viscoelásticos.

Nestes modelos, as forças são substituídas por tensões e o deslocamento por deformações (extensões). Estes modelos tornam-se úteis para entender a relação física entre a deformação e a tensão que ocorre em materiais viscoelásticos. [11]

Os modelos mais conhecidos são o Modelo Maxwell, que representa o comportamento de um fluido (componente viscosa) e o Modelo Kelvin, que representa o comportamento de um sólido (componente elástica). Juntos, estes representam os modelos básicos reológicos na viscoelasticidade linear: a mola linear-elástica e o amortecedor linear-viscoso [16]. A reologia é o ramo da ciência que estuda a deformação e o movimento (escoamento) da matéria como, por exemplo, a elasticidade ou a viscosidade.

No teste de fluência, o modelo que possui um amortecedor livre, o Modelo Kelvin, irá sofrer um aumento de deformação gradual ao longo do tempo, pois a presença do

amortecedor não permite deformações repentinas. Este comportamento é similar à resposta de um polímero termoplástico. Por outro lado, o Modelo Maxwell permite que haja um aumento de deformação acentuada devido à presença da mola livre. No teste de relaxação, a tensão irá reduzir-se até zero, como no caso do modelo Maxwell, e irá reduzir-se até um determinado valor, para o caso do modelo Kelvin. O comportamento típico dos termoplásticos será semelhante ao do modelo Maxwell em relaxação. [8]

De acordo com os fatores atrás mencionados, pode-se assumir, numa primeira fase, que a melhor solução para representar o comportamento viscoelástico do PMMA e do PS, como polímeros termoplásticos, é o modelo Maxwell. Apesar deste modelo parecer ser o mais adequado, existem limitações estruturais neste modelo já que este não tem em conta a recuperação viscoelástica, pois a deformação no amortecedor não é invertida quando o carregamento é retirado. [2]

Desta forma, uma boa representação e a mais adequada é o Modelo Generalizado de Maxwell e é baseado no modelo básico reológico de Maxwell. Esta é constituída por vários modelos Maxwell básicos (mola e amortecedor em série) em paralelo.

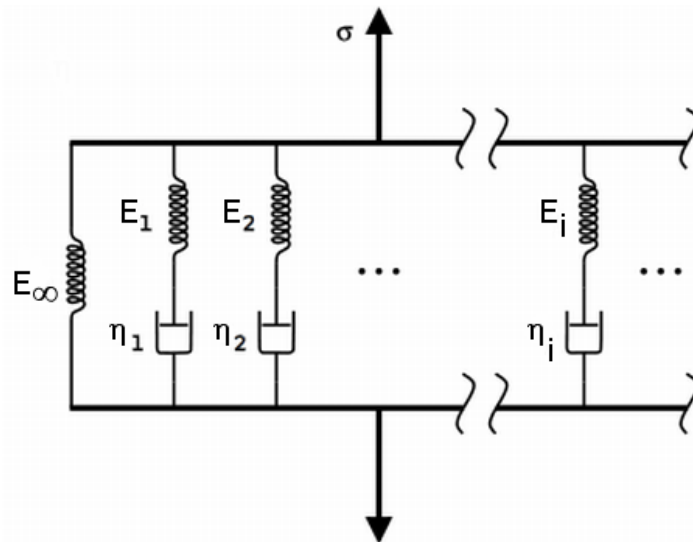


Figura 7 – Modelo Generalizado de Maxwell (retirado de [2])

No *software* ANSYS, as soluções para os modelos viscoelásticos, no caso de deformações pequenas, é feita com a implementação das séries de Prony. Estas permitem transformar o modelo em modelo viscoelástico. Em vez de existirem valores constantes de G e K , estes são representados por $G(t)$, um valor em função do tempo, e $K(t)$, também em função do tempo. $G(t)$ é, como já foi referido, o módulo de tensão de corte e $K(t)$ é o módulo de relaxação em massa, ambos dados por [17]:

$$G(t) = G_o \left[\alpha_\infty^G + \sum_{i=1}^{n_G} \alpha_i^G \times e^{-\frac{t}{\tau_i^G}} \right] \quad (25)$$

E,

$$K(t) = K_o \left[\alpha_{\infty}^K + \sum_{i=1}^{n_K} \alpha_i^K \times e^{-\frac{t}{\tau_i^K}} \right] \quad (26)$$

Em que:

G_o, K_o = módulos de relaxação para $t = 0$

n_G, n_K = número de termos de Prony

α_i^G, α_i^K = módulos relativos

τ_i^G, τ_i^K = tempos de relaxação para ambos os módulos $G(t)$ e $K(t)$

3. Ensaio Mecânico em provetes poliméricos

Uma das características mais especiais e típica dos polímeros é o facto de estes exibirem uma resposta em extensão dependente do tempo de teste, quando submetidos a uma tensão constante (carregamento). Este comportamento é denominado por fluência e é dos métodos fundamentais que pode ser utilizado para caracterizar um material viscoelástico. Outra característica é que a resposta em tensão é dependente do tempo de teste, quando a deformação é constante. A este comportamento denomina-se relaxação e é outro dos métodos utilizados em polímeros.

O teste de fluência e o teste de relaxação são testes característicos dos materiais poliméricos que permitem determinar a influência do tempo no comportamento mecânico. Porém, existem outros testes mais conhecidos e comuns a outros materiais, como o metal, tais como o teste de resistência à fratura ou o teste de compressão ou tração. [8]

3.1. Teste de Relaxação

Se o polímero for carregado com deformação constante, a tensão necessária para manter o valor da deformação constante irá diminuir com o tempo. Para um termoplástico ideal, como o PMMA, a tensão irá diminuir até atingir a nulidade. (Figura 7) A relaxação de tensões permite analisar a capacidade que o polímero tem de modificar a sua estrutura molecular de forma a atingir um estado de menor intensidade. [8]

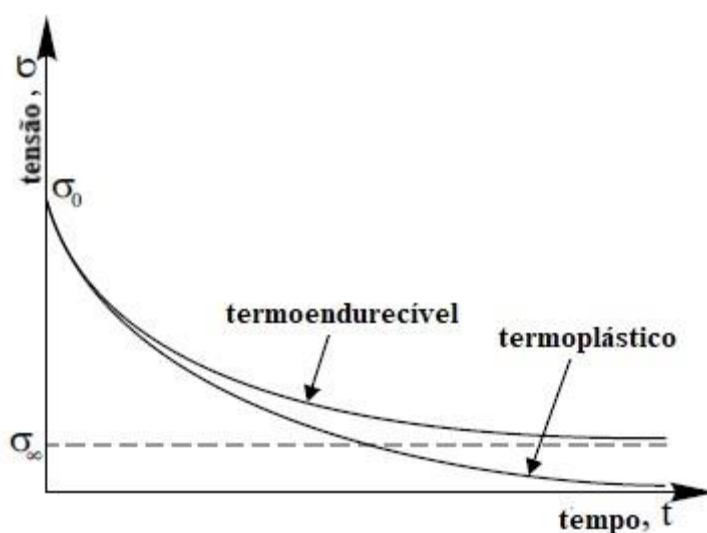


Figura 8 – Representação gráfica do teste de relaxação em materiais poliméricos (adaptado de [7])

A relação entre a tensão e a deformação, constante, denomina-se por Módulo de Relaxação do polímero e é apenas válido para deformação constante. Este é dado por:

$$E(t) = \frac{\sigma_E(t)}{\varepsilon_0} \quad (12)$$

Em que ε_0 é o valor de deformação constante e σ_E é a tensão uniaxial aplicada.

A partir desta experiência, é também possível obter o módulo de tensão de corte de relaxação, $G(t)$, dado por:

$$G(t) = \frac{\sigma(t)}{\gamma_0} \quad (13)$$

Em que γ_0 a constante de extensão de corte e σ_{21} é a tensão de corte [8].

3.2. Teste de Fluência

Um outro teste que pode ser feito em materiais viscoelásticos é o teste de fluência.

A fluência é um processo de deformação lenta e progressiva, num material, em tensão constante (carregamento constante) (Figura 8). [10]

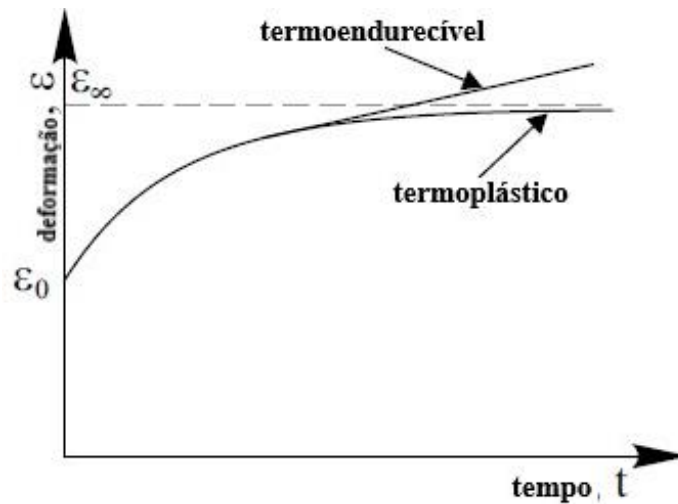


Figura 9 – Representação gráfica do teste de fluência em materiais poliméricos (adaptado de [7])

Neste teste, existe outra variável que resulta da resposta em extensão devido à entrada de tensão unitária em degrau chamada de complacência de fluência, $D(t)$, dado por [5]:

$$D(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_{E,0}} \quad (14)$$

Em que $\varepsilon(t)$ é a extensão provocada e $\sigma_{E,0}$ é a tensão aplicada.

Como resultado, $G(t)$ e $E(t)$ só podem ser calculados diretamente de ensaios em deformação constante, enquanto que $D(t)$ pode ser apenas calculado a partir de ensaios em tensão constante. [11]

3.3. Teste de Resistência à Fratura (K_{Ic})

3.3.1. K_I – Factor de Concentração de Tensões

O parâmetro K_I relaciona a magnitude da intensidade de carregamento aplicado no provete (material), a geometria da mesma e as dimensões da ponta da fenda. Determina a partir de que valor irá existir propagação instável de uma fenda pré-existente, chamando-se, neste caso, fator crítico de concentração de tensões, K_{Ic} . Este fator é uma propriedade do material [12].

Um único parâmetro de avaliação da resistência de um material à fratura é considerado insuficiente para caracterizar completamente a resposta de um sólido linear viscoelástico real. Por esta razão, considera-se outra medida denominada por integral J. Esta é uma propriedade relacionada com equilíbrio de energia e mede a taxa de libertação de energia elasto-plástica na propagação da fenda. Os valores de J, calculados para componentes com fendas, podem ser comparados com J_c , de modo a determinar a partir de qual valor de J é que existe propagação instável da fenda. J_c é propriedade do material, tal como K_c [13]. O integral J apenas é aplicável até ao início da extensão da fenda e não para a sua propagação.

Em condições de deformação plana e em comportamento linear viscoelástico, K_I está relacionado com o integral J viscoelástico (J_v) através de [2]:

$$J_v = \frac{K_I^2(1 - \nu^2)}{E} \quad (15)$$

Em que E_r é o módulo de elasticidade ou Módulo de Young e ν o coeficiente de Poisson.

Associado ao parâmetro K_I , é possível obter um valor crítico do deslocamento na ponta da fenda antes do crescimento da fenda instável. Este valor crítico denomina-se por CTOD (*Crack Tip Opening Displacement*) (Figura 9), δ_c , e pode ser escrito por [2]:

$$\delta_c = \frac{K_{Ic}^2}{\sigma_c \times E \times (t_p)} \quad (16)$$

Em que σ_c é a tensão de cedência do material, E é o Módulo de Young e t_p é o intervalo de tempo que a ponta da fenda demora a atingir o CTOD.

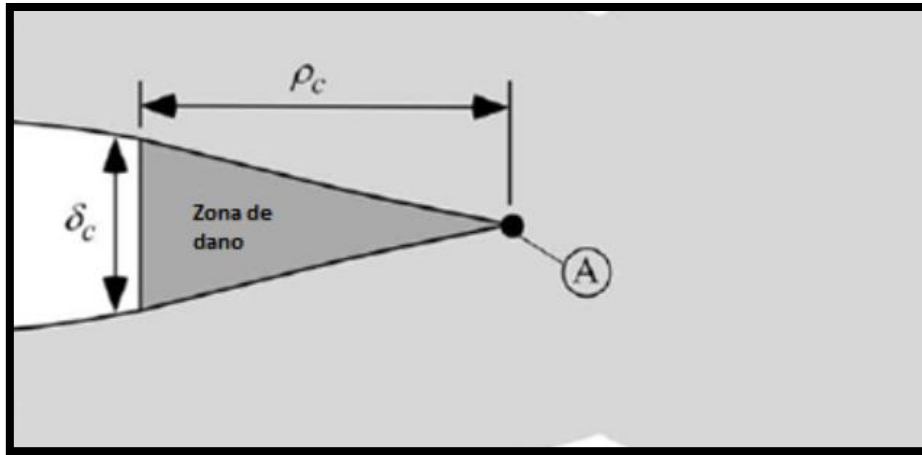


Figura 10 - Tamanho da fenda (ρ_c) e largura da fenda (CTOD) (adaptado de [2])

A expressão anterior (16) assume que o CTOD crítico é independente da velocidade de deformação. σ_c é a tensão crítica e t_ρ é o intervalo de tempo que a ponta da fenda demora a atingir o CTOD devido ao crescimento da fenda [2]:

$$t_\rho = \frac{\rho_c}{\dot{a}} \quad (17)$$

E \dot{a} é a velocidade de crescimento da fenda.

É possível obter uma resposta quantitativa da resistência à fratura de um polímero através do teste de resistência à fratura, obtendo-se os já referidos K_I e integral J. Tal como nos metais, os ensaios de fratura em polímeros necessitam de uma fenda inicial no provete, por onde irá propagar-se a fenda. Existem várias formas de efetuar uma pré-fissura, sendo que a principal feita forma é através de uma lâmina. Pré-fissuras feitas através de processo de fadiga demoram muito tempo e podem introduzir tensões residuais na ponta da fenda, devido ao efeito histerético de aquecimento.

Um dos primeiros passos é fazer um “encalque” no local onde se quer fazer a pré-fissura e, de seguida, pressiona-se uma lâmina contra esse “encalque” até ao comprimento desejado. Existem duas formas de fazê-lo:

1. Corte por lâmina tipo guilhotina – Pressiona-se a lâmina diretamente e perpendicularmente à espessura do provete, através de forças compressivas;
2. Corte por lâmina tipo serragem – a pré-fenda é feita através de um movimento tipo serragem paralelamente ao provete. Este modo evita tensões residuais na ponta da fenda.

Cayard. W [14] recomenda que se sigam os seguintes três passos de forma a minimizar dano e tensões residuais na realização da fenda:

1. Fabricação de uma pré-fissura convencional de acordo com a norma ASTM D 5045;

2. Estender essa pré-fissura através de uma lâmina de corte fina;
3. Melhorar essa fenda através de uma das formas mencionadas acima (corte por lâmina tipo guilhotina ou corte por lâmina tipo serragem)

O ângulo da fenda é muito menor que o ângulo da lâmina de corte pois existe o efeito de *pop in* que se propaga na pré-fissura. [14] Este feito de *pop-in* é uma descontinuidade que ocorre aquando do carregamento do polímero, caracterizado pela extensão repentina da falha e plastificação da mesma. [7]

3.3.1.1. Determinação de K_{Ic}

Segundo a norma ASTM 5045, os ensaios de K_{Ic} em polímeros são bastante semelhantes aos ensaios nos metais. Os dois métodos utilizados definem uma carga iniciação da fenda a partir da construção de uma secante inclinada 5%. A carga deverá ser 1.1 vezes menor que a máxima carga permitida no ensaio. A partir do comportamento obtido do ensaio, é possível determinar a carga máxima que poderá ser submetida até o material atingir instabilidade. (Figura 10) [2]

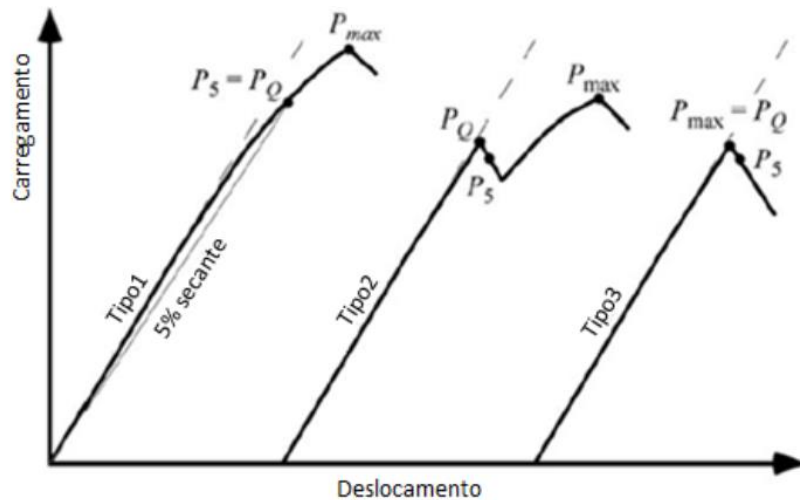


Figura 11 - Três tipos de comportamento num ensaio K_{Ic} (adaptado de [25])

O ensaio do Tipo 1 apresenta um comportamento dúctil, pois verifica-se que este é submetido até a um certo carregamento mais elevado que nos outros casos e é feito de forma relativamente linear. No ensaio do Tipo 2, ocorre o fenómeno de *pop-in*, uma plastificação instantânea, e o material continua a absorver alguma tensão até acabar por faturar. No Tipo 3, o material é maioritariamente frágil, ocorrendo a fratura a um carregamento mais baixo que nos outros casos.

Existem dois tipos de provetes normalizados:

- Provede CT – provede compacto de tração (Figura 11)
- Provede SENB – provede de flexão em três pontos (Figura 12)

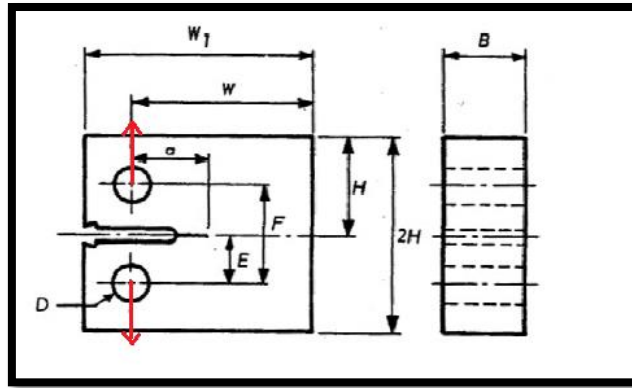


Figura 12 - Provete CT (adaptado de [7])

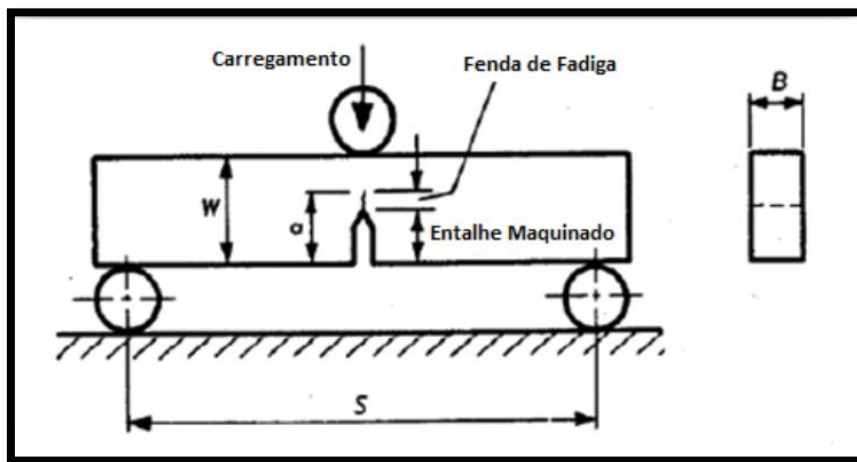


Figura 13 - Provete SENB (adaptado de [7])

O ensaio de K_{Ic} é apenas válido para condições de deformação plana. Assim, a espessura do provete deverá ser grande o suficiente para garantir que a zona plástica na ponta da fenda é muito reduzida e que se trata de uma deformação essencialmente elástica. Os cálculos para o ensaio iniciam-se com o K candidato (K_{cand}) que dependerá das dimensões do provete que irão garantir que o ensaio é válido [7]:

$$a \geq 2.5 \times \left(\frac{K_{cand}}{\sigma_{ced}} \right)^2 \quad (18)$$

$$B \geq 2.5 \times \left(\frac{K_{cand}}{\sigma_{ced}} \right)^2 \quad (19)$$

$$W - a \geq 2.5 \times \left(\frac{K_{cand}}{\sigma_{ced}} \right)^2 \quad (20)$$

σ_{ced} é a tensão de cedência do material.

Para calcular o parâmetro K_{cand} do provete CT, a expressão a utilizar é a seguinte:

$$K_{cand} = \frac{P}{B \times \sqrt{W}} \times f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (21)$$

Em que:

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{(2 + \frac{a}{W})((0.886 + 4.64 \times (\frac{a}{W}) - 13.32 (\frac{a}{W})^2 + 14.72 (\frac{a}{W})^3 - 5.6 (\frac{a}{W})^4))}{(1 - \frac{a}{W})^{\frac{3}{2}}} \quad (22)$$

Por outro lado, para calcular o parâmetro K_{cand} do provete SENB, a expressão a utilizar é a seguinte [7]:

$$K_I = \frac{P \times S}{B \times W^{\frac{3}{2}}} \times f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (23)$$

Em que:

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{3(\frac{a}{W})^{\frac{1}{2}}((0.886 + 4.64 \times (\frac{a}{W}) - 13.32 (\frac{a}{W})^2 + 14.72 (\frac{a}{W})^3 - 5.6 (\frac{a}{W})^4))}{(1 - \frac{a}{W})^{\frac{3}{2}}} \quad (24)$$

O comprimento da fenda deverá ser entre $0.4W$ e $0.55W$, a largura da fenda menor que $\frac{W}{10}$ e o ângulo de abertura de $\theta = 60^\circ$ (Figura 13.) [15]

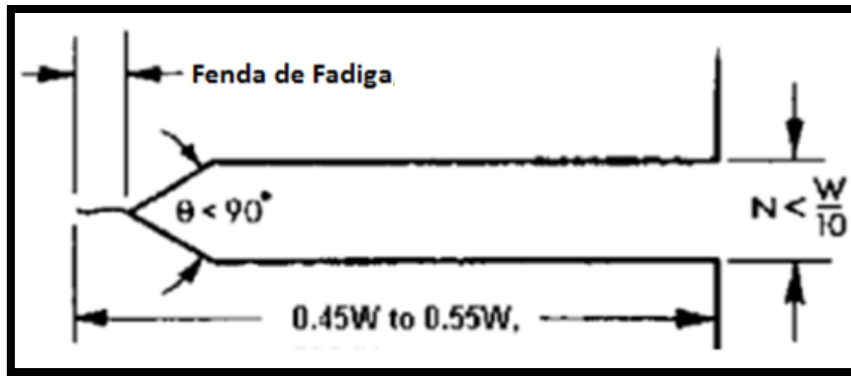


Figura 14 - Ângulo e comprimento da fenda (adaptado de [15])

Como se trata de materiais viscoelásticos, é necessário especificar a temperatura e a velocidade de deformação. Para garantir que se mantem como material frágil (condição necessária), é recomendado uma temperatura de ensaio de 23°C e uma velocidade de deformação de 10 mm/min . [15]

4. Fotoelasticidade

A fotoelasticidade é uma técnica experimental, não destrutiva, de análise de tensão e deformação. Esta técnica é bastante útil quando se trata de geometrias mais complexas do material em estudo. O nome “fotoelasticidade” reflete a natureza deste método: “foto” que indica a utilização de raios de luz e técnicas óticas, e “elasticidade” que indica o estudo do estado de deformação e tensão em materiais elásticos ou semi-elásticos [18].

O estudo fotoelástico tem por base uma propriedade típica de muitos polímeros transparentes denominada por birrefringência. Esta é uma propriedade ótica do material, associada à anisotropia, fazendo com que este possua diferentes índices de refração para diferentes direções de propagação da luz. [19]

Quando uma luz é apontada perpendicularmente para um material submetido a um carregamento, este exhibe um padrão de “franjas” que está relacionada com a diferença entre as tensões principais num plano normal à direção da propagação da luz. A luz é dividida em duas ondas, cada uma dela com o seu plano de vibração (plano de polarização). [6]

Certos polímeros não cristalinos transparentes são opticamente isotrópicos em condições normais, mas tornam-se birrefringentes quando são submetidos a algum carregamento (tensão). Este efeito mantém-se enquanto existe carregamento no material e desaparece quase instantaneamente quando se retiram as cargas. Este fenómeno é, deste modo, temporário e depende do estado de tensão ou deformação de cada ponto no material. [21]

A sensibilidade de um material fotoelástico, ou seja, a sua capacidade em apresentar bandas de tensão (“franjas”), é caracterizada pela sua constante de franja ou constante de tensão franja, f_{σ} , em N/mm/franja. Esta está relacionada com um valor de N , conhecido como o número de ordem de determinada franja, a espessura do provete, h , e, ainda, a diferença entre as tensões principais do plano normal à propagação da luz, em Pascal. A equação que envolve estes parâmetros chama-se Lei de Tensão-Ótica dada por [18]:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{Nf_{\sigma}}{h} \quad (27)$$

A Lei Tensão-Ótica permite obter a diferença de tensões principais, sabendo a constante de franja e número de ordem de franja, para determinado valor de carregamento. N é sempre positivo e pode ter qualquer valor a partir de 0.

A Lei Tensão-Ótica é particularmente útil quando o material está sob o efeito de carregamento e é utilizado um dispositivo portátil denominado por polariscópio. Em determinadas disposições dos filtros do polariscópio, é possível observar dois tipos de padrão: isocromáticas e isoclínicas. Estes padrões estão relacionados com a diferença entre as tensões principais e com as suas direções, respetivamente. A diferença de tensão num ponto em determinado material é obtida, deste modo, a partir de uma correta avaliação quantitativa dos vários valores intervenientes.

4.1. Efeito ótico de carregamento num material

Em qualquer modelo transparente bidimensional, existem duas tensões principais que possuem um valor máximo e mínimo para qualquer ponto e os seus valores não se alteram com a espessura do material. [22]

A retardação (ou desaceleração) relativa é diretamente proporcional à diferença de tensões principais e é vista como a diferença de fase entre duas ondas de luz polarizadas (uma “retardada” em relação a outra) que atravessam o material nos planos das tensões principais. A velocidade de propagação das duas componentes de luz que atravessam o material, nos planos das tensões principais, variam ligeiramente, fazendo com que a sua diferença de velocidades dependa da diferença entre os valores das duas tensões principais. Esta diferença é o dobro da tensão de corte máxima [22]:

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (28)$$

Desta forma, a retardação relativa é diretamente proporcional à tensão de corte máxima [22].

Na maioria dos materiais fotoelásticos, a retardação relativa é praticamente constante para quase todos os comprimentos de onda, transformando a Lei da Tensão-Ótica na seguinte forma [22]:

$$R = C h(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (29)$$

Em que R é a retardação relativa que emerge do modelo, C é o coeficiente de tensão-ótica (propriedade do material), h é a espessura do material e σ_1 e σ_2 são as tensões principais da direção 1 e da direção 2, respetivamente.

À medida que se aumenta o carregamento no material, a retardação relativa aumenta e a diferença de fase entre as duas ondas também se altera. Chega a um ponto que estas duas ondas estão exatamente na mesma fase e permitem que haja transmissão máxima de luz. Aumentando mais um pouco a retardação relativa, estas duas ondas já estão um pouco mais desfasadas e produzem pouca transmissão de luz. Se estiverem completamente desfasadas entre si, podem produzir extinção de luz. Desta forma, é possível controlar a transmissão de luz pretendida. [22]

Sabendo o comprimento de onda da luz monocromática que se utiliza, a retardação relativa pode ser calculada e, conseqüentemente, é possível saber a diferença entre tensões principais, de acordo com a expressão já mencionada. Se se utilizar luz branca, a extinção da luz ocorre seletivamente, resultando em várias bandas coloridas chamadas de isocromáticas (iso = igual, cromático = várias cores). [2] Caso se utilize luz monocromática, como se trata de apenas um comprimento de luz, a constante de franja pode também ser dada por:

$$f_{\sigma} = \frac{\lambda}{C} \quad (30)$$

Em que λ é o comprimento de onda e C é o coeficiente de tensão-ótica.

É usual utilizar luz monocromática no polariscópio circular quando se faz estudo de tensões pois as bandas pretas indicam monocromáticas e, nesta disposição, não existem isoclínicas. No entanto, para o caso da utilização de luz branca, é possível fazer conversão para o número de ordem de franja, que tem associado um comprimento de onda para cada cor da franja. [22]

Segundo os autores *Heywood, Silverleaf e Blackburn* [22], o polariscópio a ser utilizado deverá ter preferencialmente uma luz monocromática e luz branca. A luz branca deverá ser utilizada para identificar as franjas de ordem zero (franjas pretas) e para examinar isoclínicas. A luz monocromática deve ser utilizada para fazer contagem do número de ordem das franjas.

A máxima tensão no furo é calculada tendo em conta o número de ordem máxima de franja que é possível identificar.

4.2. Luz (onda eletromagnética)

Segundo a teoria de Maxwell (1831–1879), a luz é formada por uma série de ondas eletromagnéticas, divididas por um campo elétrico (vector E) e por um campo magnético (vector M), que se propagam com a mesma velocidade no vazio [23]. Os dois vetores estão em fase e perpendiculares entre si e, por isso, estas podem ser representadas por uma onda transversal. (Figura 15)

A teoria da fotoelasticidade é baseada na natureza da onda de luz, sendo esta uma onda sinusoidal eletromagnética que possui amplitude “ a ”, comprimento de onda λ , propagando-se em “ z ” com velocidade “ v ” (Figura 15).

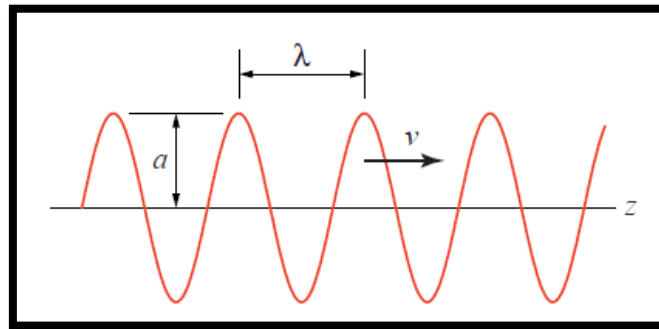


Figura 15 – Representação de uma onda de luz no plano

O número da onda, ξ , velocidade angular, ω , e frequência, f , são, respectivamente, representados a seguinte forma:

$$\xi = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (31)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (32)$$

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad (33)$$

Em que λ é o comprimento de onda, T é o período e v é a velocidade de propagação. [18]

Desta forma, no caso do estudo de uma onda unidimensional, a magnitude da luz (vector E, elétrico) é dada por:

$$E = a \cos(\xi z - \omega t) \quad (34)$$

Em que a é a amplitude de onda.

A velocidade da luz no vácuo é, aproximadamente, 3×10^8 m/s. O quadro seguinte (Tabela 2) apresenta a relação da frequência e do comprimento de onda, por exemplo, em relação à luz de cor violeta, verde e vermelha.

Tabela 2 – Tabela representativa da velocidade, comprimento de onda e frequência para algumas cores [adaptado de [18]]

Cor	Velocidade v (Mm/s)	Comprimento de onda λ (nm)	Frequência f (THz)
Violeta	299.79	400	750
Verde	299.79	550	550
Vermelho	299.79	700	430

4.3. Refração e Reflexão

Um dos efeitos que ocorre quando a luz passa num meio, seja este líquido, sólido ou gasoso, é a refração da luz. Este fenómeno consiste na alteração da direção de propagação de uma onda eletromagnética, quando esta atravessa determinado meio com índice de refração diferente do que o que originou a fonte de luz [18].

A luz, em qualquer outro meio exceto ser o vazio, tem a sua velocidade sempre menor que 3×10^8 m/s. Quando a luz passa por um determinado meio, este diminui a sua velocidade até um valor denominado por v_1 :

$$v_1 = \frac{v}{n_1} \quad (35)$$

Em que n_1 é o índice de refração do meio e v é a velocidade da luz no vazio. Esta é a expressão fundamental do efeito da refração da luz.

Ao atravessar determinado meio transparente, surgindo de outro meio também transparente, com índices de refração diferentes, a banda de luz é dividida num raio refletido e noutro refratado. O ângulo de refração depende dos índices de refração dos materiais envolvidos (Figura 16) [18]:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{n_1}{n_2} \quad (36)$$

Em que n_1 é o índice de refração do meio 1 e o n_2 é o índice de refração do meio 2. α é o ângulo de incidência e γ o ângulo de refração. [23]

No caso da reflexão, este também é um fenómeno de alteração de direção da luz entre dois meios diferentes, mas este é reproduzido e retornado no meio que originou a fonte de luz. O ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão, ou seja:

$$\alpha = \beta \quad (37)$$

Com β como o ângulo de reflexão (Figura 16). [18]

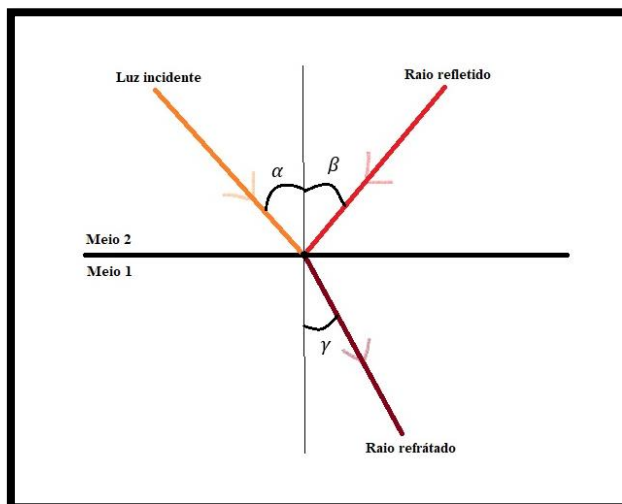


Figura 16 - Reflexão e refração na interface entre dois meios

Considera-se t_2 como o tempo em que a luz necessita para propagar uma espessura h de determinado meio e é dado por:

$$t_2 = \frac{h}{v_2} \quad (38)$$

Com v_2 a velocidade da luz no meio em questão (meio 2).

Se duas ondas equivalentes (com frequências iguais) passarem na mesma espessura h em que os índices de refração de dois meios denominam-se por n_1 e n_2 e $n_2 > n_1$, a diferença temporal entre a transição de um com o outro ($t_2 - t_1$), é:

$$t_2 - t_1 = \frac{h}{v_2} - \frac{h}{v_1} = \frac{h}{v} (n_2 - n_1) \quad (39)$$

A diferença de fase (“retardação”) entre as duas ondas quando é refletida será linear e igual a:

$$\delta = v(t_2 - t_1) = h(n_2 - n_1) \quad (40)$$

Um material óticamente isotrópico e homogêneo tem o mesmo índice de refração em todas as direções e uma luz polarizada propaga-se com a mesma velocidade também em todas as direções. [18]

4.4. Polarização da Luz (Eletromagnética)

Grande parte das fontes de luz têm na sua constituição emissores que estão aleatoriamente orientados. No entanto, se o vetor de luz for forçado a seguir determinada trajetória, estando este vetor perpendicular à sua direção de propagação, essa luz denomina-se por polarizada. [21]

Vários tipos de polarização podem ocorrer. Serão brevemente referidas a luz polarizada no plano e a luz polarizada circularmente.

Se a amplitude de todos os vetores da onda de luz estiver restrita a um plano apenas, pode-se dizer que a luz é polarizada no plano. Esses vetores da amplitude estarão associados a um plano, chamado de plano de polarização (Figura 17). [18] Este tipo de luz é utilizado no polariscópio plano.

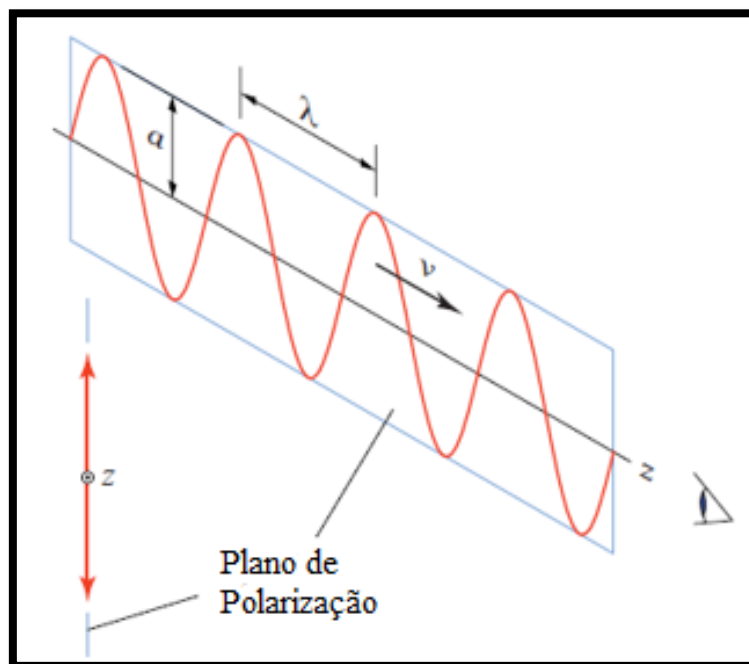


Figura 17 – Representação da luz polarizada no plano (adaptado de [17])

A luz polarizada circularmente é considerada um caso específico da luz polarizada elípticamente. Esta é habitualmente criada combinando ondas polarizadas perpendiculares no plano com amplitudes iguais, mas desfasadas exatamente em $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda ($\delta = \frac{\lambda}{4}$). A onda resultante é uma onda rotativa com amplitude constante e frequência angular constante. (Figura 18) [18]. Este tipo de luz é utilizado no polariscópio circular.

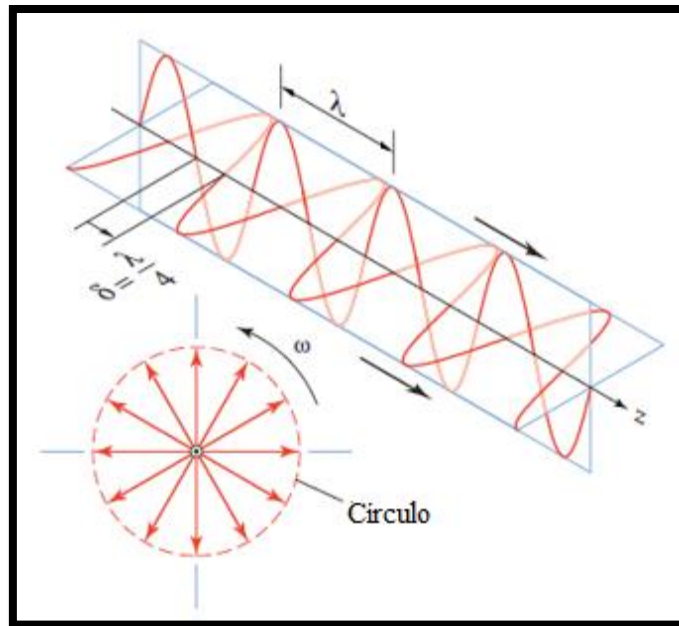


Figura 18 - Representação da luz polarizada circularmente (adaptado de [17])

4.5. Propriedade birrefringente

Alguns materiais transparentes, nomeadamente os cristalinos, possuem a propriedade de dividir determinada onda de luz em duas componentes polarizadas. Cada uma dessas componentes está associada a um plano que é perpendicular entre si e propagam com velocidades diferentes. O material, quando submetido a um carregamento, torna-se uma placa de onda temporária. Este fenómeno chama-se dupla refração ou birrefringência. [6]

O índice de refração n_1 de uma luz com um vector amplitude na direcção da tensão principal máxima σ_1 é dado por:

$$n_1 - n_0 = c_1\sigma_1 + c_2(\sigma_2 + \sigma_3) \quad (41)$$

Em que c_1 e c_2 são denominados por coeficientes de tensão ótica. n_0 é o índice de refração quando o material não está carregado e é independente da orientação. Se a birrefringência ocorrer, $c_1 \neq c_2$.

Tal como n_1 , o índice de refração n_2 de uma luz com vector amplitude da direcção da tensão principal máxima σ_2 é dado por:

$$n_2 - n_0 = c_1\sigma_2 + c_2(\sigma_1 + \sigma_3) \quad (45)$$

E no caso do índice de refração n_3 , para uma luz com vector amplitude na direcção fora do plano, ou seja, na direcção de σ_3 , fica:

$$n_3 - n_0 = c_1\sigma_3 + c_2(\sigma_1 + \sigma_2) \quad (46)$$

As equações 44, 45 e 46 são chamadas também como as equações de Maxwell. [18]

É possível criar uma luz com determinado vector amplitude através das duas componentes, estando estas alinhadas com os eixos das tensões principais σ_1 e σ_2 . Se uma luz com vector amplitude na direcção do eixo σ_2 propagar no material com velocidade menor que caso o seu vector amplitude estivesse na direcção do eixo σ_1 , então $n_1 < n_2$. considerando que a diferença de fase, δ , entre as componentes ortogonais M_1 e M_2 (Figura 19) da onda de luz que atravessou o material de baixo para cima em fase e foram alinhadas com as direcções das tensões principais. As equações anteriores ficam assim da seguinte forma [18]:

$$n_2 - n_1 = (c_2 - c_1) + (\sigma_1 - \sigma_2) = c(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (47)$$

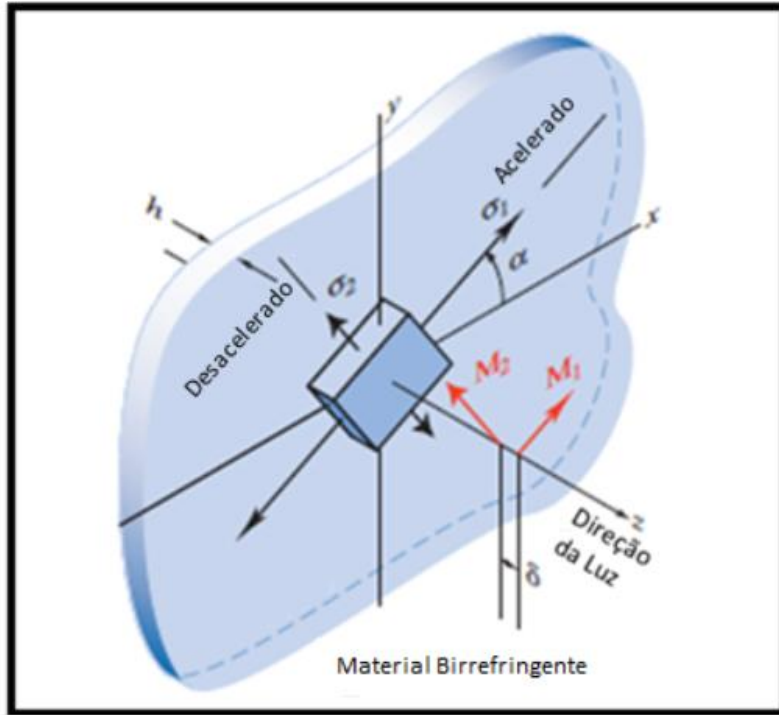


Figura 19 - Efeito birrefringente (retirado de [18])

Em que c , ou C , é chamado de coeficiente relativo de tensão ótica, que é uma propriedade do material. É importante referir que a na equação 47, a diferença $n_2 - n_1$ é independente de σ_3 . Os resultados que serão apresentados posteriormente envolvem um valor arbitrado de σ_3 porque não é necessário que o material se encontre em tensão plana para apresentar este comportamento birrefringente [18].

A diferença de fase é dada por:

$$\delta = v(t_2 - t_1) = h(n_2 - n_1) \quad (48)$$

Através da equação 47 e 48, a diferença de fase δ entre M_1 e M_2 é:

$$\delta = h(n_2 - n_1) = hc(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (49)$$

Em que h é a espessura do material em estudo por onde se propaga a luz.

A diferença de fase pode ser escrita em termos de desaceleração relativa (R), ou seja:

$$N = \frac{R}{2\pi} = \frac{\delta}{\lambda} = \frac{hc(\sigma_1 - \sigma_2)}{\lambda} = h \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)}{f_\sigma} \quad (50)$$

Em que N é o número de ordem de franja.

Dando, assim, origem à Lei de Tensão-Ótica.

f_σ é, como já foi referido, a constante de franja do material. O coeficiente de tensão ótica relativa (c ou C) é considerada dependente do comprimento de onda da luz, λ . Deste modo, f_σ é igual a:

$$f_\sigma = \frac{\lambda}{C} \quad (51)$$

Desta forma, f_σ nunca poderá ser constante se a luz for composta por várias cores. [18]

4.6. Análise de franjas de fotoelasticidade

A fotoelasticidade permite obter a diferença entre as tensões principais e o seu valor individual em determinado ponto do material, como também permite obter o estado de deformação. Irá ser focado a análise do estado de tensão do material.

4.6.1. Técnicas utilizadas para estudo bidimensional

- **Identificação de Isoclínicas**

Considerando “ α ” como o ângulo que a tensão principal máxima faz com a direção de polarização do analisador, esta disposição irá resultar em que todas as regiões do provete, onde as direções das tensões principais estão alinhadas com o polarizador e com o analisador, serão escuras. O lugar geométrico destes pontos denomina-se por isoclínica pois a orientação, ou inclinação, da direção da tensão principal máxima é a mesma em qualquer ponto desse lugar geométrico. Ao girar, em conjunto, o analisador e o polarizador (para ficarem os dois mutuamente cruzados), é possível mapear no plano várias isoclínicas com várias direções da diferença de tensões principais. [21] Em luz branca, as isoclínicas aparecem a preto (Figura 21).

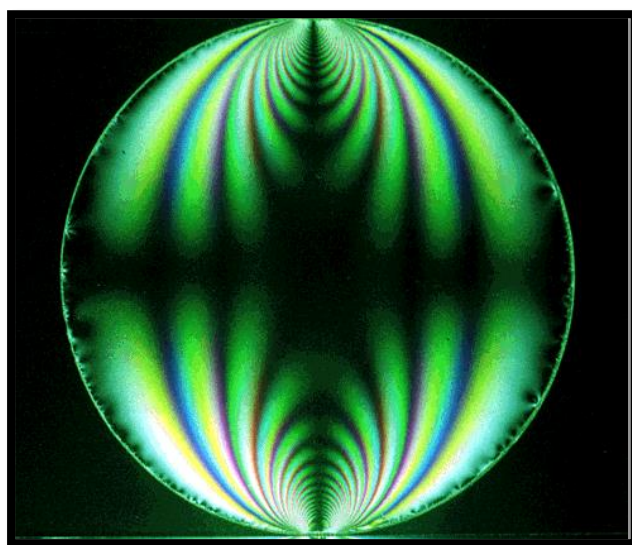


Figura 20 – Exemplo de Isoclínicas num disco em compressão (retirado de [18])

- **Identificação de Isocromáticas**

O número n denomina-se por “ordem” da isocromática. Se se utilizar uma luz monocromática, o valor do comprimento de onda é único e destaca-se uma isocromática de ordem elevada. Se se utilizar uma luz branca, o lugar geométrico a partir do qual a intensidade da luz diminui, é função do comprimento de onda e as isocromáticas identificam-se facilmente de forma visual pela cor que apresentam (Figura 22).

Por exemplo, o lugar geométrico onde a luz vermelha desaparece não é o mesmo para uma luz verde ou azul, ou seja, a luz verde ou azul irá aparecer, quer a luz vermelha apareça ou não. As franjas coloridas isocromáticas são devidas à variação do valor da retardação (desaceleração) relativa em diferentes pontos do modelo, o que causa que cada

cor seja extinguida de acordo com o seu comprimento de onda. Quando a retardação relativa é zero, a luz extingue-se e torna-se tudo preto. Essa é a franja de ordem 1 (preta). [21]

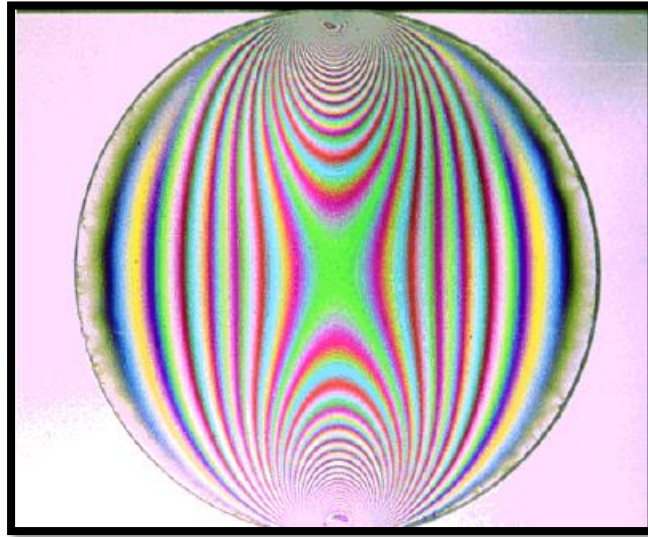


Figura 21 – Exemplo de isocromáticos num disco em compressão (retirado de [18])

- **Técnicas de Compensação**

As técnicas de compensação referem-se a qualquer técnica que permita determinar ordens de franja fracionárias. Muitas vezes, existem situações em que o modelo em carregamento não fornece informação suficiente em relação ao número de ordem de franja para uma análise completa e gráfica. Nesses casos, pode-se adotar uma das técnicas de compensação para determinar o número de ordem de franja fracionário em determinado ponto em estudo do modelo. Um dos métodos mais conhecidos é o método de Tardy.

O método de Tardy tem a vantagem de não ser necessário qualquer material extra para além do analisador do polariscópio que serve de equipamento compensador. Em primeiro lugar, utiliza-se o polariscópio plano para se identificar as isoclínicas, já que estas permitem determinar a direção das tensões principais no ponto de interesse. Depois, transforma-se o polariscópio plano em polariscópio circular, adicionando as duas placas de $\frac{1}{4}$ de onda, mantendo o polarizador no mesmo ângulo e as outras componentes corretamente colocadas. O analisador é rodado até uma franja passar no ponto de interesse no material, sendo essa rotação associada à retardação fracionária utilizando o cálculo Jones. [21]

O número de ordem fracionada da franja é igual a:

$$\delta_N = \pm \frac{|\beta|}{180^\circ} \quad (45)$$

Em que β é o ângulo de rotação do analisador. [20]

- **Separação das tensões principais**

A equação fundamental da fotoelasticidade permite determinar a diferença das tensões principais de um ponto no material se se souber o número de ordem de franja, a espessura e a constante de franja f_{σ} . Uma forma de obter alguma informação sobre as mesmas é identificar a localização das isoclínicas e analisar como elas variam angularmente. Contudo, não se obtém o valor individual de cada tensão. Em pontos mais interiores no material, só é mesmo possível determinar a diferença entre as tensões principais e as suas direções [23].

Os métodos utilizados para determinar a diferença das tensões, são [23]:

- Método baseado nas equações de equilíbrio;
- Método baseado nas equações de compatibilidade nas tensões
- Métodos que aplicam a lei de Hooke
- Método de incidência oblíqua

É importante salientar que, aquando da análise fotoelástica de um furo, poderão aparecer umas franjas escuras à volta desse furo e não deverão ser confundidas com isoclínicas ou isocromáticas. Essas franjas são consideradas indesejadas pois são provocadas pela operação de furação desse furo no material, que criam tensões residuais e plastificação do material (Figura 23). Os materiais fotoelásticos são bastante sensíveis ao efeito térmico, tanto que é suficiente pousar uma mão no material para que o aquecimento do material provoque alteração no padrão das franjas. [22]

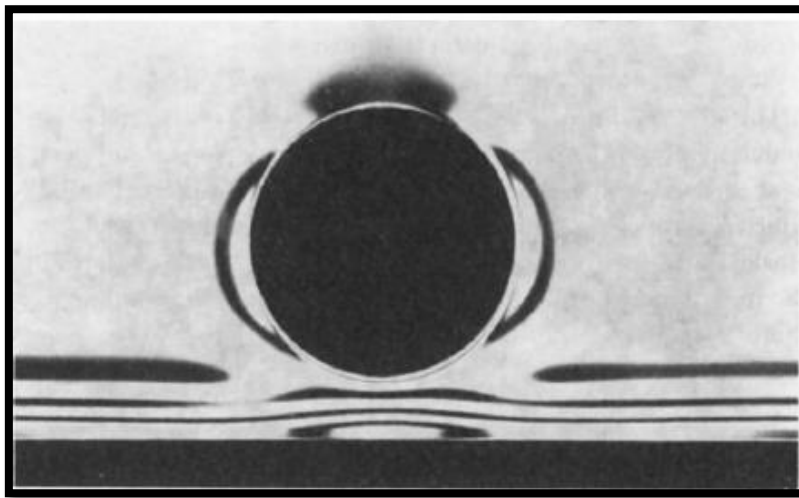


Figura 22 - Exemplo do efeito de furação em polímeros (Retirado de [22])

4.7. Princípio de Saint Venant

O princípio de Saint Venant torna-se particularmente importante no estudo fotoelástico tendo em conta que este método demonstra visualmente este princípio. Considerando o efeito do carregamento aplicado num material, St. Venant afirmou que a distribuição real das forças aplicadas numa área, apenas afetam o estado de tensão na fronteira imediatamente a seguir. As tensões e extensões em locais que estão suficientemente longe de locais de aplicação de carregamento, dependem apenas na resultante estática do carregamento e não na sua distribuição. [22]

5. Calibração

A análise da resposta do estado de tensão ao longo de um carregamento é uma análise bastante utilizada. De forma a obter uma distribuição de tensão o mais correta possível, é necessário fazer calibração do material para obter a sua constante de franja. Esta sempre depende de material para material, mesmo que sejam do mesmo “material”. Isto é, apesar de dois materiais tecnicamente serem ambos, por exemplo, PMMA, podem ter na constituição diferentes quantidades de componentes ou o seu processo de fabrico foi diferente (ser extrudido ou vazado, por exemplo) [18]. Os dois métodos mais utilizados de calibração é o disco em compressão e o teste uniaxial [24].

No teste do disco em compressão diametral, considera-se um carregamento aplicado P (Figura 20).

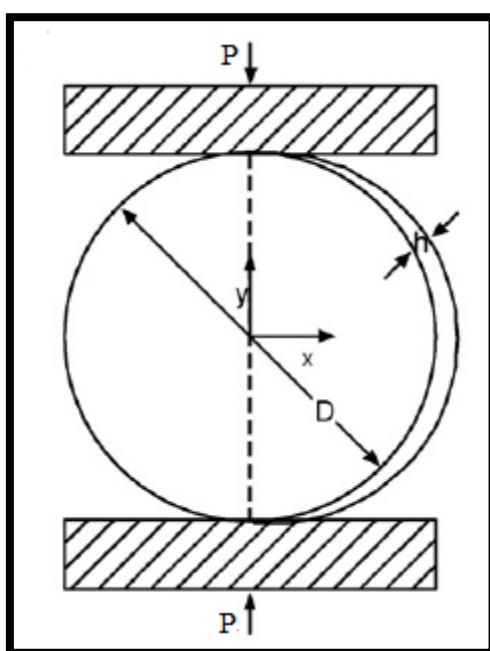


Figura 23 – Disco em compressão (adaptado de [25])

f_σ é igual a:

$$f_\sigma = \frac{8}{\pi D} \left(\frac{P}{N} \right) \quad (41)$$

Em que N é a ordem de franja e D é o diâmetro do disco. O valor de P/N pode ser determinado obtendo várias ordens de franja para diferentes carregamentos, criando uma curva. É feita uma contagem do número de ordem a partir de determinado carregamento. O declive dessa recta é o valor de P/N. Como se trata de um teste uniaxial, o estudo é feito de forma unidimensional, ou seja, $\sigma_2=0$. [24]

O teste de tração uniaxial admite que:

$$\sigma_1 = \frac{P}{W h} \quad (42)$$

E que:

$$\sigma_2 = 0 \quad (43)$$

Em que W é a largura do provete e h é a espessura do mesmo.

Deste modo, f_σ é igual a:

$$f_\sigma = \frac{P}{W N} \quad (44)$$

A constante de franja pode ser calculada obtendo também o declive da curva entre o carregamento e o número de ordem de franja. Materiais muito birrefringentes irão apresentar valores baixos de constante de franja, já que o valor das tensões necessárias para produzir um valor de N será baixo.

5.1. Influência da espessura do material

Se dois provetes com espessuras diferentes, mas iguais em todos os outros aspetos forem carregados com a mesma carga, a número de ordem de uma franja será a mesma no mesmo local dos dois modelos. Esta situação deve-se ao facto que o modelo com espessura superior tem uma distribuição mais ampla da tensão, ou seja, quanto maior a espessura, maior é a distribuição de tensão, fazendo com que a retardação relativa não se altere. Esta relação só é possível ser feita quando os dois modelos se encontrarem no domínio elástico. É possível observar esta relação a partir da equação (25) em que a ordem de franja é diretamente proporcional ao produto da diferença de tensões principais e espessura do modelo. [22]

Os materiais fotoelásticos ou birrefringentes possuem tensões residuais devidas ao processo de furação como consequência da temperatura elevada que provoca plastificação nos bordos do furo e é complicado eliminar estas tensões indesejadas. Como consequência, este processo de plastificação irá resultar em franjas indesejadas no estudo de tensões. Estas franjas serão tanto maiores quanto a espessura do material. Desta forma, é aconselhável maquinar o provete com a espessura mais fina possível. [22]

Pelo que já foi mencionado, é possível obter a espessura ideal para atenuar as franjas resultantes das tensões residuais. Um provete com pouca espessura tem a vantagem de estar mais próxima do caso de deformação plana e é menos provável que haja algo como um não paralelismo na incidência da luz no polariscópio. Esta previsão de espessura tem em conta a tensão máxima admissível para o material em causa e também no facto de existir um número elevado de franjas para que o erro na sua contagem seja insignificante. Essa espessura é obtida a partir da equação 27, assumindo $\sigma_2 = 0$, tem-se que:

$$\sigma_1 = \frac{Nf_\sigma}{h} \quad (46)$$

σ_1 é a tensão máxima admissível do material e N irá ser o número de ordem de franja mínimo que não envolva muito erro na sua contagem, por exemplo, entre N= 2 até N= 10 [22]

6. Polariscópio

O polariscópio é um equipamento ótico que permite verificar a propriedade birrefringente do material em estudo. Consiste numa fonte de luz, um polarizador, uma placa de um quarto de onda, o material a estudar, outra placa de um quarto de onda e um analisador, respetivamente. Existem dois tipos de polariscópio e as suas características estão associadas ao tipo de luz polarizada utilizada em cada um. Estas podem ser [18]:

- Polariscópio plano
- Polariscópio circular

Os componentes básicos de um polariscópio resumem-se, portanto, a um polarizador e uma placa de onda.

6.1. Polarizador

Um polarizador é um elemento que converte luz não polarizada em luz polarizada num plano. Este pode ainda ser plano ou linear.

Na Figura 24, é representado um modelo do polariscópio plano. Quando o raio de luz cruza o polarizador, este divide-se em duas componentes: uma paralela à direção de polarização do polarizador e outra perpendicular à direção de polarização do polarizador. A componente paralela consegue atravessar o polarizador e é transmitida, mas a componente perpendicular é absorvida. A luz que passa é polarizada no plano na direção de polarização. Um polarizador tem sempre um aspeto escuro pois metade da luz incidente é absorvida [18].

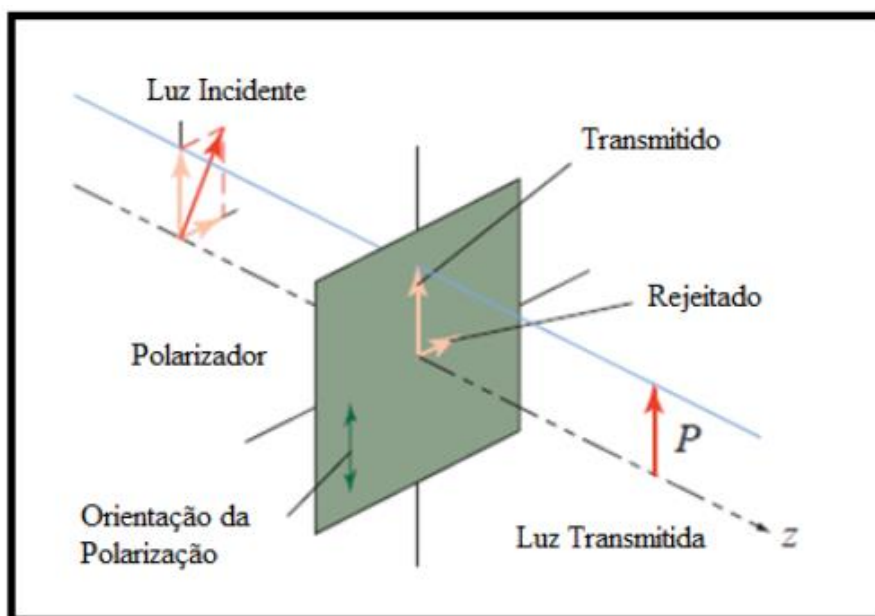


Figura 24 – Polarizador (adaptado de [18])

6.2. Placa de Onda

Uma placa de onda também divide a onda incidente em duas, como o polarizador, mas em vez de rejeitar uma delas (absorção), as duas são transmitidas e em diferentes velocidades. Esta placa é feita de material birrefringente ou de refração dupla, tema já abordado.

Irão assim existir dois eixos: o acelerado e o desacelerado (retardado). Na Figura 25, o eixo acelerado da placa de onda faz um ângulo α em relação à direção do referencial escolhido. A componente f da luz incidente com o vetor amplitude, também na mesma direção, é desacelerada enquanto atravessa a placa de onda. No entanto, a componente ortogonal “ s ” é desacelerada até ao ponto que resulta num desfasamento δ entre a componente acelerada e a componente desacelerada.

As placas de onda podem ser permanentes ou temporárias. Uma placa permanente tem um eixo acelerado com orientação α e um outro eixo fixo desacelerado relativo, ou seja, de retardação relativa, chamado de Δ . Por outro lado, uma placa temporária consegue produzir refração dupla a partir de um simples carregamento. Os materiais fotoelásticos são considerados placas de onda temporárias. [18]

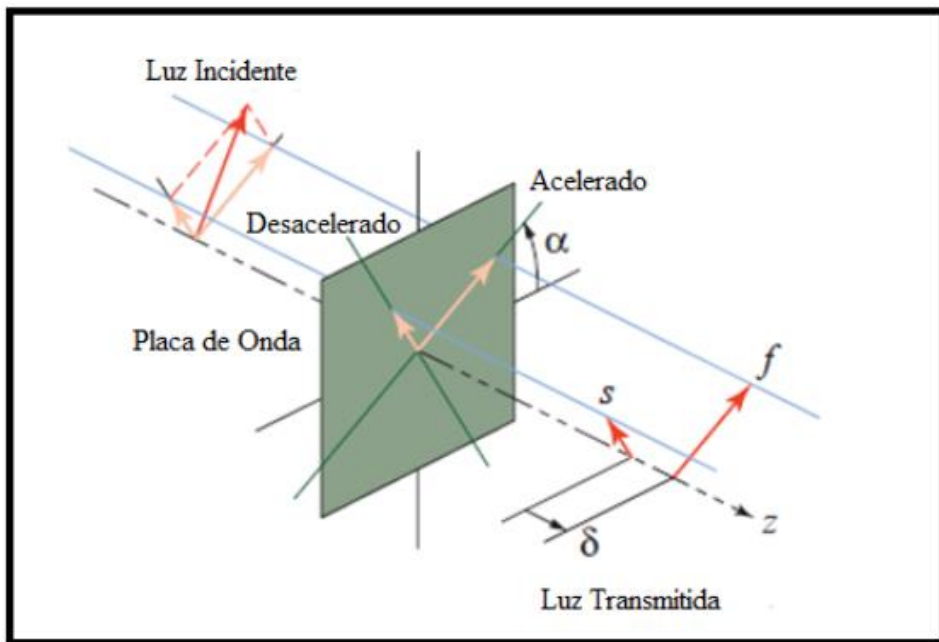


Figura 25 – Placa de onda (retirado de [18])

6.3. Placa de quarto de onda

Uma placa de quarto de onda é uma placa de onda transparente permanente que induz um desfasamento, também chamada de retardação relativa, Δ , ou R , igual a $\lambda/4$, entre duas componentes de onda polarizadas e perpendiculares entre si [21], sendo λ é comprimento de onda da luz. Estas são consideradas placas “desaceleradoras” pelo desfasamento que produzem.

Na Figura 26, assume-se que o vetor amplitude da luz incidente se encontra no plano vertical e o eixo acelerado da placa de quarto de onda está orientando 45° relativamente ao eixo horizontal. As componentes f e s têm a mesma amplitude e estão separadas por um quarto do comprimento de onda. O desfasamento δ é induzido por qualquer placa de onda permanente e é geralmente independente do comprimento de onda λ .

As placas de um quarto de onda são consideradas imperfeitas pois a desaceleração (retardação) é expressa como uma fração do comprimento de onda dependente deste. A presença desta placa é essencial para a produção de luz polarizada circularmente, no polariscópio circular. [18]

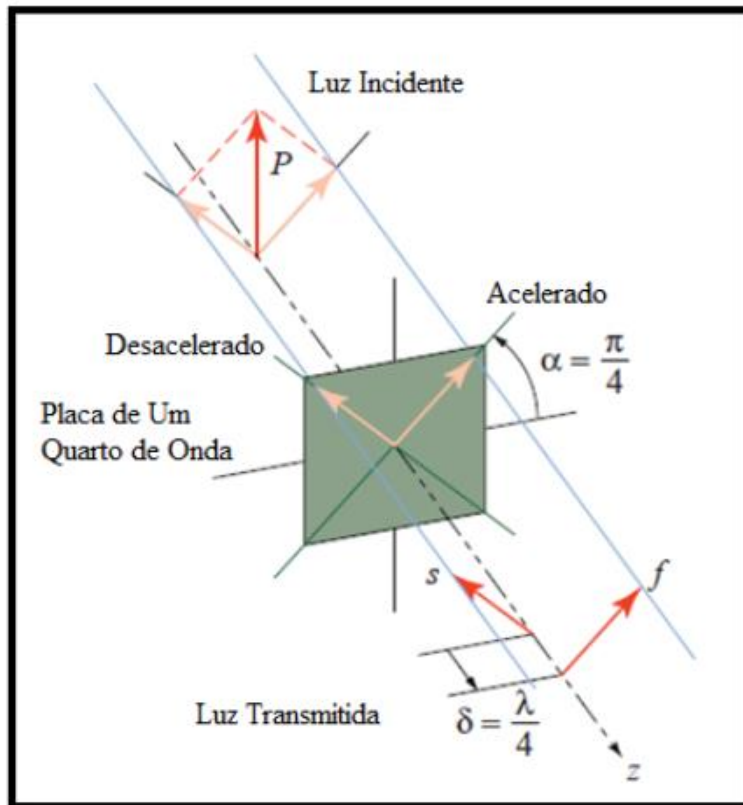


Figura 26 – Placa de um quarto de onda (adaptado de [18])

6.4. Polariscópio Plano

O polariscópio plano permite obter isocromáticas e isoclínicas. Uma forma de as diferenciar é usar luz branca pois as isocromáticas aparecerão com cor, com exceção da cor preta, e as isoclínicas serão de ordem zero, ou seja, pretas.

Este consiste numa fonte de luz, um polarizador, o material a analisar e um analisador que está na direção perpendicular ao polarizador (Figura 27) [19].

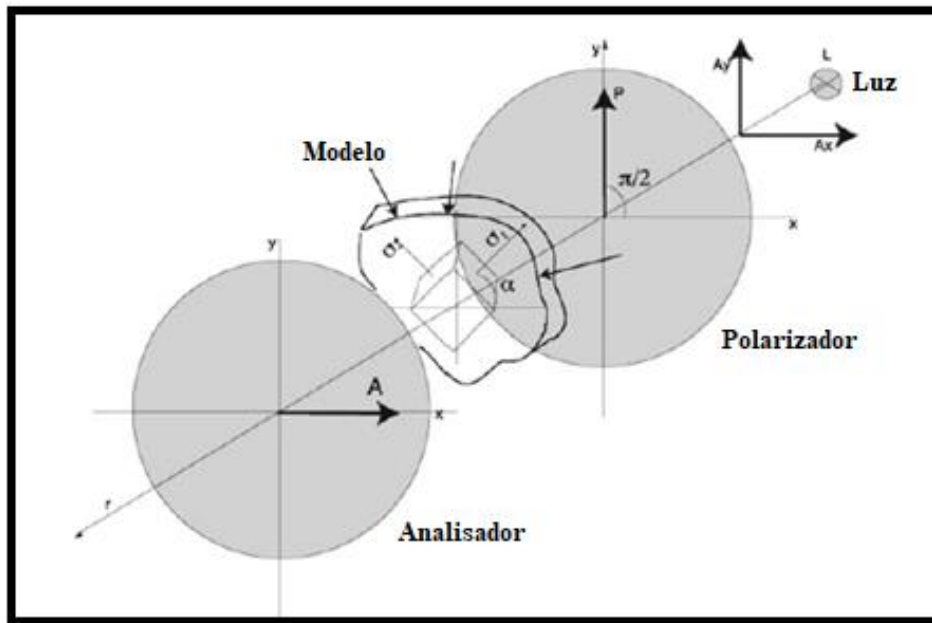


Figura 27 – Exemplo de disposição do Polariscópio plano (adaptado de [6])

Quando a onda abandona o analisador, o analisador encontra-se sempre perpendicular ao polarizador. Como se assume que o polarizador tem como orientação vertical, o analisador terá, neste caso, uma orientação horizontal.

Ignorando o facto de existir uma pequena redução de intensidade da luz devido à falta de alguma transparência no material, a quantidade de luz que emerge do analisador não irá depender do material. Irá apenas depender da posição do analisador e do polarizador, ou seja, se estão paralelos (campo escuro), onde há uma extinção da luz, ou se estão cruzados (campo iluminado), onde há passagem máxima da luz. [22]

6.5. Polariscópio Circular

O polariscópio circular consiste numa fonte de luz, um polarizador, uma placa de um quarto de onda, o modelo a estudar, uma segunda placa de um quarto de onda e um analisador (Figura 26).

O polariscópio circular pode ser adaptado em duas disposições: o campo escuro (extinção de luz) e o campo iluminado (transmissão total de luz), como será elucidado na seção seguinte.

Este tipo de disposição, o circular, permite obter apenas isocromáticas, eliminando as isoclínicas [18].

6.5.1. Polariscópio Circular – Campo escuro

Neste tipo de polariscópio, e de forma a obter um campo escuro há duas disposições possíveis:

1. Placas de um quarto de onda cruzado e analisador e polarizador cruzados (Figura 28)
2. Placas de um quarto de onda paralelo e analisador e polarizador paralelos.

A disposição mais aconselhável é a número 1, placas cruzadas e analisador e polarizador cruzados, pois diminuem os erros associados às placas de um quarto de onda.

Como no polariscópio plano, assume-se que a polarização do polarizador é feita verticalmente.

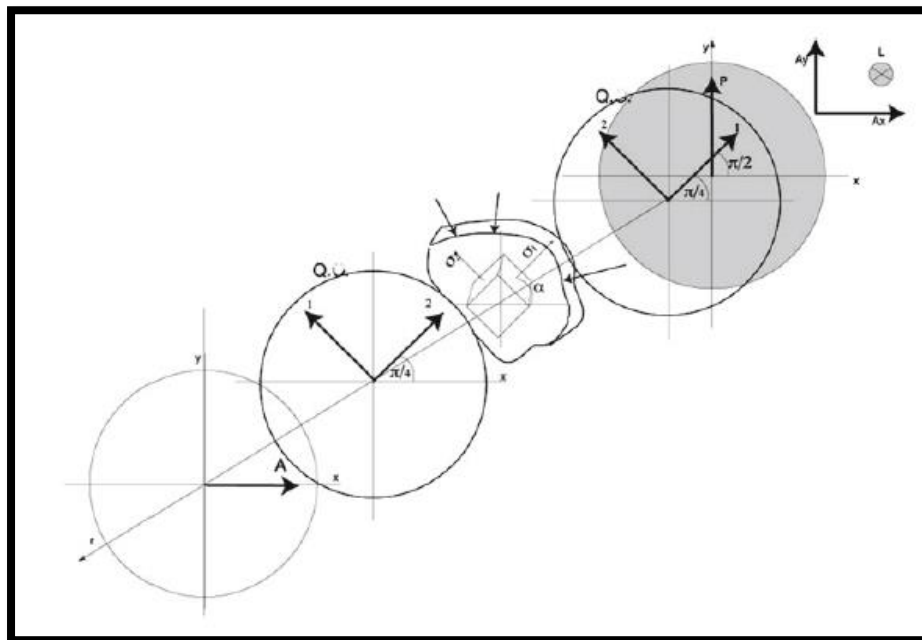


Figura 28 – Polariscópio circular (campo escuro) (retirado de [6])

Quando a retardação (desaceleração) relativa é igual a zero, ou seja, $R = 0$, há extinção completa de toda a luz. Mas quando a retardação relativa aumenta, as cores acabam por aparecer um pouco e produzem o tom cinzento e depois luz branca. Depois,

as duas componentes da cor violeta ficam desfasadas, dando origem a uma cor residual que é a luz branca menos a violeta, dando origem a uma cor complementar matiz amarela. O azul é a cor que é extinguida de seguida para produzir a cor laranja e assim sucessivamente para todas as cores existentes do espectro da luz.

Por este motivo, este tipo de polariscópio tem como subtipo o nome de “campo escuro”.

6.5.2. Polariscópio circular – campo iluminado

Neste tipo de disposição do polariscópio, também existem duas formas de disposição, nomeadamente:

1. Placas de um quarto de onda cruzados e analisador e polarizador paralelos;
2. Placas de um quarto de onda paralelo e analisador e polarizador cruzados.

A primeira disposição é também a mais aconselhável devido aos erros que existem associado nas placas de um quarto de onda. A diferença principal do campo iluminado e campo escuro, é o “negativo” um do outro.

6.6. Isocromáticas e Isoclínicas

Através da análise fotoelástica e com polariscópio plano, é possível observar dois sistemas de franjas simultaneamente: Isocromáticas e Isoclínicas.

As isoclínicas representam os lugares geométricos onde a orientação (direção) da diferença das tensões principais é constante. As direções das tensões principais coincidem com as orientações do polarizador e do analisador, em que a orientação angular do eixo do polarizador em relação ao eixo vertical é igual ao ângulo da isoclínica em questão. [21]. Estas são identificadas pelo ângulo de orientação a que estão associadas, por exemplo, uma isoclínica de 15° .

No polariscópio plano, como já foi referido, existem dois tipos de contorno que se encontram sobrepostos. No entanto, uma forma de se observar distintivamente as isocromáticas das isoclínicas é utilizar uma luz branca. As isocromáticas irão aparecer coloridas exceto para isocromáticas de ordem de franja igual a zero (cor preta) e as isoclínicas terão a cor preta. Uma forma de distinguir uma isoclínica de uma isocromática de ordem zero (preta), consiste em ter o polarizador e o analisador cruzados. Desta forma, a franja de ordem zero, ou seja, a isocromática de ordem zero, não se irá mover, mas as “bandas” isoclínicas irão [21].

Para cada valor de $\sigma_1 - \sigma_2$, existe um comprimento de onda correspondente. Deste modo, nos pontos do material sob carregamento em que for possível visualizar faixas com a mesma cor, o valor de $\sigma_1 - \sigma_2$, nesses pontos, será o mesmo. Essas faixas chamam-se isocromáticas e são lugares geométricos no material em que a diferença das tensões principais é sempre a mesma [22]. *Iso* significa constante, ou igual, e *chroma* significa cor, de “*isochromatics*”. Por esta razão, estas representam contornos de cor constante com utilização de luz branca. Quando se utiliza luz monocromática, não é correto referir-se a essas bandas como isocromáticas, mas sim monocromáticas porque se trata de uma fonte de luz com apenas um comprimento de onda (*mono*).

As franjas existem numa sequência contínua tanto no número como na cor, ou seja, se as franjas de primeira e terceira ordem são identificadas, a franja de segunda ordem deverá encontrar-se entre elas [23]. Deste modo, ao identificar-se uma franja, a ordem de outras franjas pode ser identificada, pois sabe-se que a direção de aumento da ordem das franjas corresponde a uma determinada sequência de cores. Áreas de franjas finas com pequenos espaçamentos significam regiões com alta concentração de tensões. Áreas onde o padrão é quase uniformemente negro ou cinza geralmente indicam uma região pouco sensível à aplicação de carregamento. [22]

A Tabela 3 apresenta vários valores de retardação relativa e respetivo número de ordem de franja, ambos associados a um comprimento de onda, ou seja, a uma cor. Esta tabela é bastante útil quando se utiliza luz branca e se pretende identificar o número de ordem das franjas observadas, como se irá verificar posteriormente neste trabalho.

Tabela 3 – Tabela com vários valores de retardação para cada cor observada (adaptado de [21])

Cores Observadas	Retardação (Desaceleração) (nm)	Ordem de Franja Aproximada
Preto	0	0.00
Cinzentos	160	0.28
Branco	260	0.45
Amarelo	350	0.60
Laranja	460	0.79
Vermelho	520	0.90
Transição de Cor	577	1.00
Azul	620	1.06
Azul-Verde	700	1.20
Verde-Amarelo	800	1.39
Laranja	940	1.63
Vermelho/Rosa	1050	1.82
Transição de Cor	1150	2.00
Verde	1350	2.35
Verde-Amarelo	1450	2.50
Laranja-Vermelho	1550	2.65
Transição de Cor	1730	3.00

7. Ensaaios Experimentais

7.1. Materiais e Métodos

De modo a verificar a técnica de fotoelasticidade na caracterização de um estado de tensão e deformação em determinado material, foram realizados vários ensaios em placas de Polimetil-Metacrilato (PMMA) e Poliestireno (PS).

Numa primeira fase, foram feitos furos circulares e centrais, de modo a analisar no sentido longitudinal do provete as várias franjas fotoelásticas que se verificam quando o material é submetido a uma carga. Numa segunda fase, foi testado o caso de provete com dois furos circulares apenas em PMMA por razões que serão apresentadas posteriormente.

Em todas as fases, foram efetuados ensaios de tração em que a força a ser aplicada ia aumentando até se verificar claramente as franjas fotoelásticas.

Neste capítulo, serão apresentados os vários ensaios realizados, condições dos mesmos e os seus resultados. Todos os ensaios experimentais foram realizados no Laboratório de Mecânica Experimental do Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

Os materiais usados nos vários ensaios consistiram em:

- Polariscópio TERCO MT 3100: possui luz branca e luz monocromática de cor laranja (Figura 29).
 - Luz branca: $\lambda =$ entre 400 e 800×10^{-8} m
 - Luz monocromática de cor laranja: $\lambda =$ entre 589.0 e 589.6×10^{-8} m
- Máquina de Tração Universal Shimadzu AG-IS 20 kN (Figura 30)
- Tubos de Aço com 1.5mm de espessura e 1 m de comprimento.
- Dispositivo de captura de imagem: Câmara integrada em iPhone 6

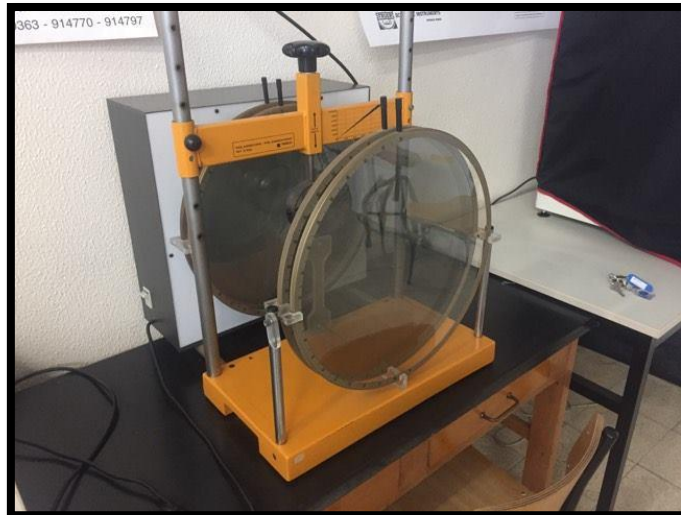


Figura 29 - Polariscópio TERCO MT 3100

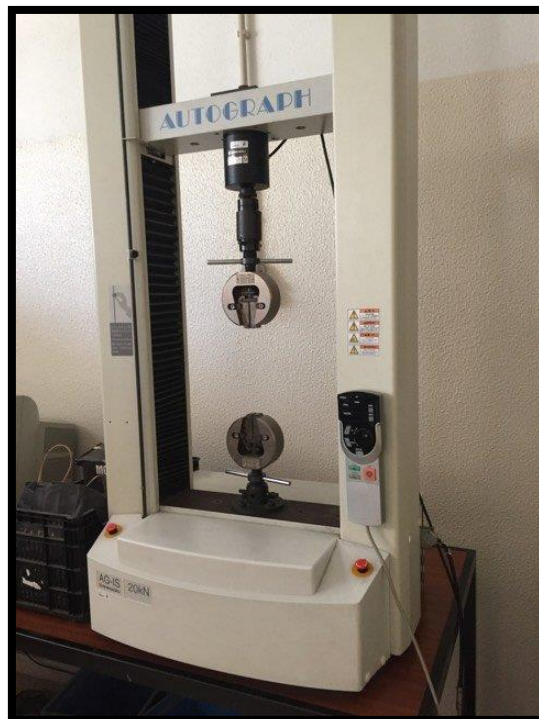


Figura 30 - Máquina de Tração Universal Shimadzu AG-IS

Em primeiro lugar, para que fosse possível proceder aos ensaios e posterior análise, foi necessário adaptar o polariscópio TERCO à máquina de tração universal. Para isso, desmontou-se o polariscópio existente e colocaram-se os seus componentes por cima da bancada e na parte inferior da máquina de tração, na mesma ordem original dos filtros do polariscópio. Para melhorar a estabilidade da base no polariscópio à frente da máquina de tração, foram colocados dois tubos apoiados no chão como apoio. (Figura 31)



Figura 31 – Montagem (adaptação) de polariscópio na máquina de tração

Verificou-se que a garra associada à máquina era limitada num dos lados. Logo, para uma placa com largura superior à garra, que tem aproximadamente 25 mm de largura, esta não iria ficar centrada, podendo alterar negativamente os resultados do ensaio. De modo a solucionar este problema, foram cortadas seis chapas de aço inoxidável, que foram utilizadas para fazer uma junta aparafusada com a placa de PMMA e de PS, com furos de 6 mm (Figura 32)

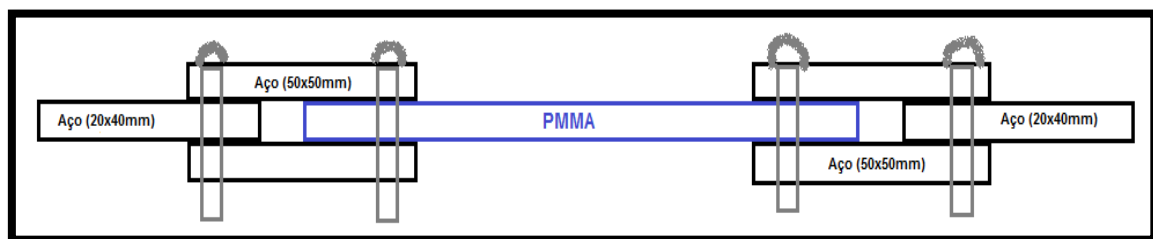


Figura 32 – Esquema da junta aparafusada das chapas com provete PMMA ou PS

Quatro dessas chapas têm como medidas 50x50mm e dois delas têm como medida 20x40mm.

7.2. 1º Ensaio

Na chapa de 50x50mm, foram feitos quatro furos, cada um com 6 mm de diâmetro, para que existisse uma maior uniformização na distribuição da carga no ensaio de tração (Figura 33, b)). Na chapa de 20x40mm, foi feito outro furo com 6 mm de diâmetro para se ligar à chapa de maiores dimensões e será esta pequena chapa que irá ter contacto direto com a garra da máquina de tração. (Figura 33, a))

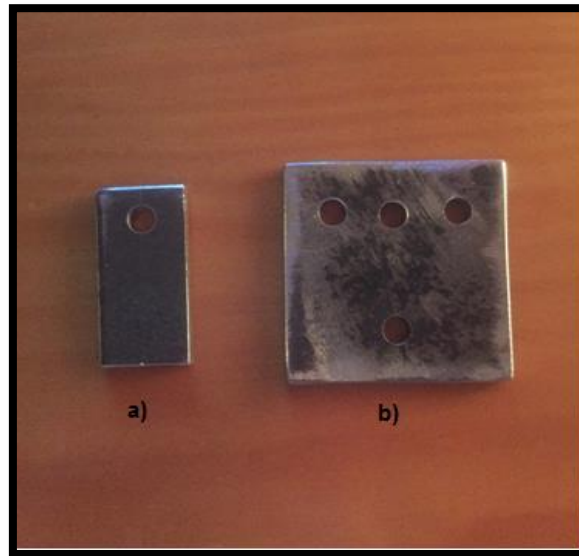


Figura 33 – a) Chapa de 20x40 mm ; b) Chapa de 50x50mm

Foi posteriormente maquinado um provete de PMMA, chamado comercialmente de Vidro Acrílico Extrudido, com 4 mm de espessura, 200 mm de comprimento e 50 mm de largura. Foi também maquinado um furo central e três furos em cada ponta do provete.

A Tabela 4 apresenta as propriedades do material PMMA utilizado.

Tabela 4 – Propriedades do provete em Polimetil-Metacrilato utilizado

	MPa
Tensão de cedência, σ_{ced}	70
Módulo de Young	3200

De seguida, ligaram-se as chapas ao provete de PMMA através de porcas e parafusos (Figura 34), criando um primeiro protótipo.



Figura 34 – Provete PMMA e chapas ligadas através de porcas e parafusos

O protótipo realizado (Figura 34 e 35) foi depois colocado na máquina de tração para proceder ao ensaio (Figura 36).

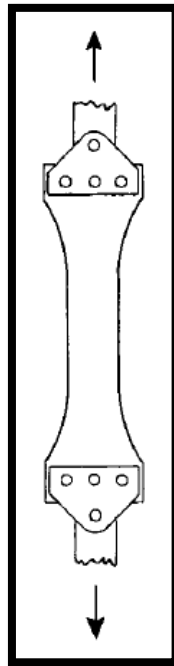


Figura 35 – Exemplo de tipo de ligação entre provete e máquina uniaxial (retirado [22])



Figura 36 – Primeiro ensaio de tração com protótipo com PMMA Extrudido

É importante mencionar que nos primeiros ensaios ainda não havia possibilidade de alterar de luz branca para monocromática pois o dispositivo que permitia mudar de luz encontrava-se avariado.

Neste primeiro ensaio, a força atingida foi de 230 N. O provete partiu na zona de ligação entre o mesmo e a chapa metálica (Figura 37 e Figura 38).



Figura 37 - Rotura do PMMA na zona aparafusada



Figura 38 – Parte do provete que sofreu rotura

A partir da análise da carga máxima suportada pela zona aparafusada, esta deveria estar abaixo ou ser igual à multiplicação da área com a tensão de rutura do PMMA:

$$F \leq \sigma_r \times A \quad (47)$$

σ é a tensão de ruptura do material, A é a área útil na linha aparafusada (área resistente) que é tracionada pela máquina, com os seguintes dados:

$$\sigma_r = 70 \text{ MPa} \quad (48)$$

$$A_{resistente} = 4 \text{ mm} \times (50 \text{ mm} - (3 \times 6 \text{ mm})) \text{ mm} = 128 \text{ mm}^2 \quad (49)$$

A força máxima que a junta poderá suportar é, aproximadamente igual a:

$$F = \sigma \times A_{resistente} = 70 \times 128 = 8960 \text{ N} \quad (50)$$

Pode-se concluir que este valor está muito acima do que foi efetivamente atingido no ensaio experimental quando o material fraturou.

De acordo com a Figura 39, que representa alguns modos de falha em ligações aparafusadas, o resultado do primeiro ensaio foi a situação de modo de falha a), ou seja, houve rotura das peças ligadas, nomeadamente, no material polimérico.

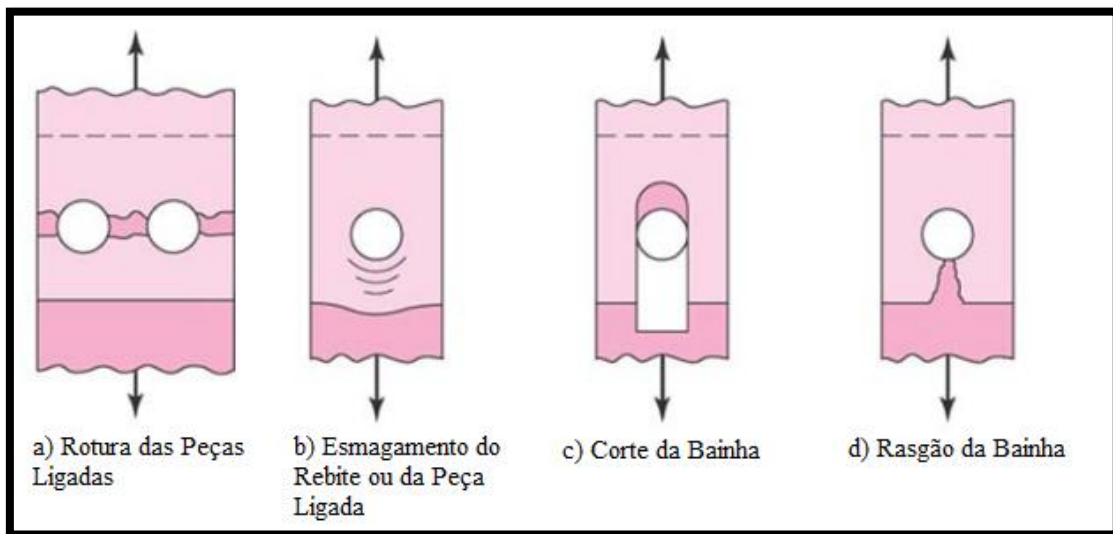


Figura 39 – Vários modos de falha de ligações ao corte (retirado e adaptado de [26])

Uma das razões apontadas para esta falha foi a falta de pré-aperto. Esta permite que haja menos possibilidade de “rasgamento” do material, transferindo a energia para as placas de metal, e anula os efeitos de concentração de tensões à volta dos furos, que é uma das limitações neste tipo de carregamento. Outra razão poderá ser o resultado de um descentramento, na medida em que um deles se encontra ligeiramente fora da linha dos três furos (Figura 40).

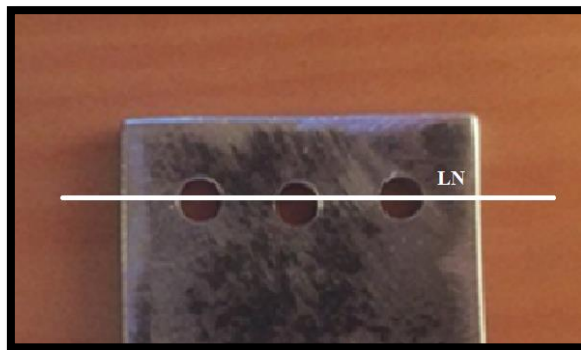


Figura 40 – Destaque no descentramento do furo do meio

Esse protótipo foi inspirado nos autores *Silverleaf* e *Blackburn* [22]. Estes aconselham este tipo de ligação pois este é o mais simples e eficaz para o objetivo pretendido. Por conseguinte, o carregamento é aplicado diretamente no eixo vertical do provete.

7.3. 2º Ensaio

No segundo ensaio, foi testada uma placa com furo central. Esta placa também foi aparafusada com duas chapas de aço inoxidável de forma a distribuir a carga uniformemente na placa inteira (Figura 41). No entanto, esta nova placa tem 130 mm de largura, 288 mm de comprimento, com furo central de 10 mm de diâmetro e 4 mm de espessura.

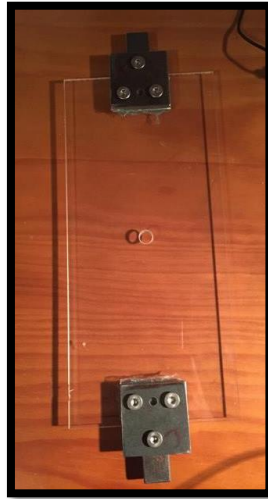


Figura 41 - Placa com furo central em PMMA

O objetivo foi, novamente, observar o padrão de franjas quando a placa estava sob carregamento.

Foi utilizado inicialmente o polariscópio plano, através da remoção das placas de um quarto de onda do polariscópio circular inicial e utilizou-se luz branca (Figura 42).



Figura 42 - Polariscópio plano utilizado no 2º ensaio

Ao rodar simultaneamente o polarizador e o analisador 45° (cruzados), no sentido dos ponteiros do relógio e carregando o provete até 1500 N na máquina uniaxial, é possível observar alguns padrões de franjas constituídas por isoclínicas e isocromáticas pois elas sobrepõem-se umas as outras num polariscópio plano (Figura 43).

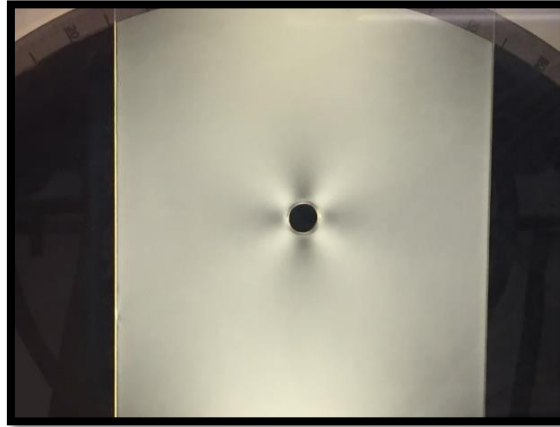


Figura 43 - isoclínicas e isocromáticas observadas com polarizador e analisador cruzados

O que se pode observar, no entanto, é bastante reduzido em quantidade e qualidade devido à possibilidade de o carregamento ter sido pouco. De acordo com os cálculos já efetuados no primeiro ensaio, esta placa iria aguentar até:

$$F = \sigma_r \times A_{resistente} = 70 \times (40 + 40 + 32) = 7840 \text{ N} \quad (51)$$

Este provete não foi posto sob o carregamento máximo possível devido à possibilidade de acontecer a mesma situação do primeiro ensaio, ou seja, poder fraturar na zona da junta aparafusada e existir impossibilidade de continuar com o ensaio.

Contudo, pôde-se obter informação sobre a direção das tensões principais. Estas serão as mesmas que o ângulo de rotação do polarizador e do analisador. Assim, os eixos das direções das tensões principais estão orientados 45° em relação ao eixo vertical. Este isoclínica chama-se isoclínica de 45°.

De seguida, o objetivo foi observar os outros padrões de franjas possíveis denominadas por isocromáticas. Para isso, foram colocadas as duas placas de um quarto de onda novamente no polariscópio, tornando-o um polariscópio circular. (Figura 44)

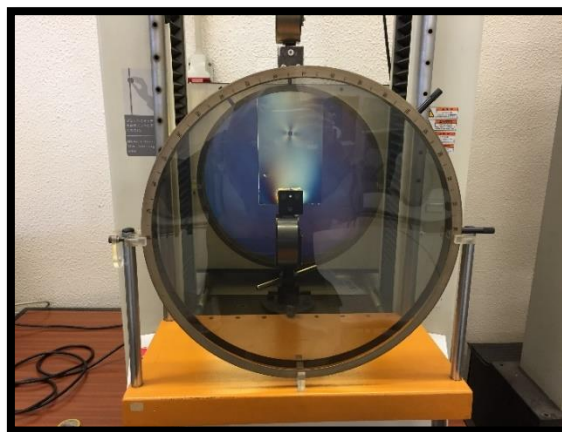


Figura 44 – Polariscópio Circular do 2º ensaio

Neste caso, o polarizador e o analisador permanecem perpendiculares entre si e os únicos filtros que foram rodados foram as placas de um quarto de onda.

Dois carregamentos diferentes foram submetidos no provete ao rodar as placas de quarto de onda de forma aleatória, por exemplo, a 45° como apresentado na Figura 45.

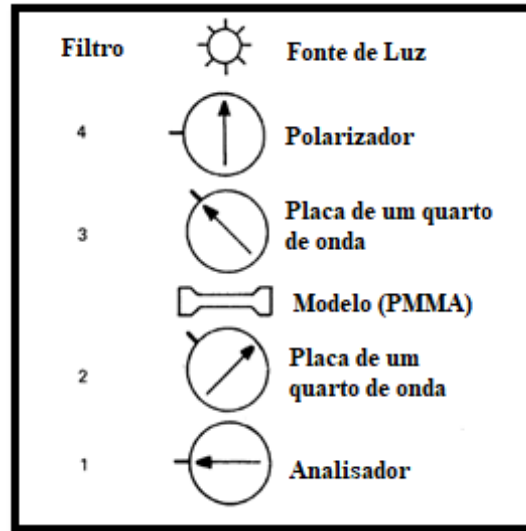


Figura 45 – Esquema possível do polariscópio retirado do Manual TERCO MT 7300 (adaptado)

Os vários carregamentos e ângulos de disposição são apresentados nas figuras seguintes (Figura 46 até Figura 49).

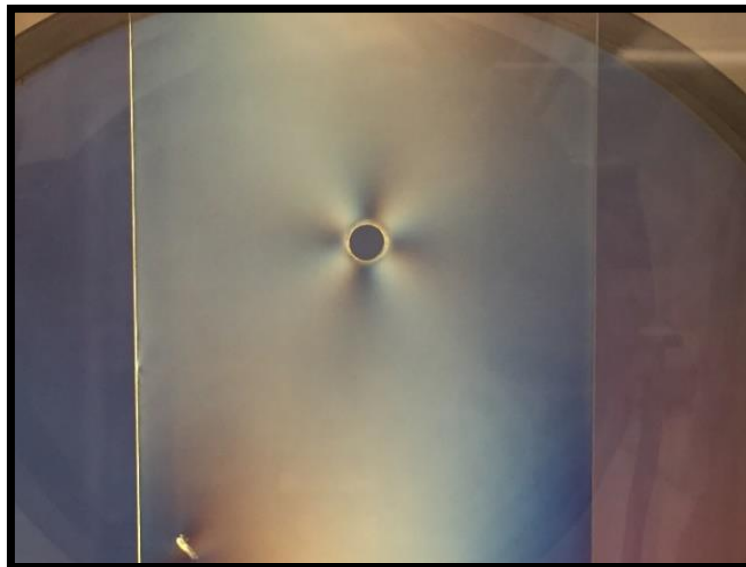


Figura 46 – Carregamento de 1500 N com as placas de $\frac{1}{4}$ de onda cruzados

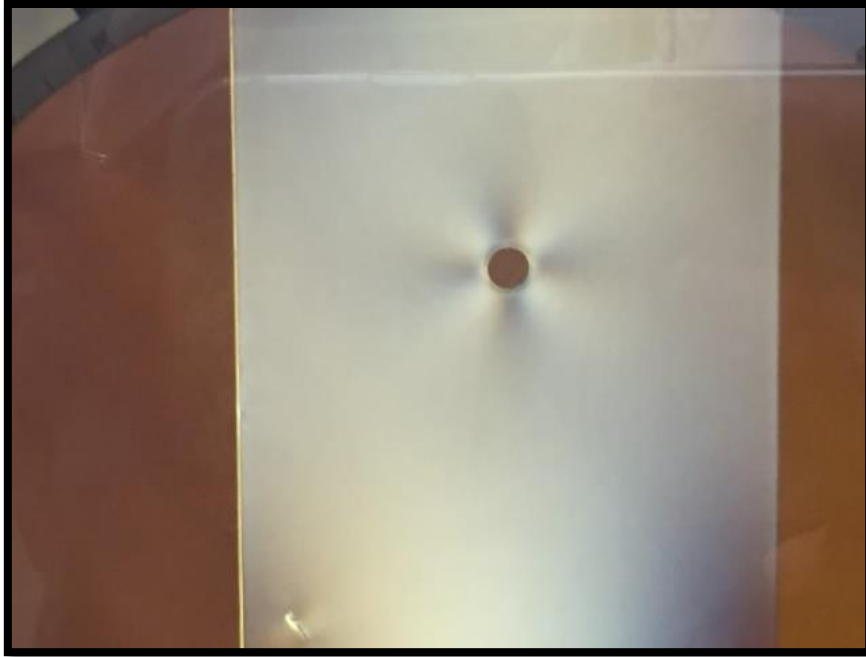


Figura 47 – Carregamento de 1500 N com as placas de $\frac{1}{4}$ de onda rodados 30°

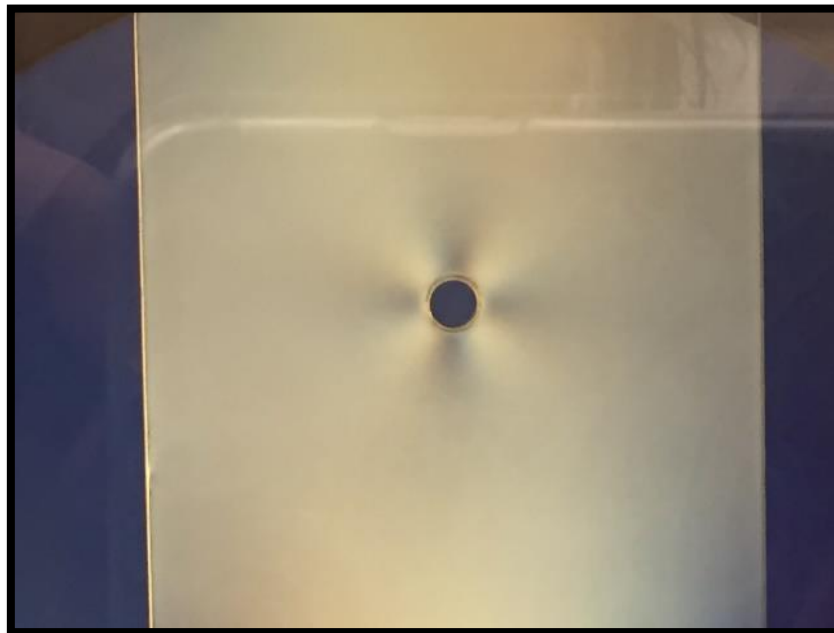


Figura 48 – Carregamento de 1500 N com as placas de $\frac{1}{4}$ de onda rodados 50°

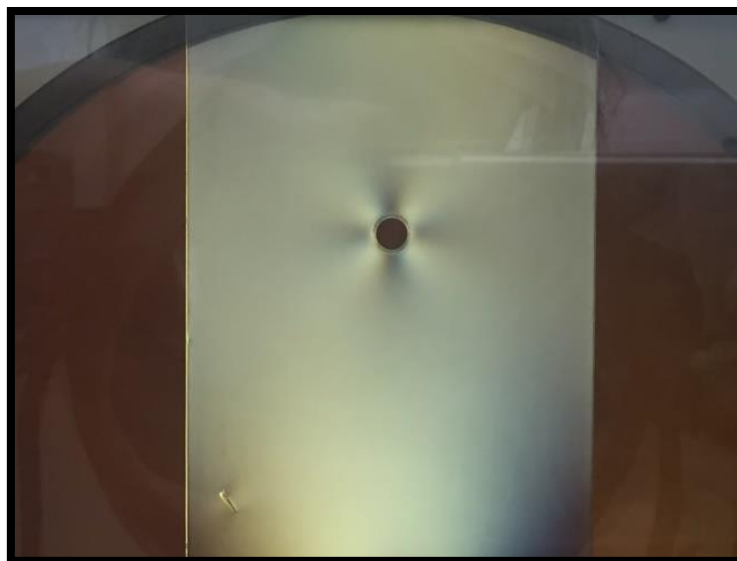


Figura 49 – Carregamento de 2000 N com as placas de $\frac{1}{4}$ de onda rodados 60°

As franjas são denominadas de isocromáticas e podem ser obtidas utilizando apenas o polariscópio circular. Este tipo de polariscópio elimina as isoclínicas.

É possível observar que, ao alterar o ângulo das placas de quarto de onda, o padrão de franjas também muda, girando à medida se altera o ângulo. Também é possível observar ligeiramente as isocromáticas de ordem zero pois estas estão associadas com a cor preta do espectro. Se fosse possível observar mais franjas, estas seriam classificadas de acordo com o seu número de franja, N , associado a uma retardação relativa, associado também a um comprimento de onda.

É importante referir a dificuldade sentida neste teste experimental. Por essa razão, há dificuldade em observar padrões fotoelásticos neste tipo de polariscópio também. Uma forma de se contrariar esta situação seria carregar mais o provete, arriscando que este se partisse. Como solução alternativa poder-se-ia modificar o tipo de material ou as dimensões do provete. Irá verificar-se posteriormente que estes dois fatores terão bastante relevância.

De modo a ser possível comparar a simulação numérica obtida com a experiência de laboratório, o provete foi testado através de um incremento de carga com uma velocidade de teste escolhida inicialmente e constante. Essa velocidade foi previamente estimada baseada na teoria de elasticidade. A extensão ou deformação normal unitária, ε , pode ser dada por:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (52)$$

L é o comprimento final e L_0 o comprimento inicial do provete. Procedendo-se a algumas simplificações, fica:

$$\Delta L = \frac{FL}{EA} \quad (53)$$

Em que F é a força aplicada, em Newton, E é o Módulo de Young em MPa e A é área do provete em mm^2 .

Aplicando as propriedades fornecidas pelo fabricante, o Módulo de Young para este PMMA em particular é 3200 MPa. O comprimento do provete em estudo é, L , é de 288 mm e, subtraindo as chapas aparafusadas de metal, perfaz um total em comprimento de aproximadamente 225 mm. A área da secção transversal é $130 \times 4 \text{ mm} = 520 \text{ mm}^2$ com uma largura de 130 mm e uma espessura de 4 mm.

Deste modo, com uma força de carregamento arbitrária de 4000 N e pela equação 53, o deslocamento final, ΔL , será de 0.54 mm. Logo, uma velocidade de teste aceitável seria de 0.25 mm/min, sendo esta a escolhida, de forma a ser possível efeitos viscoelásticos e de não ser um teste muito prolongado. Contudo, devido às limitações associadas ao *software* da máquina de tração uniaxial, a mínima velocidade disponível para ser escolhida era de 1mm/min e foi essa a selecionada. (Figura 50 e Figura 51)

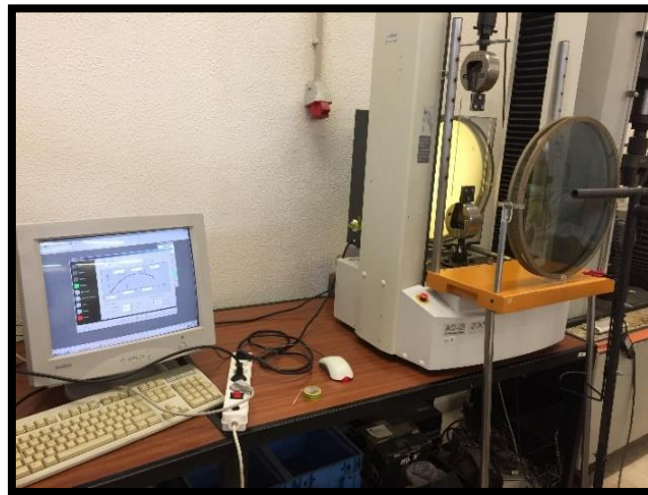


Figura 50 – Equipamento montado da experiência laboratorial (2º Ensaio)

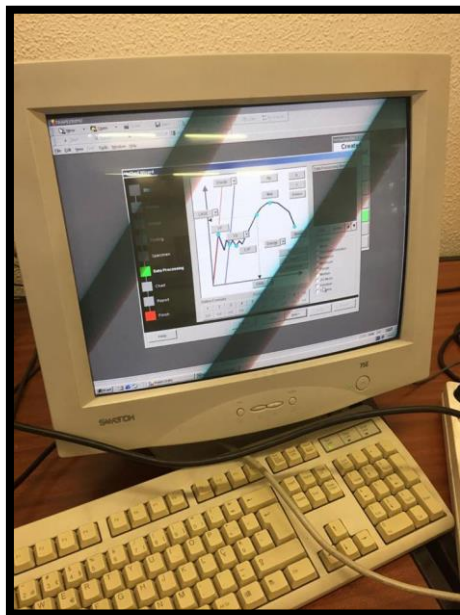


Figura 51 – Equipamento auxiliar (software e computador) da máquina uniaxial SHIMADZU

A Figura 52 representa a curva resultante do carregamento, onde se pode observar o Carregamento (N), no eixo vertical, versus o Deslocamento Vertical, em mm, no eixo horizontal.

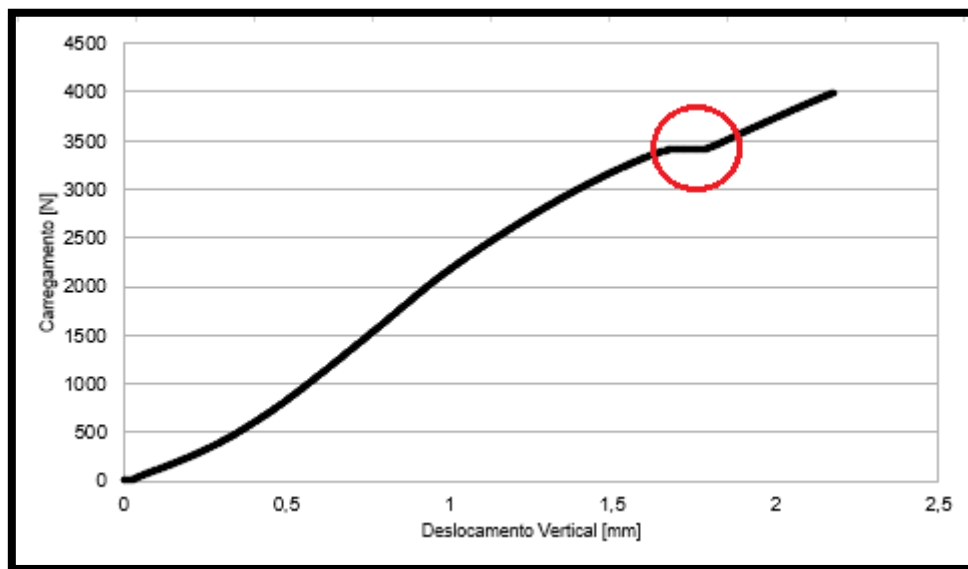


Figura 52 – Curva Carregamento vs. Deslocamento Vertical para uma velocidade de teste de 1mm/min

Como seria de esperar, até a um carregamento de 4000 N, o provete irá continuar a sofrer deformação.

Seria de esperar que, enquanto o carregamento aumenta, este irá aumentar até determinado valor, sendo que a partir desse valor, o material “absorve” lentamente a energia, devido à sua propriedade viscosa, levando a uma estabilização de carregamento no material. Este é considerado um comportamento típico de um termoplástico, a velocidade constante. Enquanto esse deslocamento ocorre, antes da estabilização do valor da força, irá ocorrer o *crazing* do provete até que, a partir de um certo valor de carregamento, após a sua estabilização, o provete irá quebrar. É possível também observar que existe uma ligeira não linearidade na fase inicial e na fase final do ensaio. Relativamente à fase final, uma causa da não linearidade poderá ser do ajuste inicial natural da garra da máquina com o provete. Na fase final, a não linearidade acontece devido as propriedades viscosas inerentes ao material que se manifestam após um certo valor de carregamento. Antes desse valor, ocorre um comportamento elástico. Outra razão para essa não linearidade é poder ter havido um deslizamento entre as chapas de metal e o provete, por estarem conectadas por dois parafusos, apesar de ter sido aplicada uma força de compressão na junta de modo a prevenir a rutura desses furos. Esses furos deverão ser furados preferencialmente com CNC e com auxílio de um líquido refrigerante para prevenir sobreaquecimento e conseqüente plastificação precoce. O provete utilizado foi furado manualmente. Poderá, desta forma, dizer-se que outra razão para a curva apresentada ser esta, é o facto de ter sido adicionado plasticidade extra ao provete de PMMA ou porque o provete foi carregado previamente, para se poder observar o padrão de franjas, e plastificou ligeiramente.

Em suma, pode-se concluir que a curva da Figura 52 é não-linear e o tempo total de carregamento foi de aproximadamente de 130 segundos e a extensão máxima verificada foi de 2.181 mm. Esta extensão foi medida a nível de todo o provete, incluindo as chapas metálicas.

7.4. 3º Ensaio

No terceiro ensaio, foi testado um material diferente. O material escolhido foi o poliestireno (PS). A razão para a qual este foi escolhido prende-se com o facto de este ser um material com propriedades birrefringentes e ser também um material radiotransparente. A existência de uma atitude constante de tentativa-erro ao logo deste processo foi também motivo de alteração de material, de modo a melhorar os erros que ocorreram nos ensaios anteriores. Como objetivo presente desde o primeiro ensaio, pretende-se com este ensaio observar franjas fotoelásticas e, se possível, calcular a diferença de tensões principais e suas direções em alguns pontos do material.

Este ensaio consistiu numa placa de poliestireno de 130 mm de largura, 148 mm de comprimento e 4 mm de espessura. Utilizou-se novamente as placas metálicas aparafusadas no material e procedeu-se ao carregamento em tração na máquina uniaxial.

Começou-se por utilizar o polariscópio plano. Verificou-se que não se observaram franjas fotoelásticas distintas ao aumentar a força de carregamento e, por isso, continuou-se a aumentar a força de modo a tentar visualizar algum tipo de padrão à volta do furo central. O resultado foi que, aos 1600 N, a placa de poliestireno partiu na zona da junta aparafusada, como aconteceu no primeiro ensaio (Figura 53 e Figura 54).

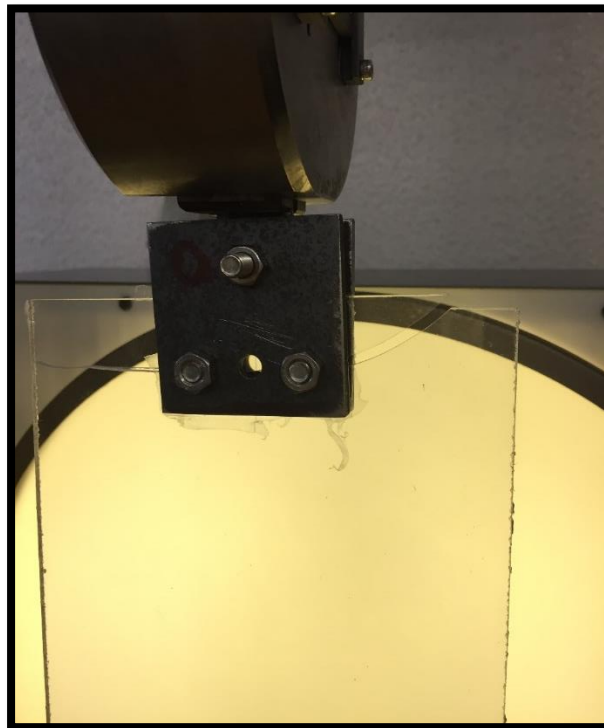


Figura 53 – Resultado do 3º Ensaio com Poliestireno (1600 N)

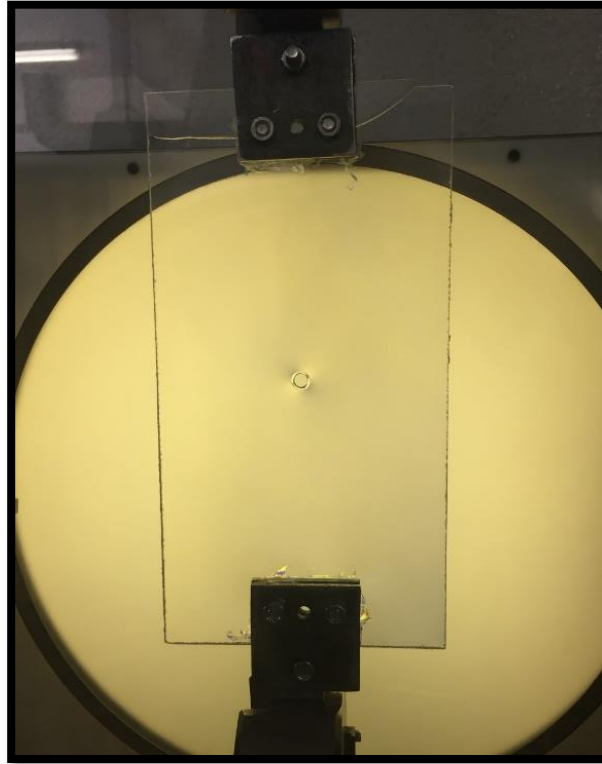


Figura 54 – Resultado do 3º ensaio com Poliestireno (1600 N)

O motivo para este acontecimento prende-se com os mesmos motivos possíveis do primeiro ensaio com a adição que, aquando da furação dos vários furos nesta placa de PS, estes sofreram plastificação na parte interior do furo, algo que foi menos evidente na furação do material PMMA. Esta plastificação criou uma concentração de tensões residuais elevada que fragilizou essa zona.

O poliestireno é um material termoplástico amorfo, tal como o PMMA (Tabela 4). Porém, a diferença principal entre estes dois materiais é a sua fragilidade. O poliestireno é um polímero frágil e o PMMA é semi-dúctil, ou seja, tem capacidade de absorver mais energia até fraturar. O poliestireno não chega a plastificar e ocorre logo rutura.

A Tabela 5 apresenta as propriedades do material poliestireno utilizado.

Tabela 5 – Propriedades do Poliestireno (retirado de [27])

Tensão de Cedência (MPa)	55
Módulo de Young (MPa)	3102

7.5. 4º Ensaio

A placa de PMMA utilizada nos ensaios anteriores, com as chapas de metal, foram deixadas de parte nesta fase. O PMMA neste ensaio é ligeiramente diferente, sendo este comercialmente conhecido como Vidro Acrílico Vazado, pois a alteração de algumas propriedades poderia fazer alguma diferença nos resultados experimentais.

Nesta fase, utilizou-se apenas uma pequena placa com dimensões 30x15x2mm, reduzindo assim também a sua espessura. Deste modo, a garra da máquina de ensaio de tração uniaxial irá estar em contacto direto com praticamente toda a largura do provete. A luz branca foi a escolhida para diferenciar melhor as isocromáticas das isoclínicas.

O primeiro teste consistiu em utilizar o polariscópio plano com o analisador e polarizador cruzados entre si e o resultado está demonstrado na Figura 55 e 56, para um carregamento de 824 N.

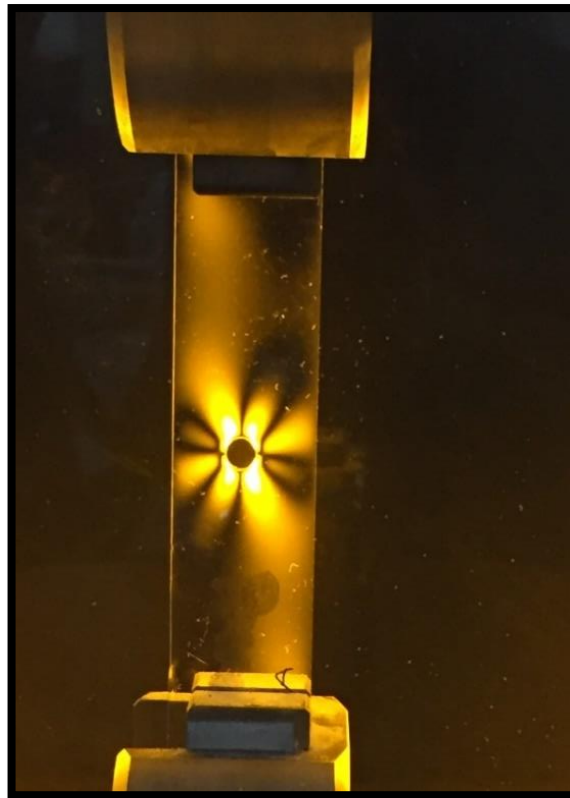


Figura 55 - Resultado do 4º ensaio com PMMA com polariscópio plano

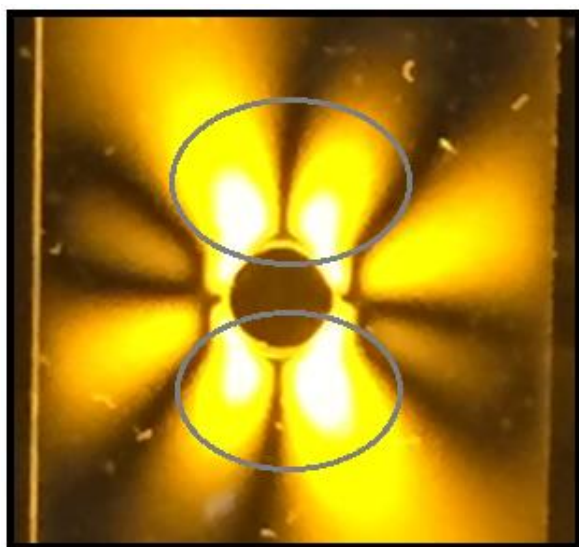


Figura 56 – Zoom do resultado do 4º ensaio com PMMA com polariscópio plano

A Figura 56 permite observar isoclínicas e isocromáticas de forma um pouco mais detalhada. O que seria de esperar eram bandas de várias cores, isocromáticas, e bandas pretas que representam as isoclínicas. Caso o polarizador e o analisador fossem rodados, mas permanecessem cruzados, as isoclínicas iriam mudar a sua localização, enquanto que as isocromáticas iriam manter a mesma localização. Contudo, pode-se observar que as primeiras quatro bandas, duas superiores e duas inferiores, representadas com dois círculos cinzentos na Figura 54, iriam ser as primeiras a apresentar alguma cor, caso fosse elevado o carregamento no provete na máquina uniaxial. As isoclínicas serão de isoclínicas de 0° pois o polarizador está a 90° e o analisador está a 0° para a direita.

Rodando o analisador para a esquerda, permanecendo a 0° e estando cruzado ao polarizador, obtém-se a Figura 57. O carregamento foi também de 824 N.

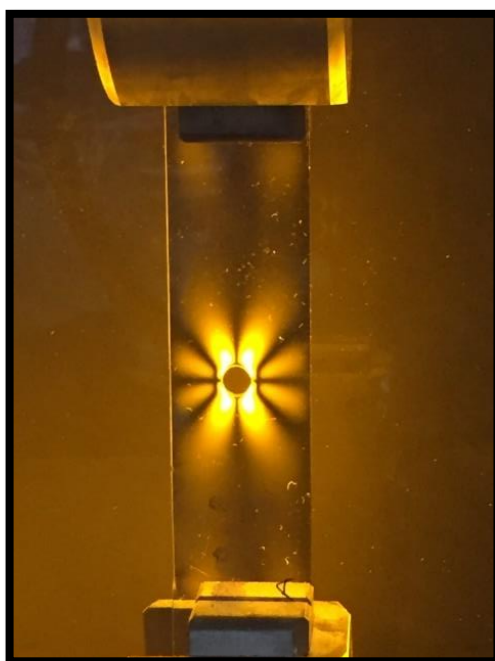


Figura 57 – Resultado do 4º Ensaio com PMMA, parte 2 (polariscópio plano)

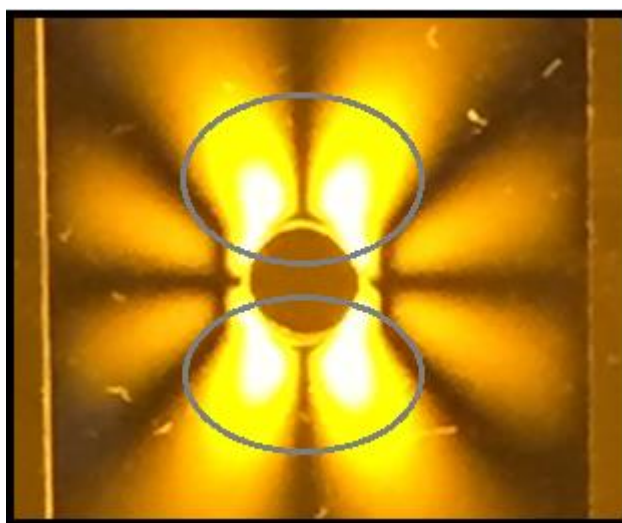


Figura 58 – Zoom in do resultado do 4º ensaio com polariscópio plano

A Figura 58, comparando com a Figura 57, permitem concluir que houve uma ligeira mudança na localização das bandas. A Figura 56 parece um pouco mais definida e as bandas a amarelo, representadas por círculos a cinzento, permanecem na mesma posição, enquanto que as bandas escuras ou pretas alteram a sua posição, movendo-se um pouco para fora e tomando uma posição mais recta. A Figura 59 permite detectar as diferenças entre as duas posições dos filtros do polariscópio.

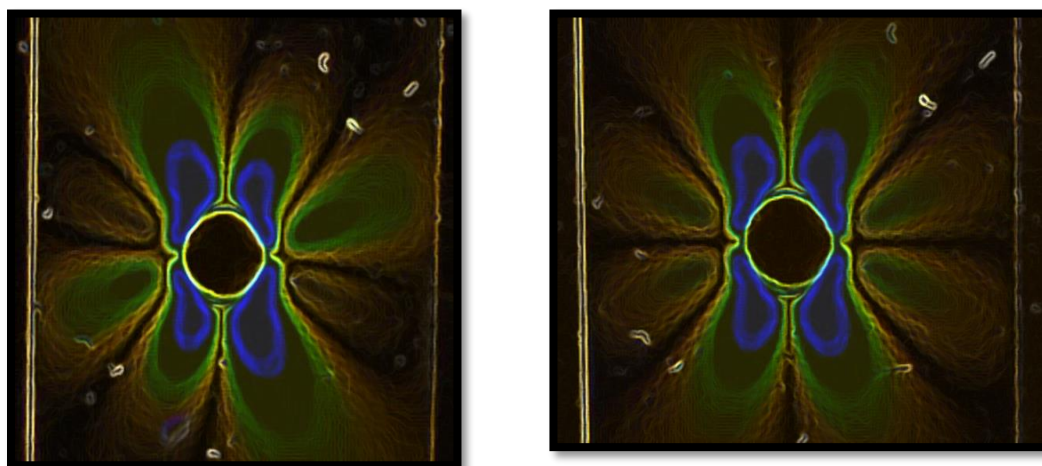


Figura 59 – Representação dos resultados do 4º ensaio em polariscópio plano (à esquerda, analisador na direita; à direita, analisador na esquerda)

O mesmo teste foi realizado utilizando o polariscópio circular, colocando os dois filtros de $\frac{1}{4}$ de onda com o mesmo valor de carregamento. Os resultados do teste são apresentados nas duas figuras seguintes (Figura 60).

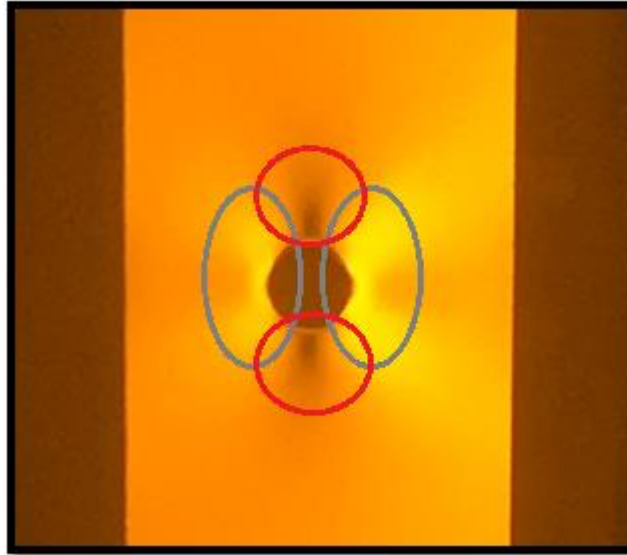


Figura 60 – Resultados do 4º ensaio em campo escuro no polariscópio circular (824 N)

A disposição do polariscópio circular na Figura 60 é a que já foi apresentada representada no Figura 45, que representa o campo escuro de visualização. Neste polariscópio, as isoclínicas desaparecem, deixando apenas as isocromáticas. Observa-se muito pouco das isocromáticas pois não foi carregado até ao seu máximo, tentando evitar que se partisse. Porém, visualiza-se quatro bandas com amarelo mais claro, representadas por círculos cinzentos e duas bandas escuras, uma no topo e outra em baixo, representadas por círculos vermelhos. Essas deverão ser as isocromáticas com número de ordem 0. As franjas de cor amarela, poderá dizer-se que, para este carregamento, 824 N, o número de ordem de franja para as quatro bandas é de 0.60, de acordo com a Tabela 3. A diferença de tensões numa dessas bandas amarelas será então, de acordo com a Lei de Tensão-Ótica:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{N f_{\sigma}}{h} \quad (54)$$

⇔

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{0.60 \times 130 \frac{N}{mm} / \text{franja}}{2 \text{ mm}} = 39 \text{ MPa} \quad (55)$$

Em relação à Figura 61, esta representa as mesmas franjas da Figura 60, mas com a diferença que o provete da Figura 60 encontra-se em campo iluminado. Quer isto dizer que o que estava com uma cor mais clara, ou seja, amarela, à volta do furo, agora encontra-se escuro (preto). Por outro lado, o que se encontrava com cor escura (preta) em campo escuro, em campo iluminado é amarelado. Estes dois campos permitem visualizar o “negativo” de uma disposição do polariscópio para outro.

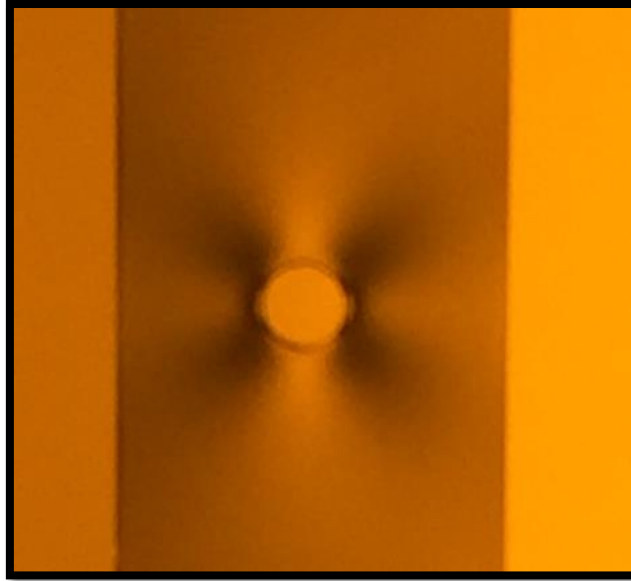


Figura 61 – Resultados do 4º ensaio em campo iluminado no polariscópio circular

A Figura 61 representa uma comparação lado a lado mais evidente do efeito de “negativo” entre os dois ensaios: campo escuro e campo iluminado.

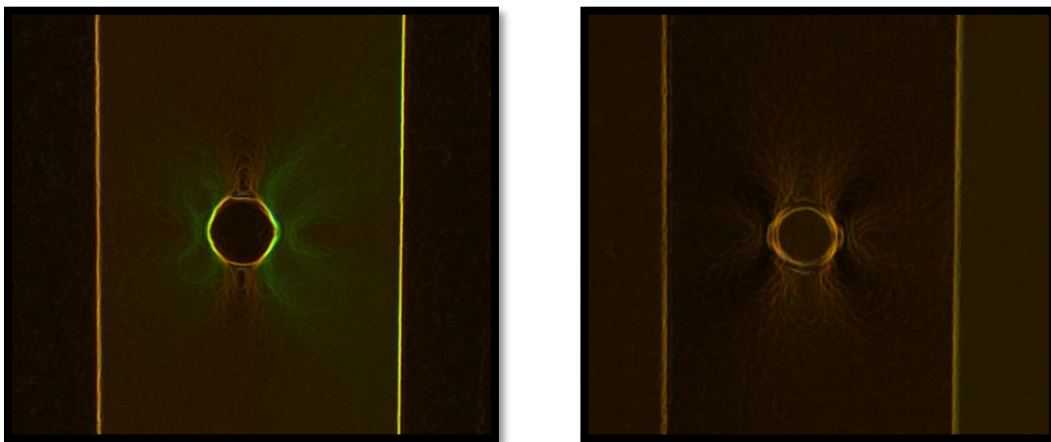


Figura 62 - Comparação entre os dois ensaios constituintes do 5º ensaio (à esquerda, campo escuro; à direita campo iluminado)

7.6. 5º Ensaio

Procurando tentar uma última vez a utilização do material poliestireno (PS), procedeu-se a um novo ensaio com este material. Foi aplicado, como alvo de estudo, uma placa de 25 mm de largura, 160 mm de comprimento e 2 mm de espessura. O fornecedor deste material é o mesmo que 3º ensaio, apenas se alteraram as suas dimensões.

A Figura 63 apresenta o resultado do carregamento de 350 N, em polariscópio plano com polarizador e analisador cruzados entre si.



Figura 63 – Resultado do 5º ensaio com poliestireno (PS) em polariscópio plano

A Figura 64 apresenta uma imagem mais detalhada do resultado. Esta permite observar umas bandas mais claras que o resto do provete, que poderão ser provavelmente

isocromáticas e umas bandas mais escuras que poderão ser as isoclínicas. Contudo, não é possível afirmar com certeza pela falta de clareza nas fotografias.

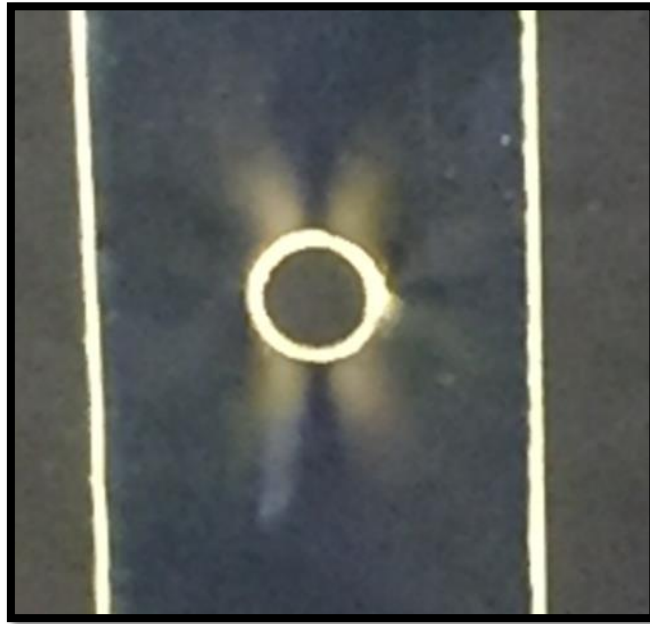


Figura 64 – Zoom in do resultado do 5º ensaio com polistireno (PS) em polariscópio plano

Ao mudar a configuração do polariscópio, mantendo o analisador e polarizador cruzados, mas a 60° cada um, obtém-se a Figura 65.

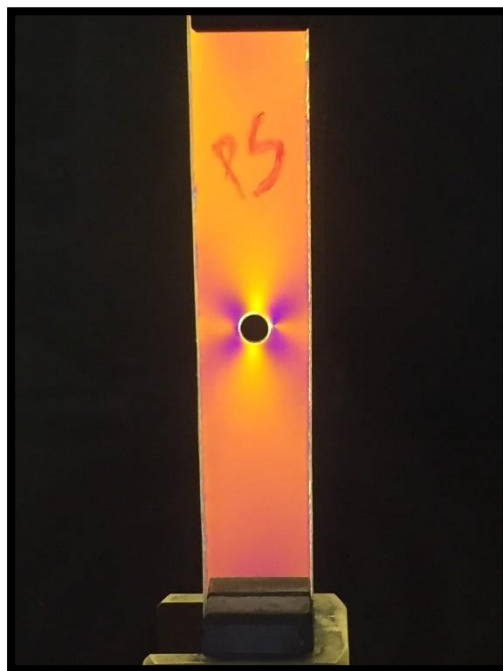


Figura 65 - Resultado do 5º ensaio com poliestireno (PS) em polariscópio plano

Ao aumentar a carga de modo a que as franjas se tornem mais visíveis, o provete partiu aos 350 N (Figura 66).



Figura 66 - Resultado do 5º ensaio com rotura do poliestireno (Polariscópio Circular)

Esta é uma das desvantagens deste material. Este tem um módulo de Young muito mais baixo que o PMMA, não plastifica por ser frágil e entra em rotura com facilidade, quer seja um provete de grandes ou reduzidas dimensões.

Ao modificar-se o polariscópio de plano para circular, apenas se conseguiu obter o resultado da Figura 67 e 68, antes do carregamento de 350 N.

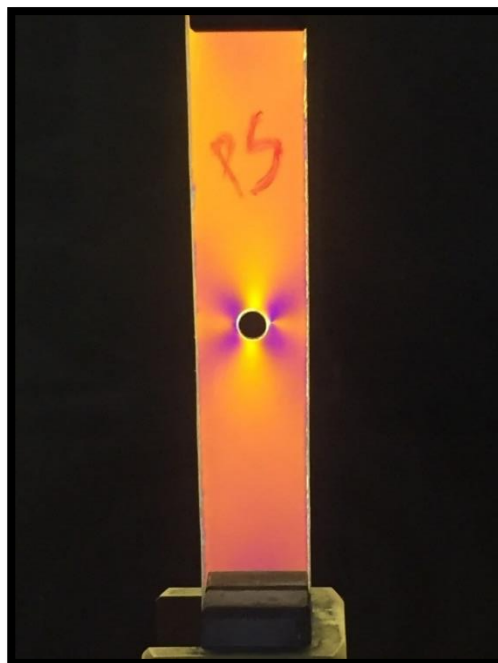


Figura 67 - Poliestireno (PS) a 350 N em campo iluminado

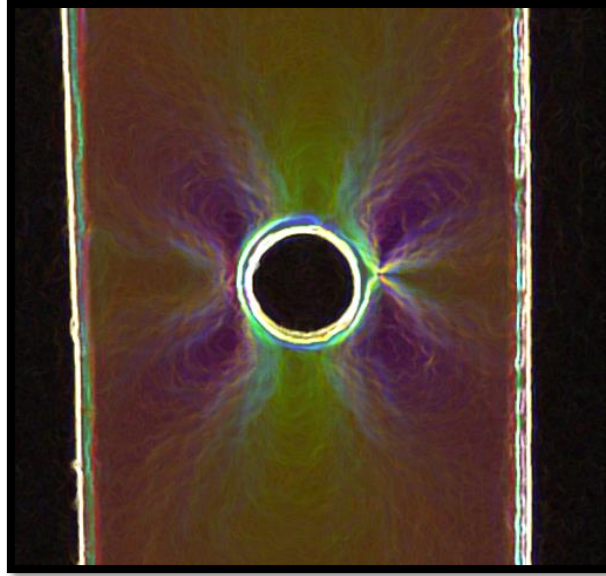


Figura 68 – Zoom in do resultado do 5º ensaio (Polariscópio Circular)

Observa-se nas Figuras 67 e 68 as franjas isocromáticas a iniciarem a sua formação à volta do furo. As primeiras a aparecem são de cor púrpura, sendo esta uma mistura entre o azul e o rosa. O azul e o rosa são os comprimentos de onda que permitir identificar a diferença de tensões principais. Devido à plastificação que se verificou na furação do provete em PS, visualiza-se umas franjas consideradas indesejáveis à volta do furo que são tensões concentradas residuais.

7.7. 6º Ensaio

No penúltimo ensaio deste processo de tentativa com o propósito de obter uma análise mais rigorosa, foi possível obter uma câmara NIXON (COOLPIX S5200) com maior qualidade de imagem. O material mantém-se com o PMMA e com as dimensões de 160 mm de comprimento, 26 mm de largura e furo com 6 mm de diâmetro.

Iniciou-se o ensaio com o polariscópio circular com o analisador e o polarizador paralelos e as duas placas de ¼ onda cruzados. Para cada carregamento, capturou-se a imagem do padrão de franjas e são demonstradas nas figuras seguintes, com a respetiva carga aplicada. Este foi o ensaio a partir da qual se obtiveram os melhores resultados.

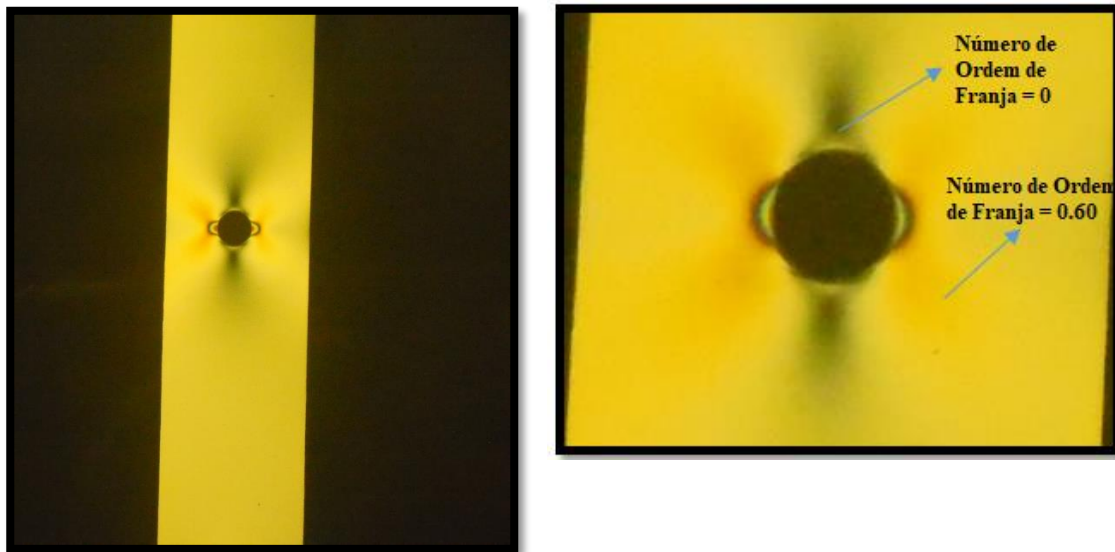


Figura 69 – Resultado do 6º Ensaio (Polariscópio Circular – 700 N)

A Figura 69 apresenta o resultado do primeiro carregamento deste ensaio. Observa-se bandas bastante parecidas ao 4º ensaio. Ou seja, estão presentes quatro bandas visíveis, amarelas, à volta do furo e duas pretas por cima e por baixo do furo. É possível também visualizar a iniciação de franjas indesejáveis à volta do furo, de forma ligeira. As bandas pretas têm como número de ordem de franja 0, sendo essas as isoclínicas, e as amarelas têm número de ordem de franja igual a 0.60, de acordo com a Tabela 3. Procedendo a uma análise quantitativa inicial, calcula-se a diferença de concentração de tensões para essas duas zonas:

Zona amarela:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{0.60 \times 130 \frac{N}{mm} / \text{franja}}{2 \text{ mm}} = 39 \text{ MPa} \quad (56)$$

Zona Preta:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{0 \times 130 \frac{N}{mm} / \text{franja}}{2 \text{ mm}} = 0 \text{ MPa} \quad (57)$$

Conclui-se que nas zonas pretas (escuras) a tensão principal 1 é igual à tensão principal 2 e será assim para qualquer zona preta do modelo, tal como na zona das bandas amarelas.

As cores começam a aumentar a sua tonalidade nas zonas de alta concentração de tensões, localizadas na ponta esquerda e direita do furo. Essas cores, nesta fase, são um pouco complicadas de diferenciar.

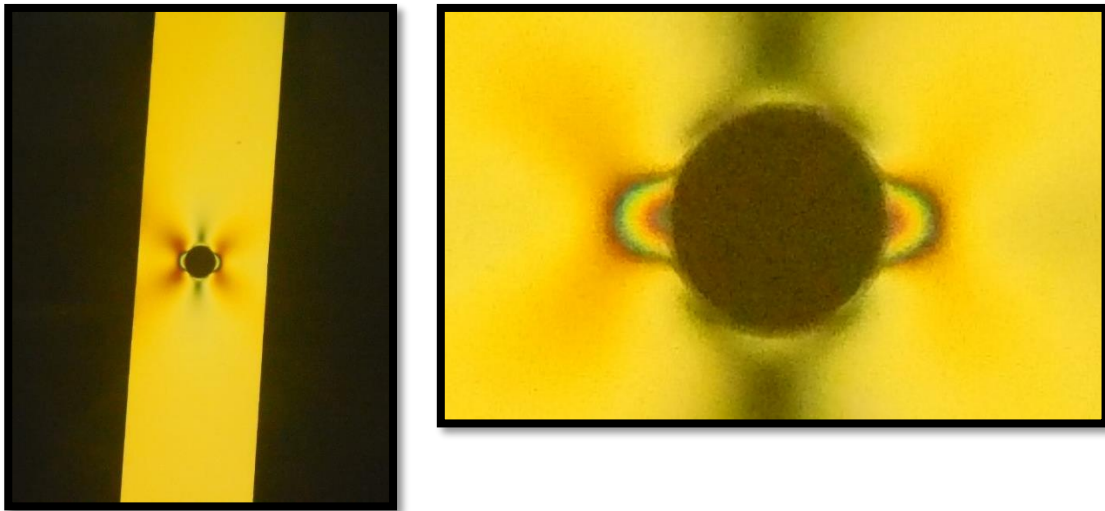


Figura 70 – Resultado do 6º Ensaio (Polariscópio Circular – 1000 N)

Ao carregar o provete até aos 1000 N, obtém-se a Figura 70. Nesta, as bandas amarelas e pretas permanecem praticamente constantes a nível de localização, mas a zona de concentração de tensões à volta do furo “cria” uma nova banda de cores. Esta indica no crescimento do número de franja de ordem de acordo com o aumento do carregamento. Poderá identificar-se, do furo para fora, uma cor escura (cinzento escuro), depois uma cor rosa, o amarelo, verde, azul e um vermelho escuro. O cálculo das tensões será feito mais adiante em que a identificação das cores é mais intuitiva.

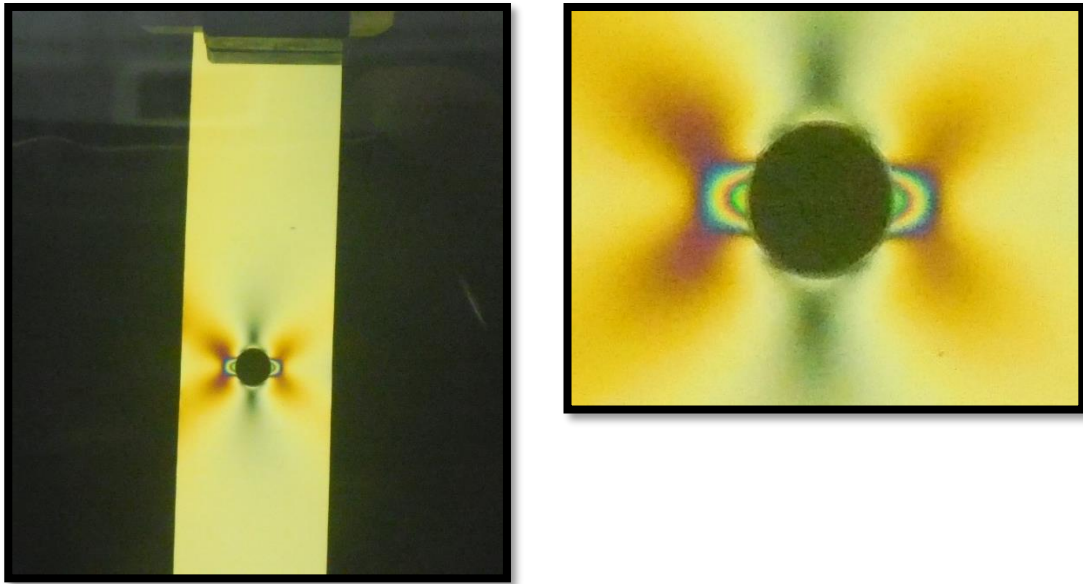


Figura 71 – Resultado do 6º Ensaio (Polariscópio Circular – 1100 N)

Na Figura 71, com carregamento nos 1100N, visualiza-se que o lado esquerdo do furo se encontra mais concentrado a nível de tonalidade de cor, nomeadamente uma cor avermelhada. Poderá indicar falta de centridade do furo ou existir mais concentradores de tensão do lado esquerdo, provavelmente ao efeito de furação.

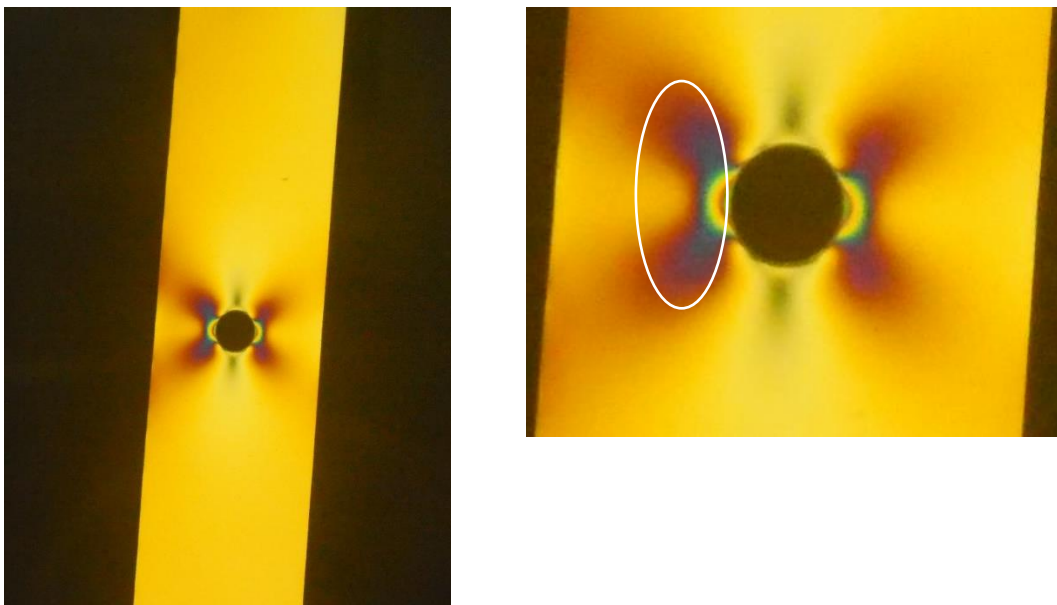


Figura 72 – Resultado do 6º Ensaio (Polariscópio Circular – 1600 N)

Na Figura 72, os tons das várias cores encontram-se bastante vincados e a cor azul começa a aparecer nas bandas mais de fora, como indicado com círculo branco. Sabe-se a cor de passagem do vermelho para ao azul tem como número de ordem de franja igual a 1, logo, nessa zona têm-se que:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{1 \times 130 \frac{N}{mm} / \text{franja}}{2 \text{ mm}} = 65 \text{ MPa} \quad (58)$$

A intensificação de tensão aumentou desde da existência das bandas amarelas, relativamente na mesma zona, de 39 para 65 MPa.

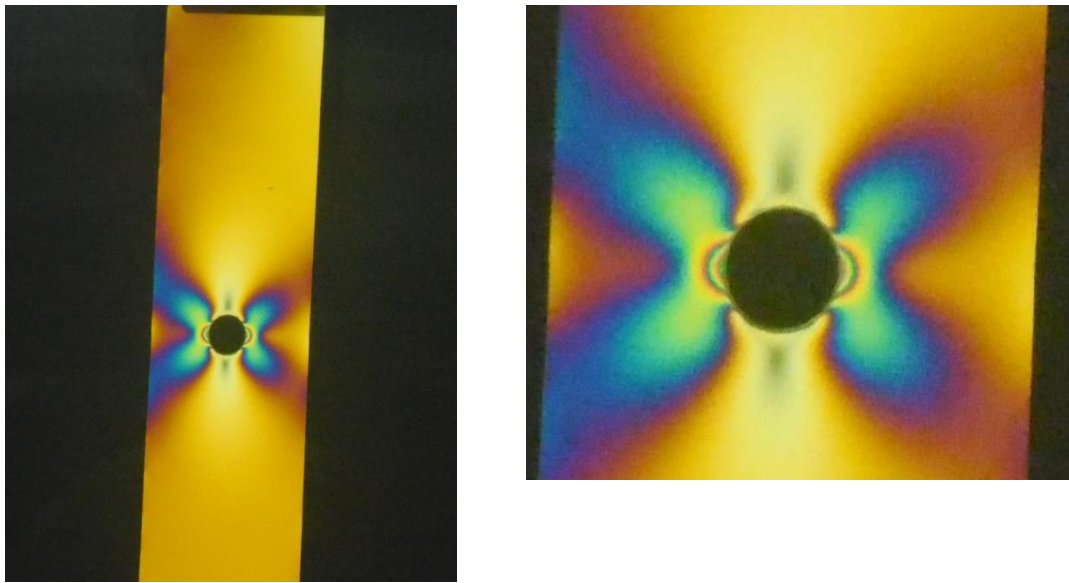


Figura 73 – Resultado do 6º Ensaio (Polariscópio Circular – 1900 N)

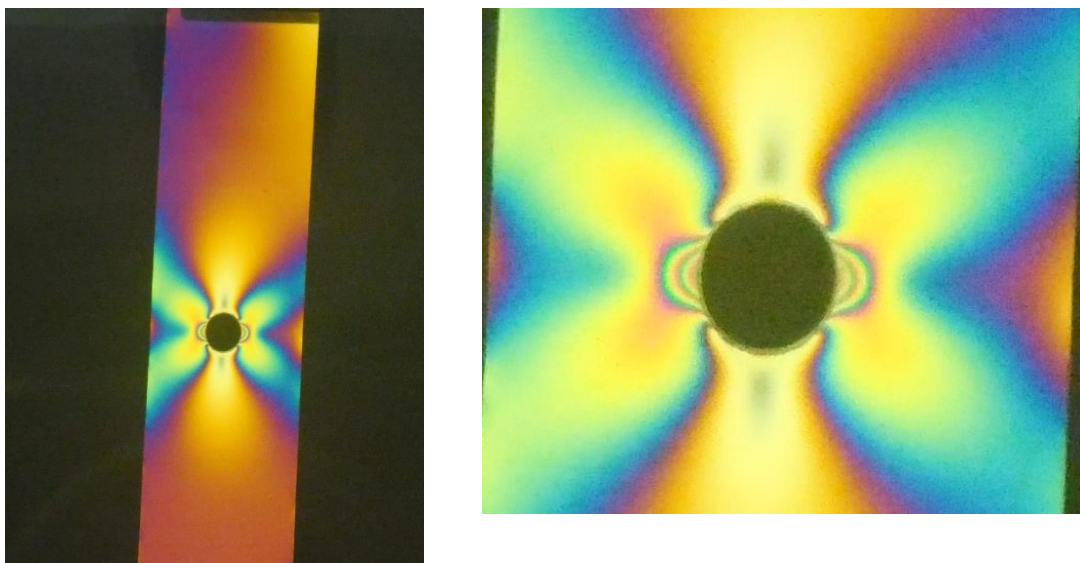


Figura 74 – Resultado do 6º Ensaio (Polariscópio Circular – 2100 N)

Na Figura 73 e Figura 74 as franjas isocromáticas encontram-se bastante visíveis e relativamente mais fáceis de identificar cada uma, tendo em conta o comprimento de onda de determinada zona. Focando-se mais na Figura 74, existe uma determinada ordem de cores, deste o contorno do furo para longe deste: Amarelo, Vermelho/Rosa, Azul e Verde. Entre o azul e rosa-vermelho existe uma cor de passagem que tem como número de ordem de franja 1. Entre o vermelho rosa e o verde existe outra cor de passagem com número de ordem igual a 2.

Para a zona entre a rosa-vermelho e o azul, o valor da diferença de tensão é:

$$\begin{aligned}\sigma_1 - \sigma_2 &= \frac{Nf_\sigma}{h} \\ &\Leftrightarrow \\ \sigma_1 - \sigma_2 &= \frac{1 \times 130 \frac{N}{mm} / \text{franja}}{2 \text{ mm}} = 65 \text{ MPa}\end{aligned}\tag{58}$$

Para a zona entre verde e rosa-vermelho, mais evidente à volta do furo, a diferença de tensões é:

$$\begin{aligned}\sigma_1 - \sigma_2 &= \frac{Nf_\sigma}{h} \\ &\Leftrightarrow \\ \sigma_1 - \sigma_2 &= \frac{2 \times 130 \frac{N}{mm} / \text{franja}}{2 \text{ mm}} = 130 \text{ MPa}\end{aligned}\tag{59}$$

Apesar de não ser visível, o que se iria conseguir mais perto do furo, seria uma transição de um laranja-vermelho para um azul-verde, com o número de ordem de franja 3:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{3 \times \frac{130 \frac{N}{mm}}{\text{franja}}}{2 \text{ mm}} = 195 \text{ MPa}\tag{60}$$

Apesar de estes valores serem relativamente a uma diferença e não ao valor individual de cada tensão, pode-se concluir que a diferença de tensão é efetivamente maior à volta do furo, sendo este cálculo possível com uma identificação relativamente correta das isocromáticas (cores) do estado de tensão. A sequência diminutiva do número de ordem de franja do perto furo para longe deste, indica o gradiente de concentração de tensões, ou seja, este diminui quanto mais longe estiver no furo. Este efeito é o conhecido efeito de Saint Venant.

De seguida, procedeu-se ao estudo das franjas fotoelásticas com o auxílio do polariscópio plano, retirando os dois filtros de um $\frac{1}{4}$ de onda e utilizando luz branca. Nesta etapa, o objetivo principal foi visualizar as isoclínicas e não calcular a diferença de tensões em determinado ponto. Esta razão está relacionada com a dificuldade que se verificou em observar algum tipo de franja em polariscópio plano e com luz branca, ao longo do processo.

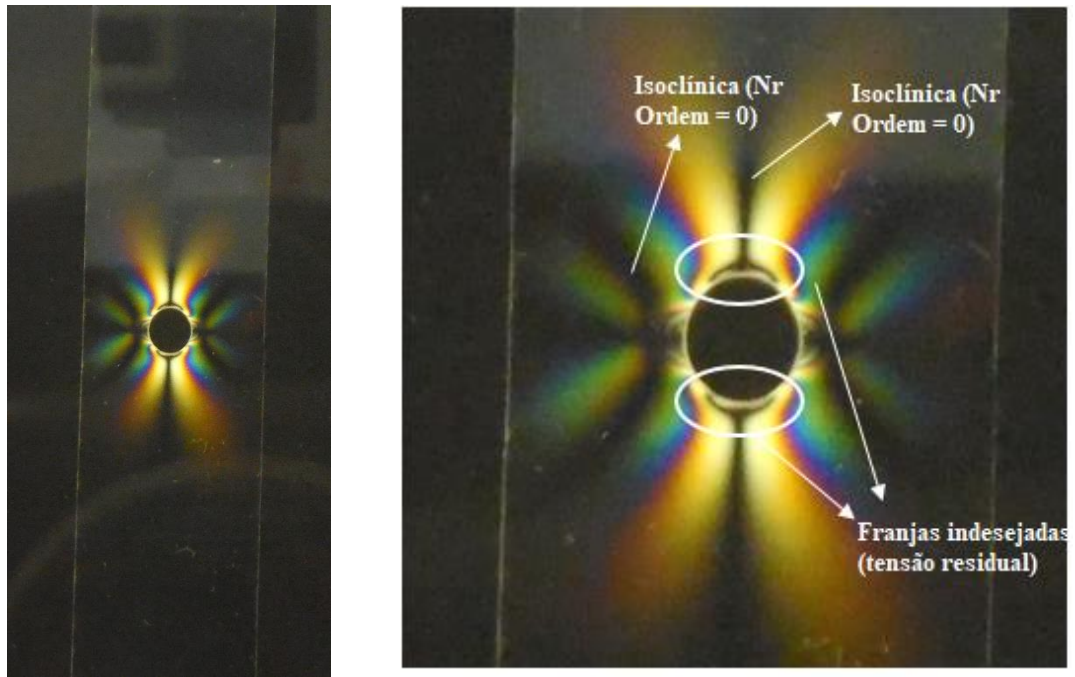


Figura 75 - Resultado do 6º Ensaio (Polariscópio Plano – 2000 N)

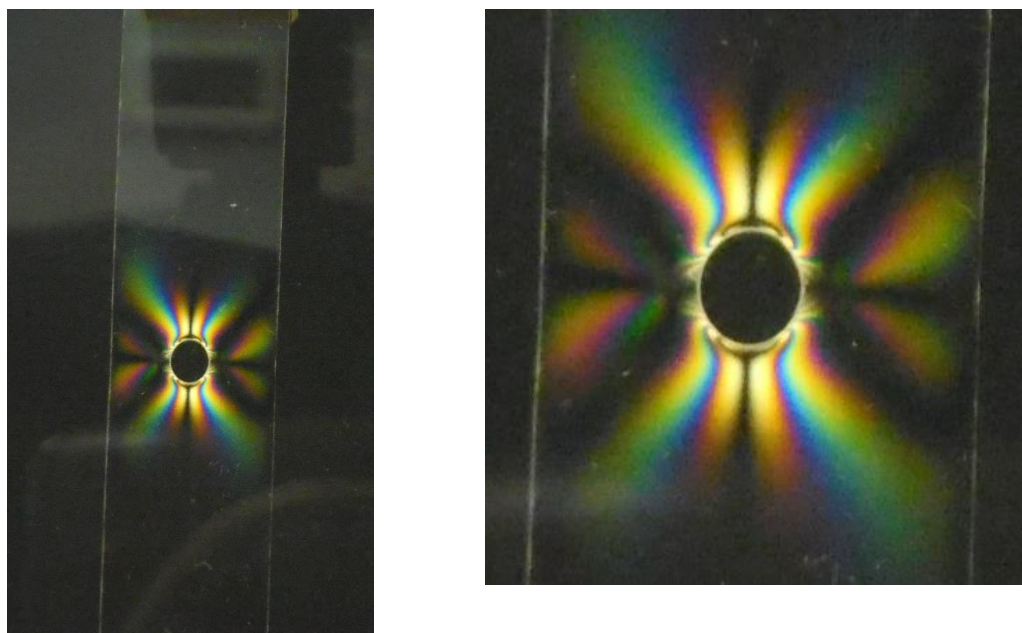


Figura 76 - Resultado do 6º Ensaio (Polariscópio Plano – 2500 N)

A Figura 75 e 76 permite, finalmente, observar isoclínicas e isocromáticas. Facilmente se observa as isoclínicas pois estas são bandas pretas. Estas são isoclínicas de 0° pois manteve-se o polarizador e analisador perpendiculares entre si com um deles a 0° e outro a 90° . A Figura 74 evidencia como as cores vão fazendo uma sequência à medida que se aumenta a carga no provete. Por exemplo, no local da banda amarela da Figura 75, no topo e por baixo do furo, com o aumento da carga, na Figura 76 já começa a aparecer a cor rosa/vermelho e azul nesse mesmo sitio. Este provete acabaria por fraturar aos 2800 N (Figura 77).

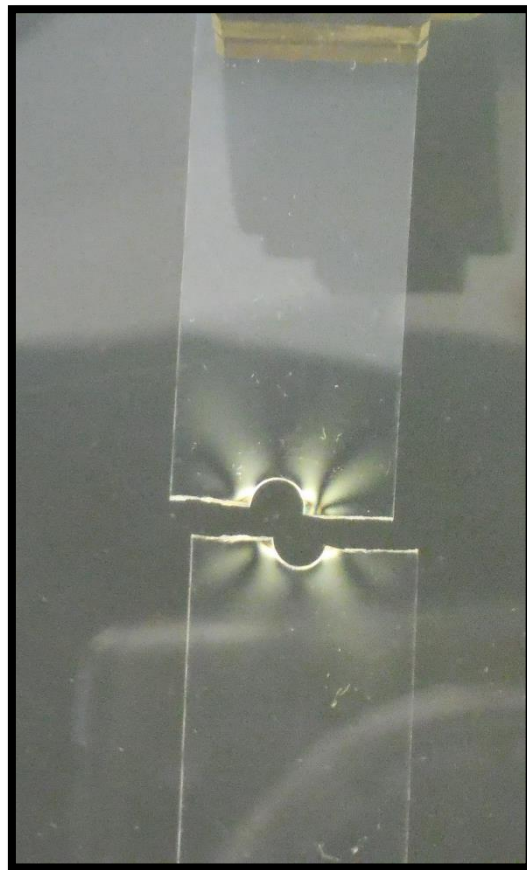


Figura 77 - Resultado do 6º Ensaio (Rotura a 2800 N)

A Figura 77 consegue também exemplificar um caso de plastificação junto ao furo, evidenciando-se esse comportamento pelos “sulcos” profundos à volta do furo. Esta situação deve-se ao facto de se tratar de um caso de tensão plana, tendo a placa uma espessura muito reduzida, seu comportamento ser dúctil. Em tensão placa existem mais condições para ocorrência do fenómeno de crazing e, naturalmente, a plastificação. O mesmo já não ocorre em deformação placa, em que se verifica um comportamento maioritariamente frágil.

7.8. 7º Ensaio

No último ensaio, pretendeu-se testar e visualizar o efeito de Saint Venant e da concentração de tensões aquando da criação de dois furos numa só placa, na mesma linha vertical.

Iniciou-se o estudo através do polariscópio plano, com o polarizador e analisador cruzados entre si, um a 0° e o outro a 90° . Este ensaio tem também um objetivo um pouco mais qualitativo, em vez de quantitativo, pois o valor da diferença de tensões dos resultados será bastante semelhante ao calculado no 6º ensaio. Diferem um do outro na medida em que no 7º ensaio os resultados serão em duplicado, já que se trata de um provete com dois furos.

A Figura 78 apresenta o resultado numa placa com dois furos em linhas vertical. A Figura 79 apresenta um aumento de imagem (*zoom in*) dos dois furos: o furo do lado esquerdo é o furo de cima e o furo do lado direito é o furo de baixo.

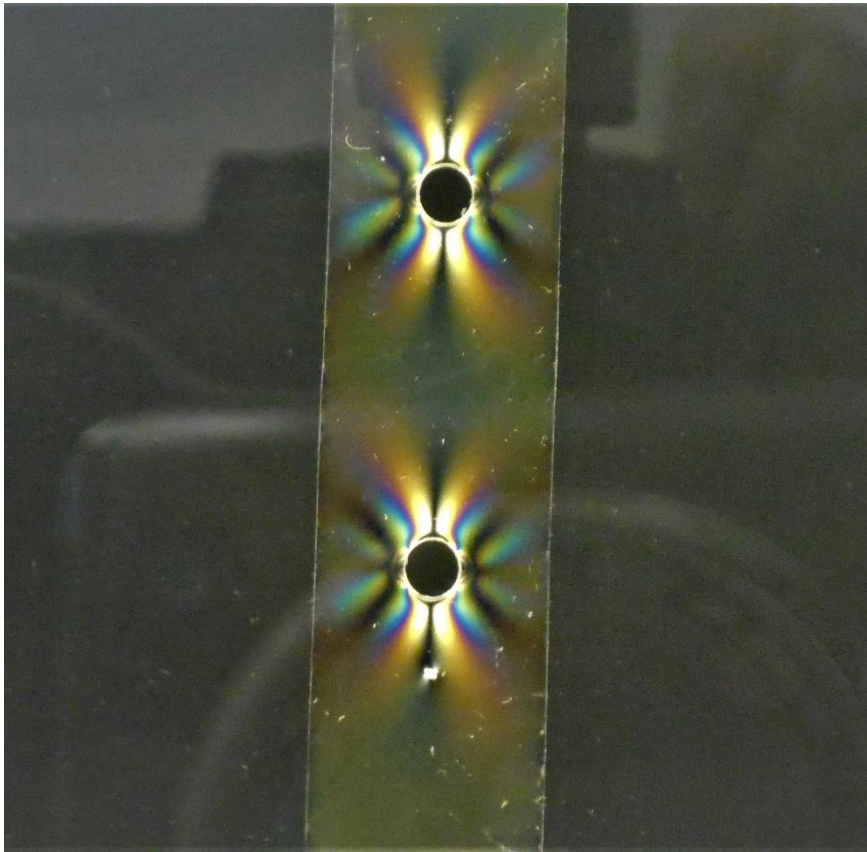


Figura 78– Resultado do 7º Ensaio (Polariscópio Plano – 2000 N)

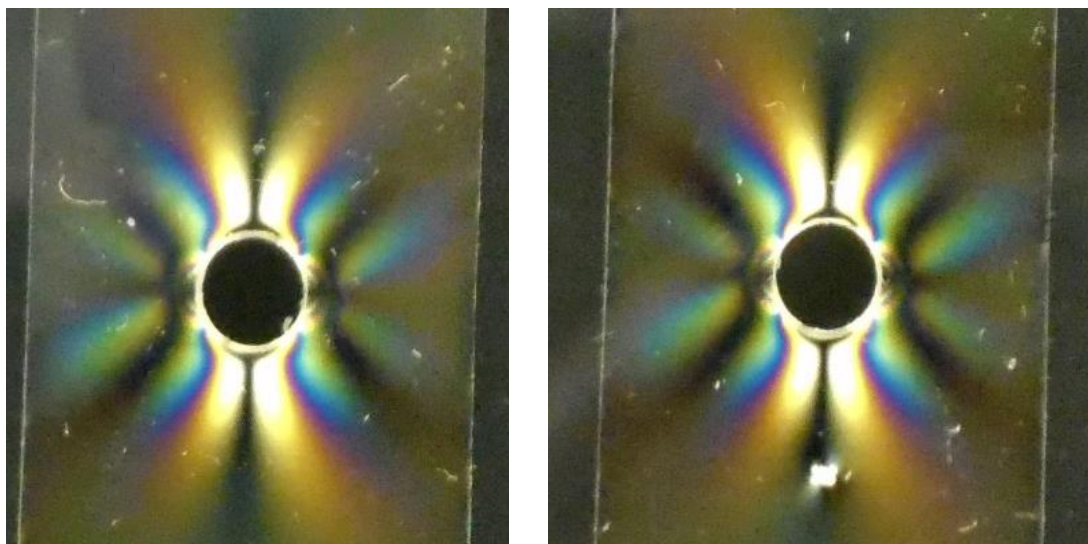


Figura 79 – Zoom in do resultado do 7º Ensaio (Polariscópio Plano – 2000 N)

Verifica-se nas duas figuras, 78 e 79 a semelhança dos resultados obtidos também em polariscópio plano do 6º ensaio. Verifica-se também que os furos se encontram a uma distância favorável para que não haja transmissão de tensão de um furo para o outro.

A partir dos 2100 N, o furo de cima entra em rutura. Uma razão para ter sido o furo de cima este o primeiro a partir poderá ser pela maior plastificação existente à volta desse furo do que no outro de baixo, que se verificou durante a sua furação (Figura 80).

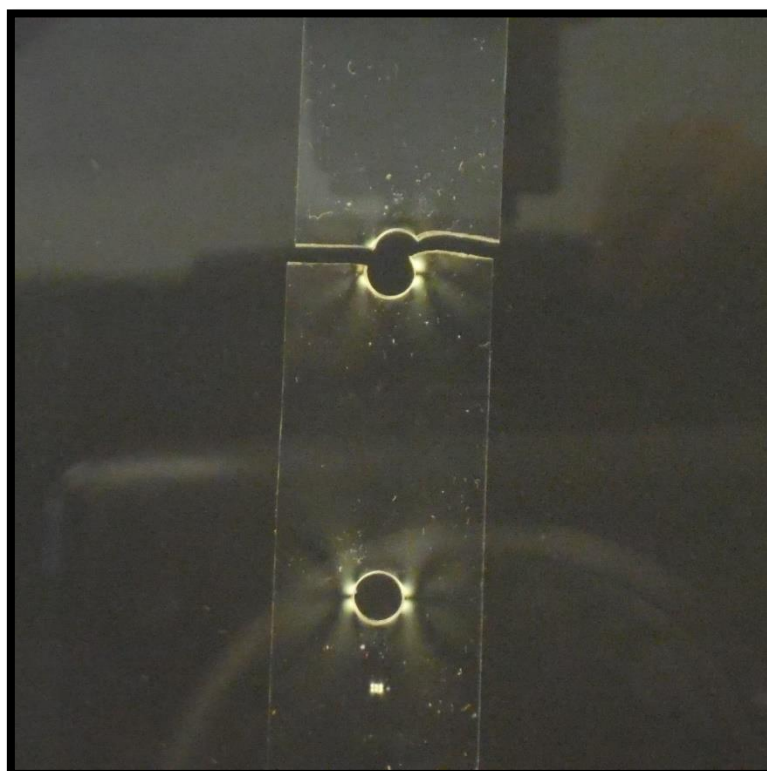


Figura 80 – Resultado do 7º Ensaio (Rotura a 2100 N)

A Figura 81 apresenta o detalhe dos dois furos, com um deles fraturado.

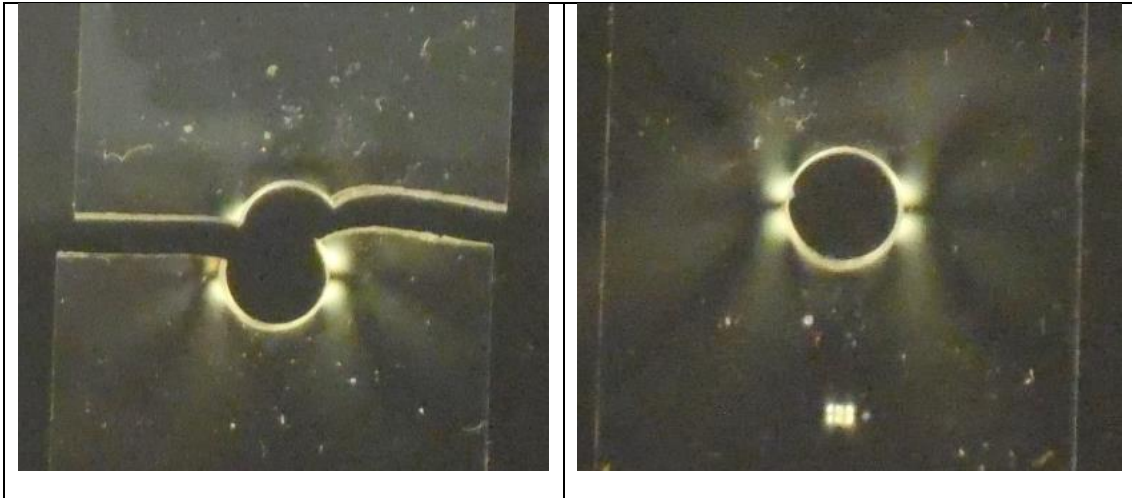


Figura 81 – Zoom in do resultado do 7º Ensaio (Rotura a 2100 N)

Consegue-se visualizar as bandas de plastificação à volta do furo, sendo estas mais visíveis no furo de baixo (no lado esquerdo da Figura 81). Esse furo também estava perto de partir.

Em segundo lugar, fez-se o mesmo teste, mas com o polariscópio circular. Neste tipo de polariscópio, começou-se por colocar o polarizador e analisador cruzados, tal como os dois filtros de $\frac{1}{4}$ de onda.

Os resultados para os 1000 N apresentam-se nas Figuras 82 e 83.

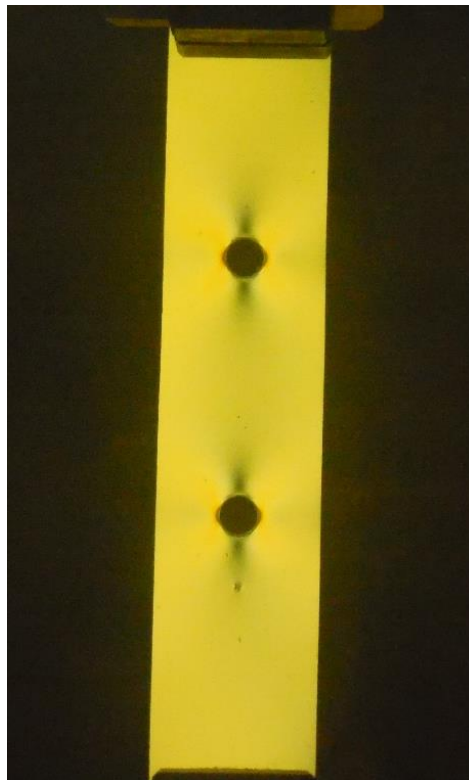


Figura 82 – Resultado do 7º Ensaio (Polariscópio Circular – 1000 N)

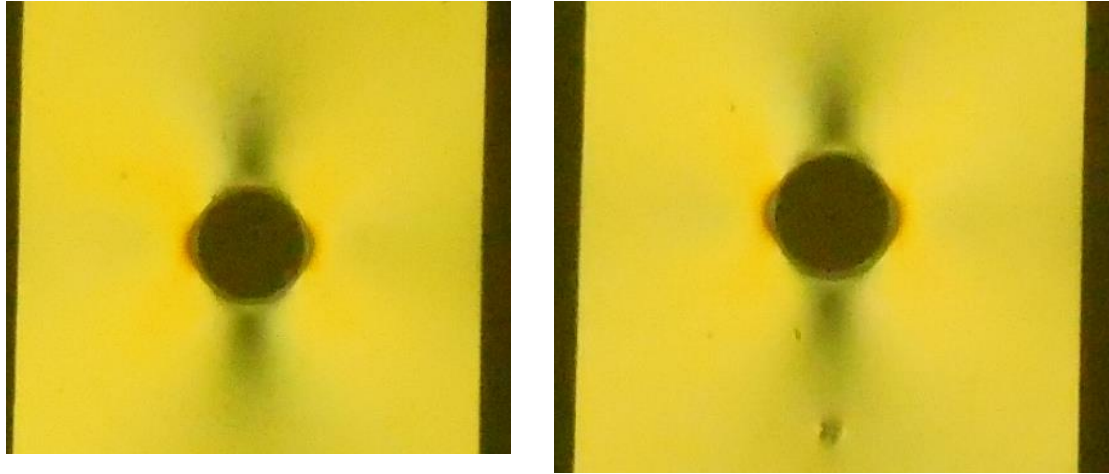


Figura 83 – Zoom in resultado do 7º Ensaio (Polariscópio Circular – 1000 N)

Inicialmente com pouca carga, as franjas são sempre pouco visíveis. A razão principal deste efeito centra-se na relação com a constante de franja para o PMMA. Esta tem um valor relativamente elevado, ou seja, 130 N/mm/franja. Isto quer dizer que é necessário carregar 130 N de cada vez para se ver cada franja.

Este fenómeno será semelhante para o carregamento seguinte, correspondente à Figura 84 e 85.

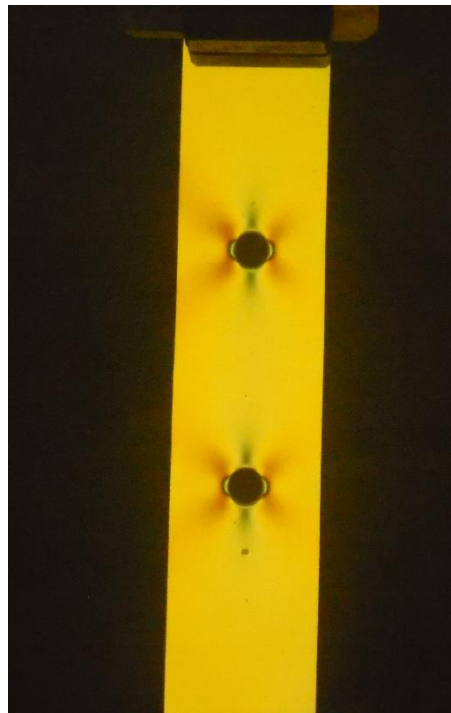


Figura 84 - Resultado do 7º Ensaio (Polariscópio Circular – 1300 N)

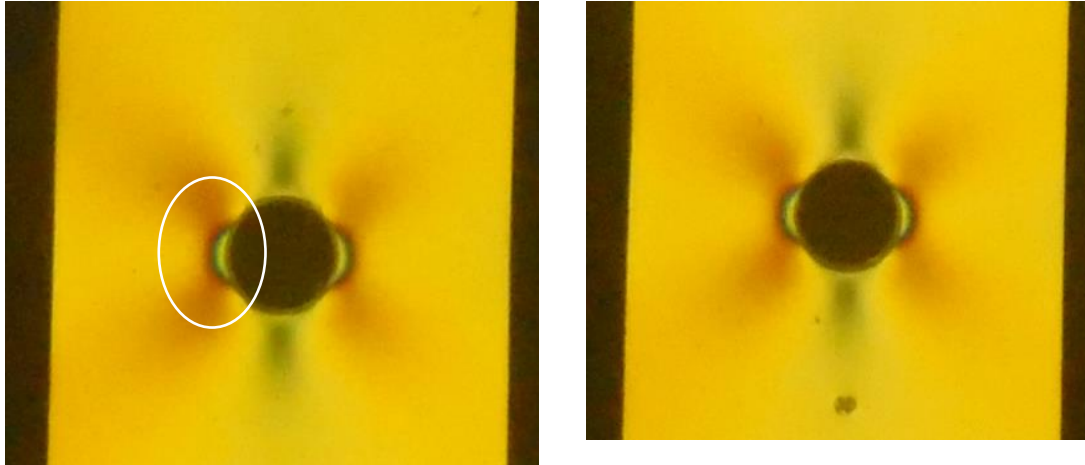


Figura 85 – Zoom in do resultado do 7º Ensaio (Polariscópio Circular – 1300 N)

Apesar de ser semelhante as figuras 83 e 84 com a 84 e 85, é visível que as primeiras franjas mais nítidas se iniciam no local de maior concentração de tensões, como indicado nos círculos a branco na Figura 85.

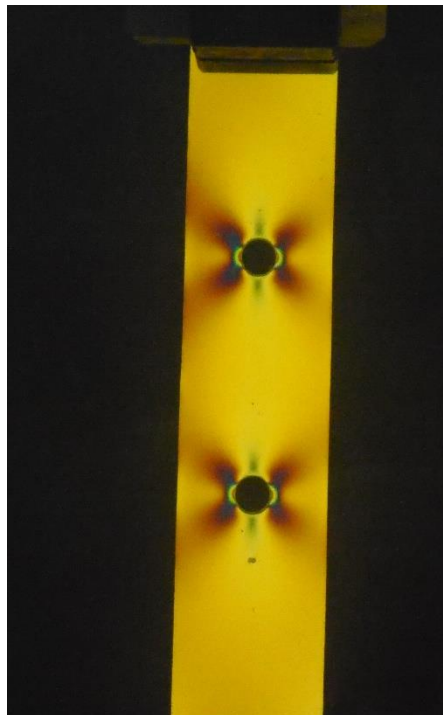


Figura 86 – resultado do 7º Ensaio (Polariscópio Circular – 1600 N)

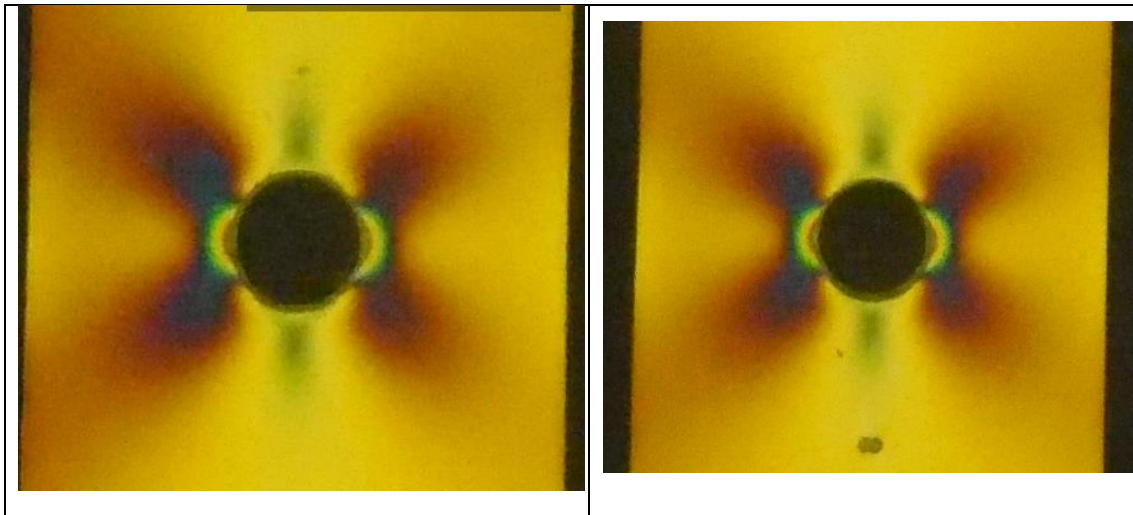


Figura 87 – Zoom in resultado do 7º Ensaio (Polariscópio Circular – 1600 N)

No caso das Figuras 86 e 87, observa-se que as primeiras bandas de cores são relativamente azuis pois já foi passagem de cor dos bordos no furo para mais longe do furo, com o aumento de carga.

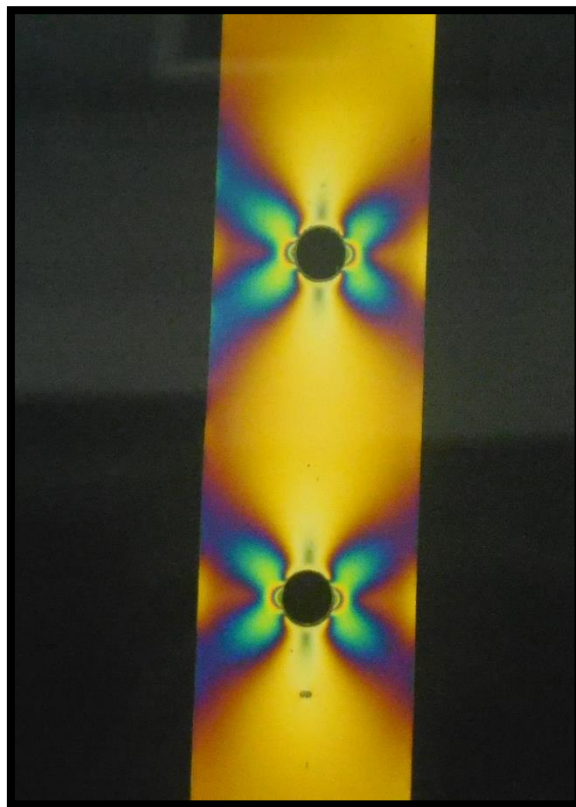


Figura 88 – resultado do 7º Ensaio (Polariscópio Circular – 1700 N)

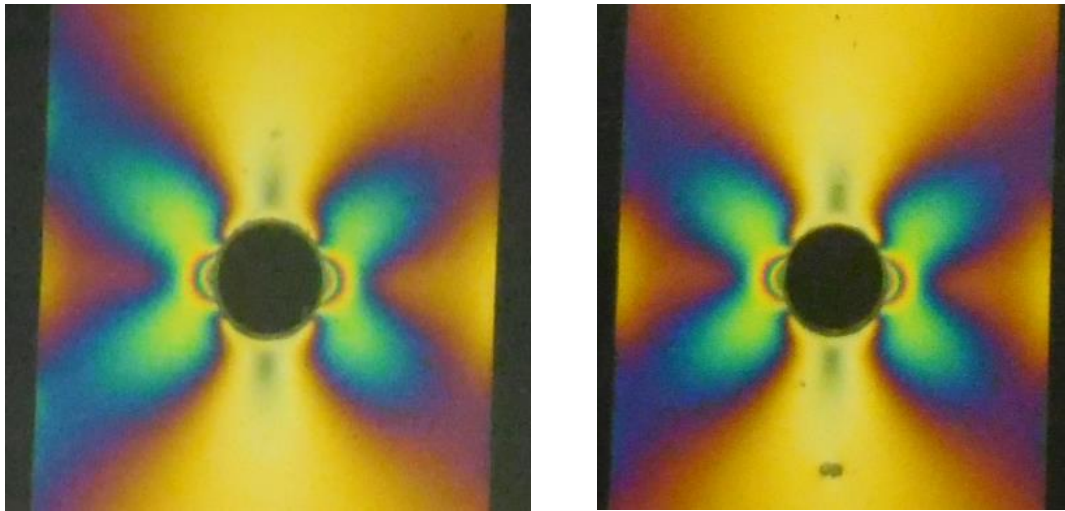


Figura 89 – Zoom resultado do 7º Ensaio (Polariscópio Circular – 1700 N)

As duas últimas figuras permitem observar muito bem o gradiente de cores que ocorre com o aumento de carregamento da placa. As cores foram mudando de posição desde o primeiro carregamento até começarem a ocuparem mais área de uma só cor, como por exemplo, a cor azul que é bastante visível.

O mesmo ocorre nas Figuras seguintes (90 e 91).

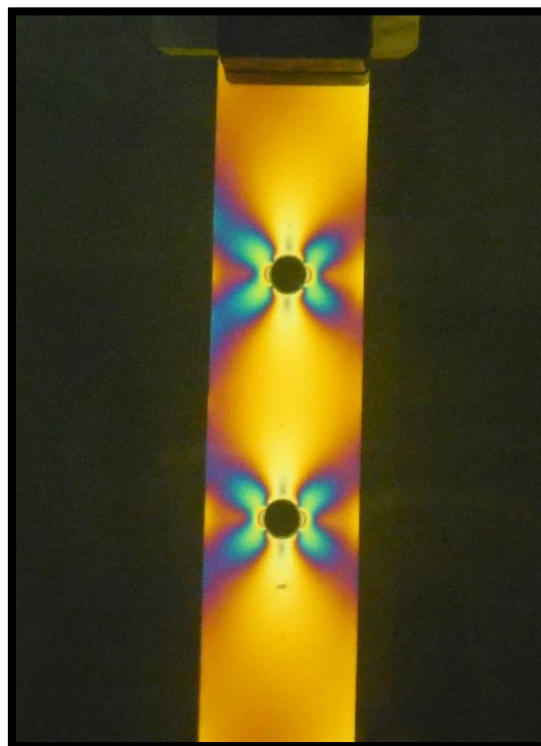


Figura 90 – resultado do 7º Ensaio (Polariscópio Plano – 1900 N)

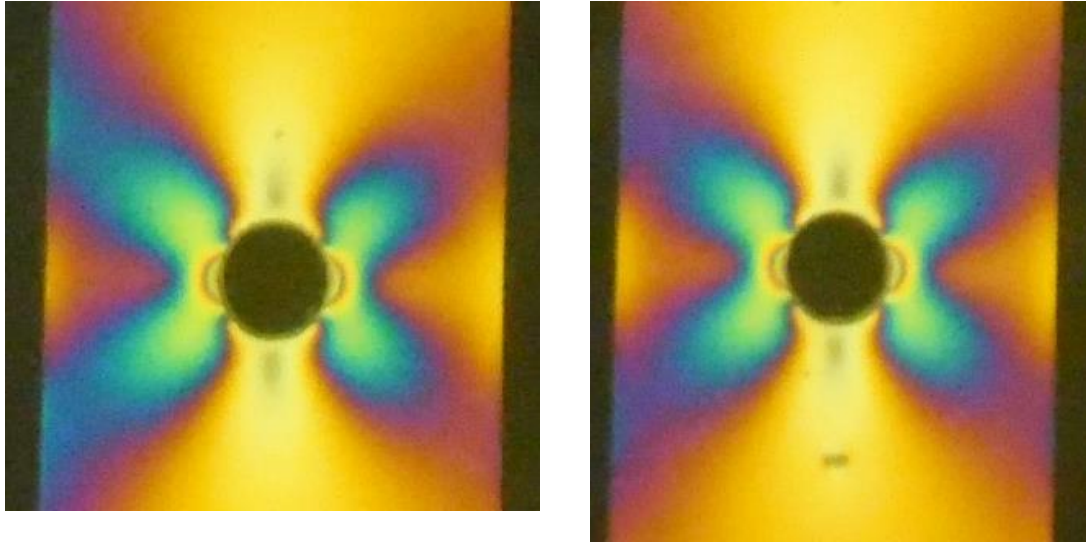


Figura 91 - resultado do 7º Ensaio (Polariscópio Plano – 1900 N)

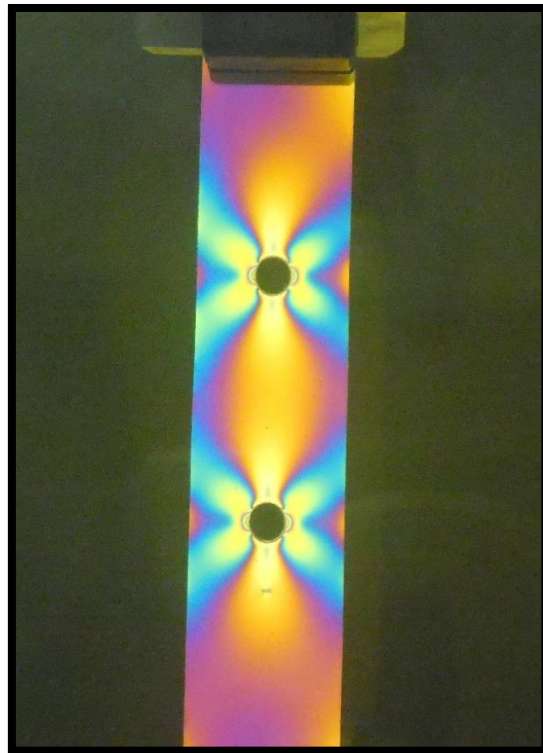


Figura 92 – resultado do 7º Ensaio (Polariscópio Plano – 2100 N)

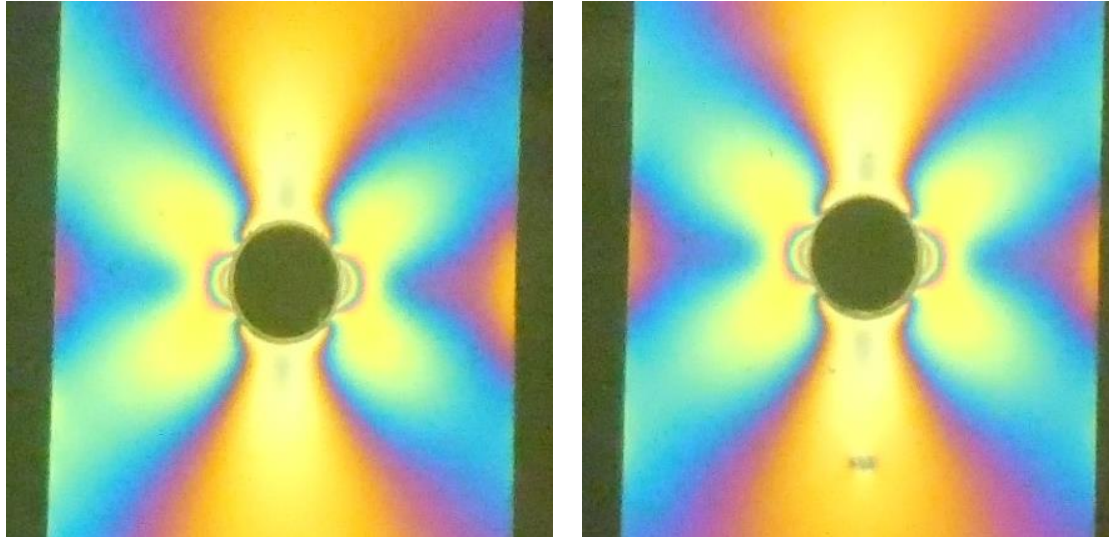


Figura 93 – zoom in do resultado do 7º Ensaio (Polariscópio Plano – 2100 N)

Neste último ensaio, visualiza-se que as cores estão bastante claras e a ficar cada vez mais dispersas devido ao carregamento elevado em que a placa está submetida. O azul passou a estar ainda mais longe do furo, sendo este substituído por um amarelo-branco. É exatamente este o fenómeno que ocorre neste tipo de experiência. Quanto mais se carrega a placa, maior é a modificação do gradiente de cor. Cada cor, está associado a um número de ordem de franja, que estará relacionado com uma diferença de tensões principais. Ou seja, a franja mais próxima do furo é que terá um número de ordem de franja maior pois é o local com mais concentração de tensões.

Nesta fase, existia um risco alto de ocorrer fratura devido à incapacidade do material de absorver mais energia.

8. Simulação Numérica (Método dos Elementos Finitos)

De modo a calcular a diferença de tensões principais e comparar com os ensaios experimentais, o modelo em PMMA foi modelado em ANSYS com as mesmas dimensões: uma placa com um furo central circular e outra com dois centrais circulares. Foi modelado apenas um quarto de cada modelo, devido a facilidade na modelação e ambas estão constringidas simetricamente. O modelo de estudo encontra-se em comportamento linear-elástico, comportamento este típico no início do carregamento de um provete polimérico.

8.1. 1º Modelo

O primeiro modelo é o modelo com furo circular central. Começa-se por criar os pontos, *keypoints*, que irão unir as várias linhas. (Figura 94)

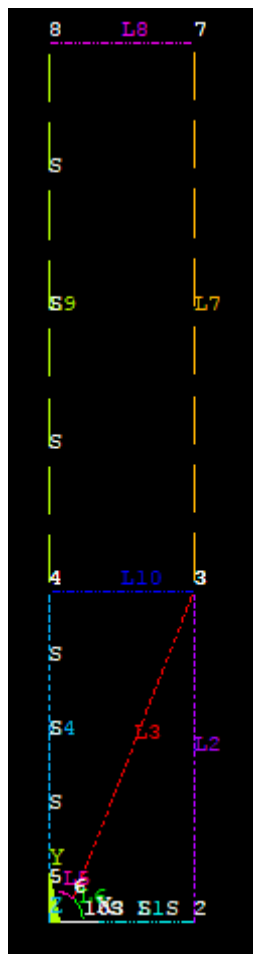


Figura 94 - Pontos e linhas para criar áreas do modelo com um furo

Essas linhas serão preenchidas, criando as várias áreas que fazem parte do modelo. Depois, aplica-se um constringimento simétrico no topo do modelo e na parte de

baixo do modelo, criando uma situação semelhante à experimental na máquina de ensaio de tracção. (Figura 95)

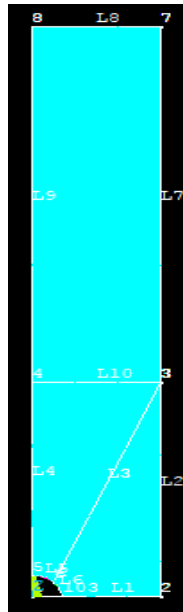


Figura 95 – Área do modelo em ANSYS com furo central

O passo seguinte foi a criação das malhas. Fez-se as divisões das linhas de modo a existir alguma refinação na malha e, posteriormente, nos resultados. Quando maior for a divisão, maior é a refinação e maior é a qualidade dos resultados. Foram feitas três refinações que deram resultados um pouco diferentes (Figura 96).

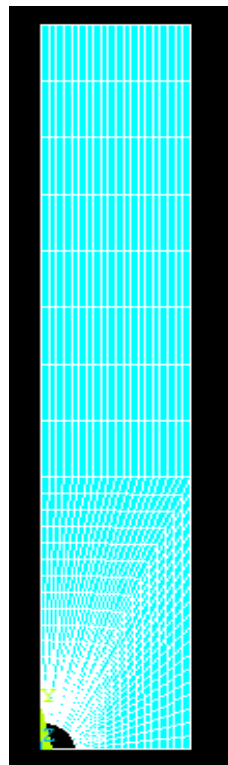


Figura 96 – Primeira refinação de modelo em ANSYS com furo central

Aplicando os constrangimentos a nível de movimento do provete e aplicando uma força arbitrária uniformemente distribuída no topo do provete, obtemos a Figura 97.

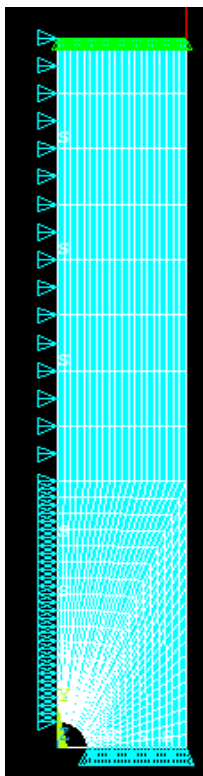


Figura 97 – Modelo final em ANSYS do provete com furo central

Para uma análise de dados, foram colocados numa tabela os vários valores obtidos das tensões principais, individualmente e a sua diferença, com a respetiva refinação de malha. Esta refinação é feita a partir de uma malha mais grosseira até uma mais fina. A força escolhida tem em conta o 6º ensaio, escolhendo-se a última força possível para esse ensaio de 2100 N. Para refinar, altera-se os parâmetros LESIZE, ou seja, as divisões das linhas, como se demonstra na Tabela 6 seguinte.

Tabela 6 – Nível de refinação e resultados obtidos do 1º modelo em ANSYS

Nível de Refinação	Nº Divisões/LESI (8 Linhas)	Nº Elementos	σ_1 [MPa]	σ_2 [MPa]	$\sigma_1 - \sigma_2$ [MPa]
1	10/15/10/10/15/15/15/15	420	252.598	32.891	219.71
2	15/20/15/15/20/20/20/20	720	250.426	31.414	219.01
3	20/25/20/20/25/25/25/25	1200	253.798	31.379	222.42

Verifica-se que, aquando do aumento do nível de refinação da malha, maior é a tensão principal 1, porque a precisão nos resultados também aumenta, mantendo-se praticamente constante a tensão principal 2. Isto indica que a tensão principal 2 não tem muita influencia no cálculo da diferença de tensões, a nível qualitativa, já que tendo apenas a tensão principal dá uma ideia de como se encontra o estado de tensão à volta do furo.

A Figura 98 e Figura 99 apresentam um dos resultados, em ANSYS, para a 1ª refinação para o resultado da tensão principal 1.

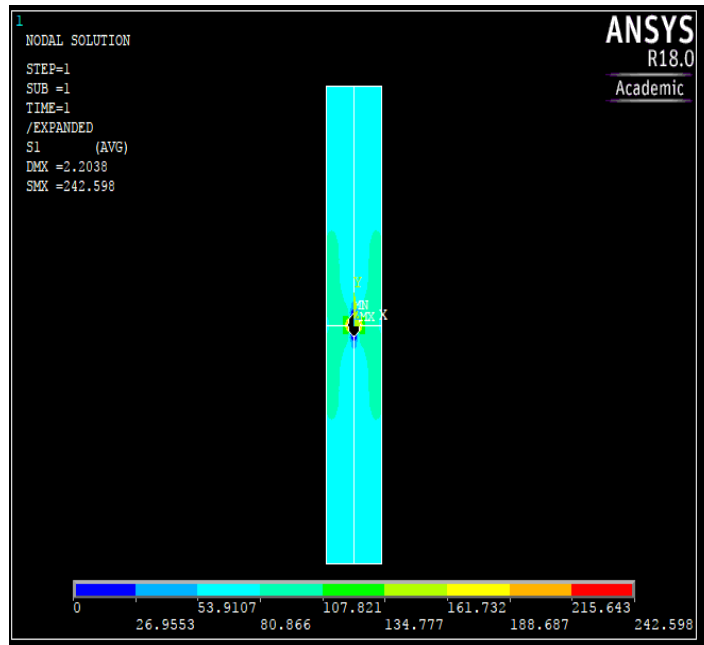


Figura 98 - Tensão principal 1 da 1ª Refinação (1º Modelo)

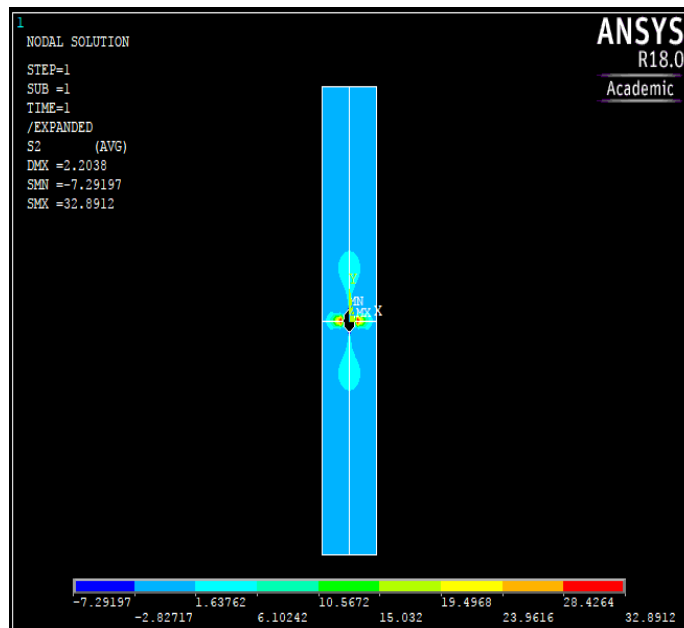


Figura 99 - Tensão principal 2 da 1ª Refinação (1º Modelo)

A Figura 100 apresenta o resultado que foi obtido no 6º ensaio para efeitos de comparação. Como se trata de valores de tensão 1 e 2, individualmente, não é possível comparar corretamente os dois tipos de resultado. No entanto, observam-se as mesmas franjas do ensaio nos resultados numéricos da tensão principal 2, na parte de cima e de baixo do furo.

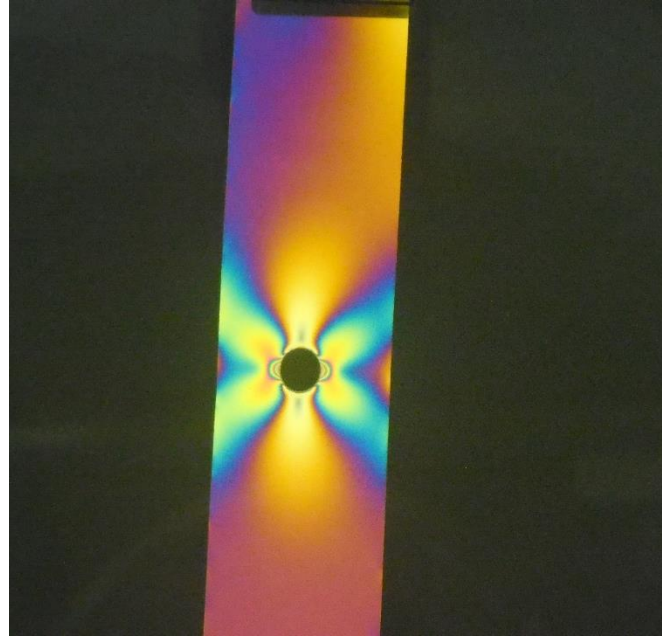


Figura 100 – Resultado do 6º Ensaio (Provet com 1 furo central circular)

8.2. 2º Modelo

No modelo de dois furos circulares, o procedimento para a sua construção foi a mesma do 1º modelo. A principal diferença foi a necessidade de criar uma geometria distinta, a partir de um quarto de placa, de modo a construir um modelo com dois furos circulares localizados na mesma linha vertical.

A Figura 100 apresenta os pontos e linhas criados no modelo.

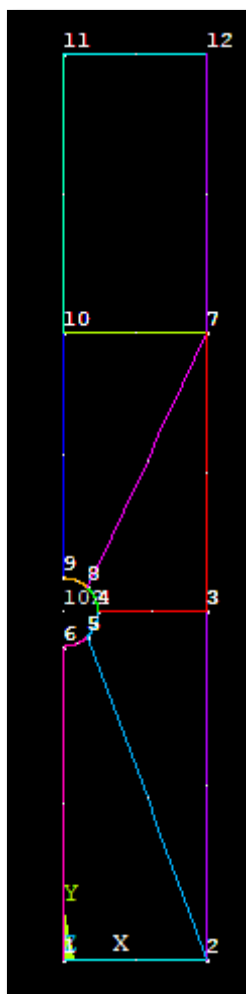


Figura 101 – Pontos e linhas para do modelo com dois furos circulares

De seguida, procedeu-se à divisão das linhas para se poder mapear as áreas, ou seja, criar uma malha. (Figura 101)

Os constrangimentos e cargas uniformemente distribuídas foram colocadas de seguida, como a Figura 102 demonstra.

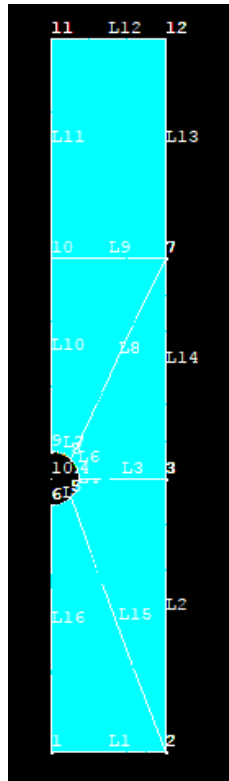


Figura 102 – Área do modelo de dois furos

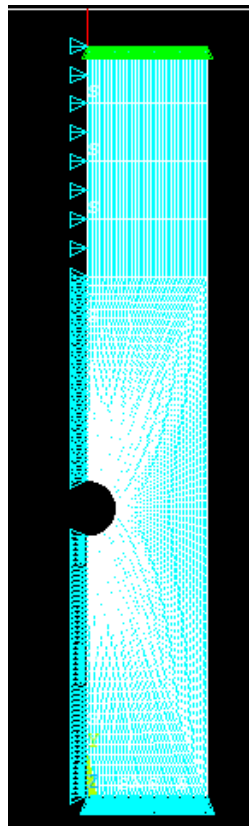


Figura 103 – Modelo final em ANSYS do provete com dois furos

Aplicando uma força de 2100 N no modelo, obtém-se os resultados na figura 103 e Figura 104. Os resultados numéricos apresentam-se na Tabela 7.

Tabela 7 - Nível de refinação e resultados obtidos do 2º modelo em ANSYS

Nível de Refinação	Nº Divisões/LESIZE (14 Linhas)	Nº Elementos	σ_1 [MPa]	σ_2 [MPa]	$\sigma_1 - \sigma_2$ [MPa]
1	20/20/15/20/20/20/20/15/20/15/20/20/15/15	1280	262.785	32.853	229.93
2	25/25/20/25/25/25/25/20/25/20/25/25/20/20	2100	266.009	32.5066	233.50
3	30/30/25/30/30/30/30/25/30/25/30/30/25/25	3120	267.665	32.6344	235.03

Tal como na simulação numérica do modelo com um furo, a tensão principal 1 aumenta com o aumento da refinação. Por outro lado, a tensão principal 2 mantém-se praticamente constante. Este facto também indica que existe efetivamente uma distância considerável entre os dois furos para que eles se comportem como um furo só, e não influenciarem o estado de tensão de um do outro.

As Figuras 104 e 105 apresentam o estado de tensão obtido em ANSYS na primeira refinação.

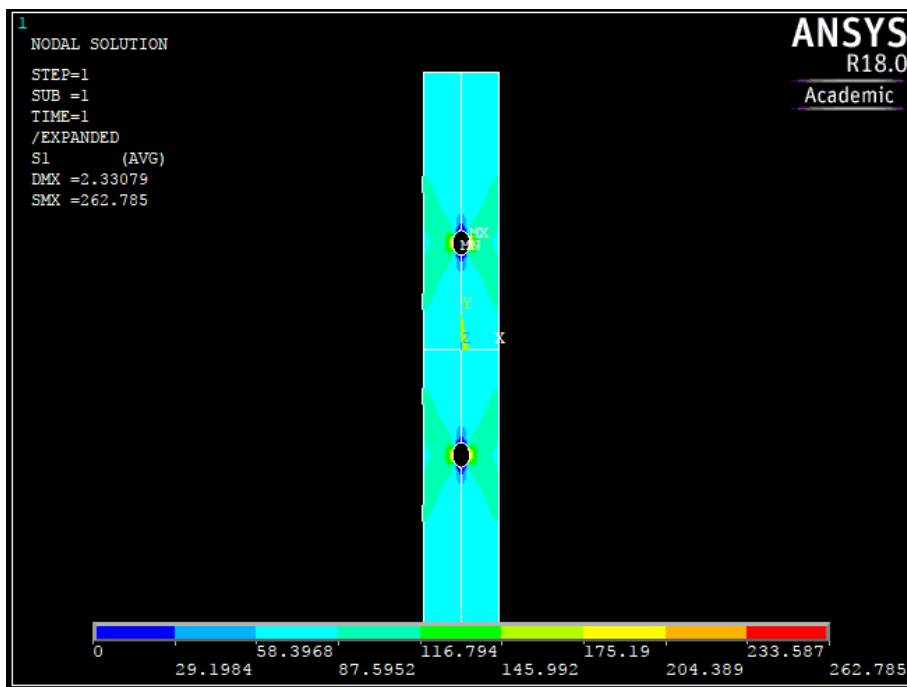


Figura 104 - Tensão principal 1 (2º Modelo)

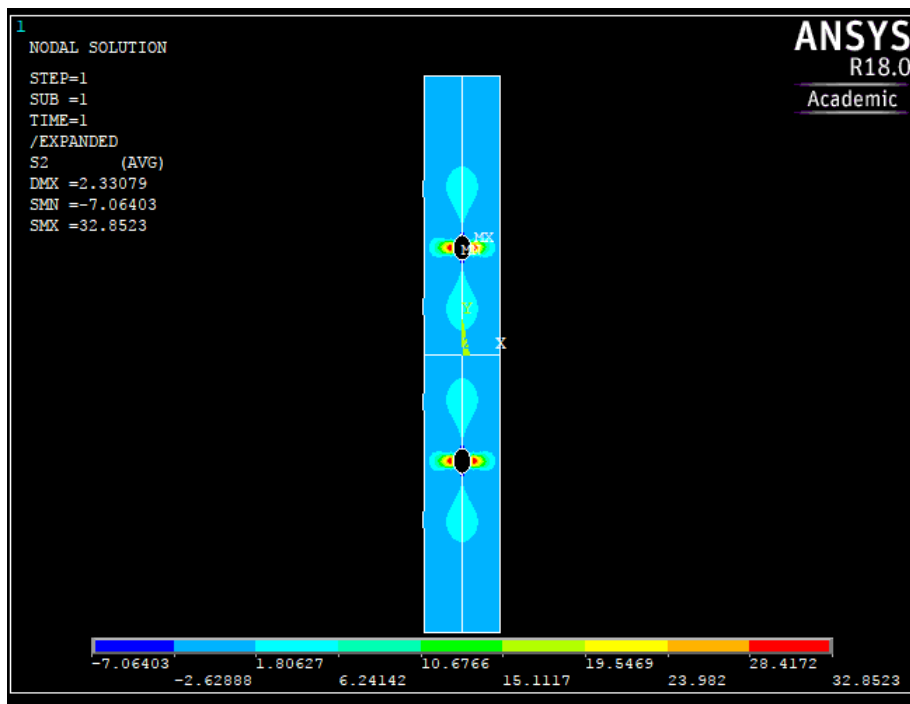


Figura 105 – Tensão principal 2 (2º Modelo)

A Figura 106 apresenta o resultado que foi obtido no 7º ensaio de modo a comparar. Tal como na última simulação, não é possível fazer uma análise qualitativa de comparação entre os dois tipos de resultados, numéricos e experimentais, porque se trata de diferenças de tensões e os seus valores individuais.

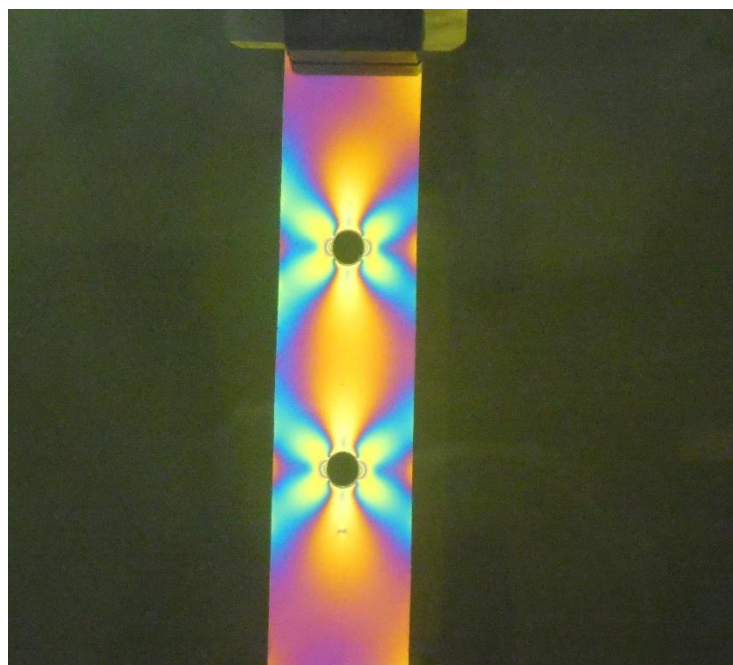


Figura 106 - Resultado do 7º Ensaio (Provete com 2 furos circulares)

9. Discussão de Resultados

Nas tabelas seguintes, 8 e 9, é apresentam-se os valores de diferença de tensão principal de forma analítica (experimental) e numérica, e os respetivos erros com a 3º refinação associada. Escolheu-se o último nível de refinação pois permite ter um resultado mais plausível. Também se escolheu os resultados obtidos no 6º ensaio, a partir da qual foi visível as franjas fotoelásticas e porque os resultados são semelhantes ao 7º ensaio, com a diferença de serem dois furos em vez de um apenas.

Tabela 8 – Tabela de Erros do 1º modelo experimental e numérico

2100 N – 1ºModelo	
Resultado Experimental $\sigma_1 - \sigma_2$ [MPa]	Resultado Numérico $\sigma_1 - \sigma_2$ [MPa]
65 MPa	219.71MPa (1ªRefinação)
130MPa	219,01MPa (2ª Refinação)
195MPa	222.42MPa (3ª Refinação)
Erro associado: $\left \frac{195-222.42}{222.42} \right = 0.123 = 12.3\%$	

Tabela 9 – Tabela de Erros do 2º Modelo experimental e numérico

2100 N – 2ºModelo	
Resultado Experimental $\sigma_1 - \sigma_2$ [MPa]	Resultado Numérico $\sigma_1 - \sigma_2$ [MPa]
65 MPa	299.93 MPa
130 MPa	233.50MPa
195 MPa	235.03MPa
(nos dois furos)	
Erro associado: $\left \frac{195-235,03}{235,03} \right = 0.17 = 17\%$	

Verifica-se que o erro do 1º modelo é um pouco menor que o erro no 2º modelo. Isto porque, no 2º modelo, a diferença de tensões é também mais elevada devido à existência de dois concentradores de tensão, ou seja, os dois furos circulares.

Pode-se concluir que a diferença de tensões não é muito elevada, mesmo nos dois casos de modelos, pois à medida que se vai aproximando do furo e com uma distinção visual das cores à volta do furo, é possível obter um valor de diferença de tensão cada vez mais correto e comparável a nível numérico.

10. Conclusões

Foi apresentada neste trabalho um método experimental não-destrutivo com o objetivo de efetuar uma análise do estado de tensão num material. A partir deste método, fizeram-se vários ensaios com dois provetes e com dois materiais diferentes.

Com o objetivo de analisar primeiramente o material PMMA, o primeiro obstáculo encontrado foi como colocar o provete na máquina uniaxial para que a distribuição de carga, a partir da garra da máquina, fosse centrada e uniforme em relação ao furo central do provete. Tentou-se construir uma junta aparafusada para que a garra não estivesse em contacto direto com o material e que pudesse fazer o efeito pretendido. No entanto, este revelou-se bastante complicado a sua elaboração, nomeadamente na furação das chapas de metal, de forma a tentar manter os três furos na mesma linha central. Esta complicação deveu-se à falta de experiência em manusear engenhos de furar e estes serem já um pouco antigos, criando fontes de vibração indesejadas que provocam a falta de qualidade nos furos. Por isso, verificou-se que esta partiu na zona aparafusada, sendo este um dos modos de falha que se podem verificar.

Podendo ser um problema de dimensões do provete, testou-se novamente o mesmo material, mas com dimensões maiores, juntamente com as chapas metálicas. Porém, decidiu-se apenas colocar parafusos nos furos das pontas e deixar o furo do meio sem parafuso, de modo a evitar o problema da linha central. O que se verificou, dessa vez, foi que não se conseguia observar qualquer tipo de franja, exceto pequenas bandas pouco claras. Com receio de poder quebrar o material, não se elevou muito o valor do carregamento, tornando este um erro comum nos ensaios.

De seguida, testou-se com essas mesmas chapas, o material Poliestireno e com dimensões semelhantes ao provete de PMMA do ensaio anterior. O furo do meio também foi deixado sem parafuso. Este revelou-se um desafio na sua furação devido ao sobreaquecimento verificado nos bordos no furo aquando da sua furação, provocando enorme plastificação, maior probabilidade de criar entalhes nos furos e maiores fontes de concentração de tensões para possíveis roturas. Este provete voltou a quebrar na zona aparafusada.

Ao contactar alguns peritos nesta área, em especial, a Dr.^a Rachel Tomlinson da Universidade de Sheffield, permitiram observar um ensaio possível utilizando policarbonato e sem necessidade de se utilizar o apoio com chapas metálicas. Por esta razão, os ensaios posteriores aos primeiros três procederam-se sem junta aparafusada, com o topo e a base do provete em contacto direto com a garra da máquina. Sempre utilizando luz branca, obtêm-se pela primeira vez bandas fotoelásticas visíveis no 4º ensaio. No entanto, continuou-se sem se conseguir fazer uma análise um pouco mais quantitativa pois, ao não carregar mais o provete, não se conseguiu diferenciar as isocromáticas, a cores, e as isoclínicas, a preto, observáveis no polariscópio plano.

No 5º ensaio, testa-se esta nova forma de efetuar o ensaio, sem as chapas, no material poliestireno. Verificaram-se os mesmos problemas do 3º ensaio, na furação, e a rotura do material ocorreu a um carregamento muito baixo. Este valor baixo nem permitiu

fazer algum tipo de visualização pois, ao este ser um material frágil, o carregamento que ele suportava não permitia criar franjas fotoelásticas.

Sabendo que o PS é um material fotoelástico, mas que não permite cargas muito elevadas, limitou-se os ensaios apenas com PMMA nos ensaios posteriores.

No 6º e no 7º ensaio e ao aprender com os problemas anteriores, carregou-se o material até ao seu limite de rotura. No 6º ensaio, procurou-se observar as isoclínicas e isocromáticas, em polariscópio plano. Este objetivo foi atingido com sucesso, já que as cores eram bem visíveis para identificar os dois tipos de franja. No entanto, não se verificou a rotação das isoclínicas devido à rotação escolhida do polarizador e analisador.

Outro problema, e este é o mais acentuado, foi a qualidade da câmara disponível. Esta foi alterada nos últimos dois ensaios, passando de uma camara integrada num telemóvel para uma câmara da NIXON. Apesar da alteração, não foi suficiente para, ao fazer zoom, se conseguir distinguir bem as cores e transição de cores. Esta observação é a base do cálculo da diferença de tensões principais. Contudo, tentou-se fazer uma observação qualitativa, apesar de subjetiva, das cores e efetuar alguns cálculos para comparar com o método numérico. No 7º ensaio, testou-se o caso de uma placa de PMMA com dois furos centrais para verificar-se o efeito de Saint Venant. Este verifica-se e conclui-se que os furos têm uma distância de segurança entre um e outro de modo a que o estado de tensão de um furo não afete o outro. O estado de tensão de cada furo é, assim, igual ao caso de uma placa com apenas um furo, neste ensaio.

Relativamente à simulação numérica, utilizou-se o software ANSYS. A comparação entre os resultados dos ensaios e o modelo em ANSYS permitiram concluir que existe uma diferença significativa nos dois tipos de provete. A razão mais direta a apontar será a impossibilidade de efetuar uma análise com qualidade do estado fotoelástico à volta do furo. Outro motivo será a simulação numérica que não deverá corresponder à realidade do ensaio, nomeadamente a nível de carregamento e propriedades do material que foram colocadas em ANSYS.

É possível concluir, de forma geral, que a fotoelasticidade é um método bastante acessível para estudar geometrias complexas. É necessário apenas um polariscópio, um material fotoelástico e uma máquina uniaxial de ensaio de tração. É, no entanto, necessária alguma experiência por parte do utilizador em identificar as várias franjas.

10.1. Desenvolvimento futuro

Os estudos que poderão ser desenvolvidos posteriormente, poderão ser um estudo mais computacional, nomeadamente utilizando a fotoelasticidade digital. Devido a limitações de material disponível, não foi possível aplicar métodos mais sofisticados que existem atualmente, para efetuar uma deteção de franjas fotoelásticas a olho nu com uma câmara convencional.

Um outro tópico que poderá ser abordado é a separação das tensões principais, obtendo o valor individual para cada um deles. A fotoelasticidade por si só é limitada no estudo das tensões principais.

Uma outra abordagem que poderá ser aplicada, é o caso do estudo da fotoelasticidade tridimensional, através do método mais conhecido como “*stress freezing*”.

Finalizando, uma temática que poderá ainda ser explorada é o conjunto de fotogramas com tempo, de um determinado ensaio com provete fotoelástico, e comparar os resultados com um modelo numérico não linear elástico e viscoelástico.

11. Bibliografia

- [1] Smith, W. (1998). *Princípios de ciência e engenharia de materiais*. 3ª Edição, McGraw-Hill.
- [2] Anderson, T. (1994). *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*. 2ª Edição, CRC Press.
- [3] Callister, W. Rethwisch, D. (2013). *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 9ª Edição, John Wiley and Sons, Incorporated.
- [4] ASHBY, M. (2016). *Materials Selection in Mechanical Design*. 5ª Edição, Butterworth-Heinemann.
- [5] Blake, A. (1985). *Handbook of Mechanics, Materials, and Structures*. John Wiley & Sons.
- [6] Freddi, A. Olmi, G. Cristofolini, L. (2015). *Experimental Stress Analysis for Materials and Structures: Stress Analysis Models for Developing Design Methodologies*. Springer.
- [7] Janssen, M, et al. (2002). *Fracture Mechanics*. 2ª Edição.
- [8] Brinson, H. Brinson, L. (2015). *Polymer Engineering Science and Viscoelasticity: An Introduction*. 2ª Edição, Springer.
- [9] Jansen, J. (2015). “Understanding Creep Failure of Plastics: Continuous stress over long periods leads to creep rupture”. Em: *Plastics Engineering*. 32-36.
- [10] Jansen, J. Nemec, J. “Creep rupture failure under conditions of static strain”. 1-7.
- [11] Shaw, M. MacKnight, W. (2005). *Introduction to Polymer Viscoelasticity*. 3ª Edição, John Wiley & Sons.
- [12] Kinloch, A. R. Young. (1995). *Fracture Behaviour of Polymers*. 1ª Edição, Springer.
- [13] Lemini, D. (2002). “The initiation J -integral for linear viscoelastic solids with constant Poisson's ratio.”. Em: International Journal of Fracture. 27-37.
- [14] Bradley, W. Cayard, M. “The effect of various precracking techniques on the fracture toughness of plastics”. 2713-2723
- [15] Williams, J. (2001). *Fracture Mechanics Testing Methods for Polymers, Adhesives and Composites*. Volume 28. 3-375. Elsevier.
- [16] Lemini, D. (2013). *Engineering Viscoelasticity*. Springer Science & Business Media.
- [17] Sheldon Imaoka, “Analysing Viscoelastic Materials”, ANSYS Advantage, **II**, Issue 4 2008, Inc.
- [18] Doyle, J. Phillips, J. (1989). *Experimental stress analysis*. 5ª Edição, Society for Experimental Mechanics.
- [19] Freire, J. “Photoelasticity”
- [20] Redner, A, Hoffman, B. (1999). “Residual stress testing for transparent polymers”.

- [21] Ramesh, K. (2000). *Digital Photoelasticity: Advanced Techniques and Applications*. Volume 1. Springer.
- [22] Heywood, R. Silverleaf. D. Blackburn, G. (1969) *Photoelasticity for Designers*. 1ªEdição, Pergamon Press.
- [23] Paris, F. (1998). *Teoría de la elasticidad*. 2ªEdição, Universidad de Sevilla, Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales.
- [24] Doyle, J. (2004). *Modern Experimental Stress Analysis: Completing the Solution of Partially Specified Problems*. John Wiley & Sons.
- [25] Amorós, J. Cantavella. V. Feliu. J. (2007). “Green strength testing of pressed compacts: An analysis of the different methods”. Em: *Journal of the European Ceramic Society*. Elsevier. 701-710.
- [26] Budynas, R. G., Nisbett, J. K. (2003). *Shigley's Mechanical Engineering Design*. 1ªEdição. McGraw-Hill.
- [27] A. Donald, et al. (2011). *The science and Engineering of Materials*. 5ª Edição

