

Diego Darci Langaro

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM RETARDADOR DE  
CRISTAL LÍQUIDO PARA APLICAÇÃO EM SHEAROGRAFIA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica na Área de Concentração em Metrologia e Instrumentação da UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA para a obtenção do Grau de MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA.

Orientador: Prof. Dr. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior.

Coorientadora: Dra. Analucia Vieira Fantin.

Florianópolis  
2013

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Langaro, Diego Darci

Avaliação do desempenho de um retardador de cristal líquido para aplicação em shearografia / Diego Darci Langaro ; orientador, Armando Albertazzi Gonçalves Jr. ; co-orientadora, Analucia Vieira Fantin. - Florianópolis, SC, 2013.

122 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Shearografia. 3. Retardador Variável de Cristal Líquido. 4. Atuador Piezelétrico. 5. Deslocamento de Fase. I. Gonçalves Jr., Armando Albertazzi. II. Fantin, Analucia Vieira. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

Diego Darci Langaro

## **AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM RETARDADOR DE CRISTAL LÍQUIDO PARA APLICAÇÃO EM SHEAROGRAFIA**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Mecânica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, dezembro de 2013.

---

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr. Eng.  
Coordenador do Curso

### **Banca Examinadora:**

---

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr. Eng.  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Analúcia Vieira Fantin, Dr.<sup>a</sup> Eng.  
Coorientadora  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Daniel Pedro Willemann, Dott. Ing.  
Universidade do Estado de Santa Catarina

---

Prof. Tiago Loureiro Figaro da Costa Pinto, Dr. Eng.  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Valdir Noll, Dr. Eng.  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina



Dedico este trabalho aos meus pais  
Raimundo Domingos e Ines.  
Ao meu padrinho Josué Mascarello (*in  
memorian*).  
Ao meu avô Vitório Marcon (*in  
memorian*).  
Ao amigo Itamar Artuzo (*in  
memorian*).



## AGRADECIMENTOS

À Deus, que nunca nos abandona e fortalece sempre quem nele crê.

À UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina por me proporcionar a oportunidade de realização deste trabalho.

À coordenação do programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina por todo suporte e estrutura.

Aos meus pais, Ines e Raimundo Domingos, pela vida, e acima de tudo pelo apoio, carinho e renúncias em prol de meus ideais, feitas ao longo de toda minha vida.

À Ana Caroline, minha namorada, pelo carinho, amizade e o apoio, constantes em todo o período deste mestrado.

À Neusa, Marcelo, Marcelo Júnior e Helen por toda ajuda oferecida, desde a minha chegada à Florianópolis, e sem a qual não teria conseguido concluir este desafio.

Ao meu orientador Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior pela orientação, apoio, disponibilidade, compreensão e amizade ao longo destes anos.

À minha coorientadora Dr.<sup>a</sup> Analúcia Vieira Fantin pelo apoio e suporte prestados em todas as etapas deste trabalho.

Aos meus tios, Francisco e Silvane, além de minhas primas Camila e Isadora, por estarem sempre presentes em minha vida e torcerem por mim.

À tia Olga, e minhas primas Ivanis e Marilei, por sempre se preocuparem comigo, torcendo por minhas realizações.

Ao amigo Daniel Poletti, pela convivência e amizade, demonstradas ao longo de dois anos.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Carlos Alberto Flesch, Marco Antônio Martins Cavaco, Gustavo Daniel Donatelli e Rodolfo César Costa Flesch – pela dedicação e qualidade no ensino das disciplinas do programa.

À toda equipe de colaboradores do LABMETRO, Fabricio Luís Broering, Matias Roberto Viotti, Rosana Vieira, Daniel Pedro Willemann, Mauro Benedet, Fábio Silva e toda equipe de colaboradores da Fundação CERTI.

Ao estagiário, Rafael Scarduelli, pela ajuda com os softwares.

À todos os amigos que conquistei neste período, principalmente aos da turma de 2011, que dividiram os momentos de aprendizado. Obrigado a todos.

Enfim, gostaria de expressar os mais sinceros agradecimentos a todos os que contribuíram para que a concretização deste trabalho fosse uma realidade.

“Se eu vi mais longe, foi por estar de pé sobre os ombros de gigantes”. (Isaac Newton).



## RESUMO

A técnica de shearografia é um método de ensaio interferométrico capaz de identificar falhas ou defeitos em materiais compósitos. A presença de defeitos é revelada pela resposta da superfície do material a um carregamento externo, normalmente térmico ou por variação de pressão. Regiões com defeitos apresentam anomalias nos campos de deformações que são detectadas em imagens com franjas de interferência. O sucesso da aplicação da inspeção com shearografia em campo decorre da sua elevada sensibilidade para medir campos de pequenas deformações e sua relativa imunidade a perturbações, principalmente, por tolerar níveis moderados de vibrações. Como na maioria das técnicas interferométricas, a shearografia necessita de métodos de medição de fase para extrair resultados, assim torna-se necessária a utilização de um deslocamento de fase previamente controlado. Visando o constante aprimoramento da técnica de shearografia, buscou-se com este trabalho avaliar a substituição de um atuador piezelétrico (PZT), utilizado como deslocador de fase no arranjo óptico da técnica de shearografia desenvolvido no LABMETRO, por um retardador variável de cristal líquido (LCVR). Pretende-se com esse estudo encontrar uma nova opção de dispositivo capaz de eliminar os efeitos indesejáveis causados pelo PZT, como instabilidades provocadas por vibrações mecânicas, e aumentar a velocidade de resposta do deslocador de fase. Uma bancada de testes foi desenvolvida com o propósito de avaliar as principais características dos dois deslocadores de fase e assim compará-los. Além dos testes quantitativos para comparação dos dois deslocadores de fase, foi realizado um estudo de caso utilizando a técnica de shearografia. O estudo de caso, realizado com corpos de prova contendo defeitos previamente conhecidos, compara qualitativamente os resultados obtidos. Por último, uma proposta de configuração mais simples e compacta de um interferômetro que utiliza um dispositivo de cristal líquido para deslocar a fase é apresentada.

**Palavras-chave:** Interferometria Óptica. Interferômetro. Shearografia. Deslocamento de Fase. Retardador Variável de Cristal Líquido. Atuador Piezelétrico.



## ABSTRACT

The shearography technique is an interferometric method which is able to identify faults and defects in composite materials. The defects can be identified by material surface response to an external load commonly, thermal loads or pressure changes. Regions on material surface with defects present anomalies in the deformation field which are detected by fringe pattern images. The success of the application of shearography technique inspection in real conditions lies on its high sensibility to measure fields of small deformations and its relative perturbations immunity, especially for tolerating moderate levels of vibrations. As well as most interferometric techniques to obtain results shearography needs methods for phase measurements, thereby it is necessary to use a controlled phase shifter. In order to improve shearography technique this work intended to evaluate the substitution of a piezoelectric actuator (PZT), using as a phase shifter in the optical scheme of the shearography technique developed in LABMETRO/UFSC, by a Liquid Crystal Variable Retarder (LCVR). The goal of this research is to find a new device setup able to eliminate the undesirable effects caused by PZT like instability caused by mechanical vibrations, moreover increase the response velocity of the phase shifter. An experimental study was performed aiming to evaluate the main characteristics of both phase shifters and thus comparing one to each other. Furthermore, an experimental study using the shearography technique was performed, the experimental study was based on samples having well-defined defects. Finally, a proposal of a simpler and compact interferometric configuration, which uses a liquid crystal device to shift phase, is presented.

**Keywords:** Optical Interferometry. Interferometer. Shearography. Phase Shift. Liquid Crystal Variable Retarder. Piezoelectric Actuator.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Aplicações da técnica de shearografia em aeronaves. ....	25
Figura 2 - Franjas de interferência. ....	28
Figura 3 - Medição por shearografia. ....	29
Figura 4 - Mapas de fase antes (a) e depois (b) da remoção do salto de fase. ....	29
Figura 5 - Equipamento Clássico. ....	30
Figura 6 - Interferômetro de <i>Michelson</i> . ....	31
Figura 7 - Configuração clássica inspirada no interferômetro de <i>Michelson</i> . ....	32
Figura 8 - Dispositivos de deslocamento lateral mais comuns. ....	33
Figura 9 - Dispositivo de deslocamento lateral. ....	34
Figura 10 - Geração do deslocamento de fase. ....	37
Figura 11 - Configuração para deslocamento de fase com PZT. ....	38
Figura 12 - Exemplo de um mapa de diferenças de fase gerado na shearografia. ....	41
Figura 13 - Processo de remoção do salto de fase e reconstrução da fase. ....	42
Figura 14 - Mapa de fase da mudança de fase relativa $\Delta\phi$ . ....	43
Figura 15 - Arranjo óptico alternativo. ....	44
Figura 16 - Prisma com janela de vidro para realizar o deslocamento lateral. ....	45
Figura 17 - Ordem molecular dos CLs. ....	47
Figura 18 - Fases dos cristais líquidos termotrópicos. ....	48
Figura 19 - Retardador Variável de Cristal Líquido. ....	49
Figura 20 - Esquema de acionamento de um LCVR. ....	51
Figura 21 - Mudança na retardância com o aumento do campo elétrico $E$ . ....	51
Figura 22 - Alinhamento das moléculas para $V=0$ e $V \gg 0$ . ....	53
Figura 23 - Representação do processo de <i>poling</i> . ....	54
Figura 24 - Princípio básico da piezeletricidade. ....	55
Figura 25 - Características típicas de um PZT. ....	56
Figura 26 - Curva de calibração de um retardador variável de cristal líquido. ....	57
Figura 27 - Curva de calibração de um PZT. ....	58
Figura 28 - Módulos do aparato experimental. ....	60
Figura 29 - Tela principal do programa feito em Visual C#. ....	61
Figura 30 - Bancada para avaliar o LCVR. ....	63
Figura 31 - Sinal aplicado ao LCVR. ....	64
Figura 32 - Peça com suporte, PZT e espelho. ....	65
Figura 33 - Montagem da bancada para o PZT. ....	66
Figura 34 - Módulos para realização dos Ensaios com shearografia. ....	67
Figura 35 - Interferômetro para ensaios com shearografia utilizando LCVR. ....	68
Figura 36 - Interferômetro para ensaios com shearografia utilizando PZT. ....	69
Figura 37 - Bancada para ensaios com shearografia utilizando PZT. ....	71
Figura 38 - Bancada para ensaios com shearografia utilizando LCVR. ....	71
Figura 39 - Corpo de prova utilizado no estudo de caso. ....	72
Figura 40 - Esquema do sinal quadrado enviado ao LCVR. ....	76
Figura 41 - Gráfico da variação da intensidade em função da tensão aplicada no LCVR. ....	78

Figura 42 - Curva Característica de Resposta do LCVR. ....	79
Figura 43 - Gráfico da variação da intensidade em função da tensão aplicada no PZT.....	80
Figura 44 - Curva Característica de Resposta do PZT.....	81
Figura 45 - Gráfico Avaliação da Linearidade do LCVR (2 à 2,82) V.....	84
Figura 46 - Gráfico Avaliação da Linearidade do LCVR (2,83 à 3,9) V.....	85
Figura 47 - Gráfico Avaliação da Linearidade do PZT (10 à 79,6) V.....	86
Figura 48 - Gráfico Avaliação da Frequência LCVR.....	88
Figura 49 - Gráfico Avaliação <i>Duty Cycle</i> LCVR.....	89
Figura 50 - Avaliação do Tempo de Resposta dos Deslocadores de Fase.....	92
Figura 51 - Histograma da diferença de fase entre dois mapas de fase obtidos com PZT e LCVR.....	95
Figura 52 - Gráfico Avaliação Histerese PZT (0 à 100) V.....	98
Figura 53 - Gráfico Avaliação Histerese LCVR (1 à 10) V.....	99
Figura 54 - Verificação do defeito D1 do corpo de prova utilizando o PZT....	100
Figura 55 - Verificação do defeito D1 do corpo de prova utilizando o LCVR. .....	101
Figura 56 - Chapa engastada para estudo de caso com shearografia.....	102
Figura 57 - Resultados da medição com shearografia utilizando PZT e divisor de feixe não polarizado.....	104
Figura 58 - Resultados da medição com shearografia utilizando PZT e divisor de feixe polarizado.....	105
Figura 59 - Resultados da medição com shearografia utilizando LCVR e divisor de feixe polarizado.....	106
Figura 60 - Proposta de configuração utilizando LCVR.....	107
Figura 61 - Instrumento Virtual desenvolvido para efetuar a comunicação entre gerador de funções e computador.....	122

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- SPSI** - (*Speckle Pattern Shearing Interferometry*) - Shearografia.
- LASER** - *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* - Amplificação da Luz por Emissão Estimulada de Radiação.
- ASNT** - *American Society for Nondestructive Testing* - Sociedade Americana de Ensaios Não-destrutivos.
- LCVR** - *Liquid Crystal Variable Retarder* - Retardador Variável de Cristal Líquido.
- PZT** - *Lead Zirconium Titanate* - Atuador Piezoelétrico.
- POSMEC** - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina.
- LABMETRO** - Laboratório de Metrologia e Automatização.
- NDT** - *Non Destructive Testing* - Ensaio Não-destrutivo.
- OPD** - *Optical Path Difference* - Diferença de Caminho Óptico.
- CPU** - *Central Processing Unit* - Unidade Central de Processamento.
- LCLV** - *Nematic liquid crystals valves* - Válvula de Cristal Líquido Nemático.
- SLM** - *Spatial Light Modulator* - Modulador Espacial de Luz.
- CCD** - *Charge Coupled Device* - Dispositivo de Carga Acoplada.
- $\delta x$**  - Deslocamento Lateral.
- CL** - Cristal Líquido.
- CP** - Corpo de Prova.



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>21</b>
1.1 MOTIVAÇÃO .....	21
1.2 OBJETIVO GERAL .....	22
<b>1.2.1 Objetivos Específicos .....</b>	<b>22</b>
1.3 MÉTODOS .....	22
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	23
<b>2 SHEAROGRAFIA .....</b>	<b>25</b>
2.1 INTERFEROMETRIA .....	26
2.2 PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS DA SHEAROGRAFIA .....	28
<b>2.2.1 Equipamento Clássico .....</b>	<b>29</b>
<b>2.2.2 Interferômetro de Deslocamento Lateral.....</b>	<b>30</b>
<b>2.2.3 Dispositivo de Deslocamento Lateral .....</b>	<b>32</b>
<b>2.2.4 Diferença de Fase.....</b>	<b>35</b>
<b>2.2.5 Deslocamento de Fase.....</b>	<b>36</b>
<b>2.2.6 Determinação do Valor da Fase.....</b>	<b>39</b>
2.3 INTERFERÔMETRO COM RETARDADOR VARIÁVEL DE CRISTAL LÍQUIDO .....	43
<b>3 PRINCÍPIOS E CARACTERÍSTICAS DOS DESLOCADORES DE FASE .....</b>	<b>47</b>
3.1 CRISTAIS LÍQUIDOS .....	47
<b>3.1.1 Retardadores Variáveis de Cristal Líquido .....</b>	<b>49</b>
3.2 FUNDAMENTOS DA PIEZOELETRICIDADE.....	53
<b>3.2.1 Atuadores Piezelétricos PZTs .....</b>	<b>55</b>
3.3 CALIBRAÇÃO DOS DESLOCADORES DE FASE .....	56
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>59</b>
4.1 DESENVOLVIMENTO DA BANCADA PARA AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO LCVR E PZT .....	59
4.2 INTERFERÔMETROS UTILIZADOS PARA O ESTUDO DE CASO UTILIZANDO SHEAROGRAFIA .....	67

<b>4.2.1 Montagem da Bancada para o Estudo de Caso.....</b>	<b>69</b>
4.3 PLANEJAMENTO DO ESTUDO DE CASO .....	72
<b>5 RESULTADOS .....</b>	<b>75</b>
5.1 AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DOS DESLOCADORES DE FASE .....	75
<b>5.1.1 Curva Característica de Resposta do PZT e do LCVR .....</b>	<b>76</b>
<b>5.1.2 Avaliação da Linearidade .....</b>	<b>82</b>
<b>5.1.3 Avaliação do <i>Duty Cycle</i> e Frequência do Sinal do LCVR .....</b>	<b>87</b>
<b>5.1.4 Tempo de Resposta .....</b>	<b>90</b>
<b>5.1.5 Avaliação da Incerteza na Medição da Diferença de Fase .....</b>	<b>93</b>
<b>5.1.6 Avaliação da Histerese .....</b>	<b>96</b>
5.2 RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO .....	100
5.3 PROPOSTA DE OTIMIZAÇÃO .....	106
<b>6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>109</b>
6.1 CONCLUSÕES .....	109
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	111
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>113</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentada a motivação do trabalho, seus objetivos e os métodos utilizados. É também descrita a estrutura da dissertação.

## 1.1 MOTIVAÇÃO

A shearografia é uma técnica interferométrica reconhecida pela Sociedade Americana de Ensaio Não-destrutivos ASNT (do inglês: *American Society for Nondestructive Testing*) que permite, através do uso de processamento de imagens, medições em tempo real de deformações ocorridas na superfície do objeto em estudo [1]. Combinando-a com técnicas de carregamento de estruturas é possível dispor de uma potente ferramenta para ensaios não-destrutivos [1].

A técnica foi inicialmente proposta como uma forma de determinar o campo de deformações de estruturas em solicitação estática sem necessidade de recorrer à derivação numérica do campo de deslocamentos [2]. A simplicidade da montagem óptica e o fato de se tratar de um interferômetro em que ambos os braços têm um percurso quase comum, permite obter montagens compactas com elevada estabilidade mecânica e considerável robustez às perturbações externas. Estes fatos, aliados à possibilidade de detectar facilmente gradientes de deslocamentos com uma baixa sensibilidade a movimentos de corpo rígido, fizeram com que essa técnica tivesse enorme aplicação em campo [3].

A maior parte das configurações dos sistemas de shearografia aplicam o deslocamento de fase através de elementos móveis, como espelhos deslocados por atuadores piezelétricos, que comprometem o tempo de resposta do sistema e sua robustez quanto a perturbações externas. A combinação destes fatores dificulta, ou mesmo inviabiliza, a aplicação da shearografia em ambientes muito instáveis.

Tendo em vista a constante busca pelo aprimoramento da robustez do equipamento de shearografia, no escopo deste trabalho pretende-se desenvolver e avaliar um sistema que utiliza uma forma alternativa para promover o deslocamento de fase com um dispositivo de cristal líquido. Por não envolver elementos móveis, espera-se obter alguns benefícios. Há particularidades neste dispositivo que dificultam sua aplicação.

O trabalho irá avaliar ambos: PZT e LCVR.

## 1.2 OBJETIVO GERAL

A fim de contribuir para tornar a medição com shearografia digital mais robusta em ambientes industriais, pretende-se desenvolver e avaliar um interferômetro apropriado para medições com shearografia digital que utilize um elemento de cristal líquido para realizar o deslocamento de fase. Sem partes móveis, espera-se que este interferômetro seja mais imune às instabilidades provocadas por vibrações mecânicas e rápido o suficiente para ser aplicado com estabilização ativa [4] [5].

### 1.2.1 Objetivos Específicos

Em termos específicos, os objetivos desta dissertação são:

1. Conhecer as potencialidades e limitações de retardadores de cristal líquido (LCVR) para aplicação de deslocamento de fase.
2. Avaliar experimentalmente as características de um LCVR (retardador de cristal líquido) disponível no LABMETRO.
3. Avaliar comparativamente o desempenho do LCVR disponível com o de espelhos móveis acionados por elementos PZT.
4. Apresentar uma proposta de configuração óptica, que utilize o LCVR como deslocador de fase.
5. Através de um estudo de caso, avaliar comparativamente o desempenho do interferômetro para shearografia, que utiliza PZT com o interferômetro desenvolvido com LCVR.

## 1.3 MÉTODOS

Para atingir os objetivos propostos nesta dissertação, os trabalhos foram divididos em quatro etapas:

1. Revisão da literatura, buscando através de uma análise teórica melhor compreender o princípio de funcionamento e particularidades de LCVRs (retardadores de cristal líquido) sempre com foco na aplicação em shearografia;
2. Desenvolver bancada para caracterizar experimentalmente o desempenho do LCVR disponível;
3. Desenvolver e avaliar o desempenho de um interferômetro para shearografia que utiliza o LCVR disponível;
4. Avaliar comparativamente, através de um estudo de caso, o desempenho do interferômetro desenvolvido que usa LCVR com o interferômetro existente que utiliza PZT.

## 1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está dividida em 6 capítulos:

No Capítulo 2, SHEAROGRAFIA, é abordada a técnica de inspeção óptica shearografia, seus fundamentos, equipamentos clássicos, interferômetro de deslocamento lateral, diferença de fase, deslocamento de fase, a determinação do valor de fase e os dispositivos de deslocamento lateral.

No Capítulo 3, PRINCÍPIOS E CARACTERÍSTICAS DOS DESLOCADORES DE FASE, descreve-se os principais fundamentos e características dos cristais líquidos e da piezeletricidade. Apresenta-se ainda as principais formas de calibração dos dois deslocadores de fase, encontradas na literatura.

No Capítulo 4, MATERIAIS E MÉTODOS, inicialmente apresenta-se o desenvolvimento da bancada para avaliação das principais características dos deslocadores de fase. Em seguida, são descritos os interferômetros utilizados para o estudo de caso, além de especificar o planejamento utilizado para os ensaios referentes à técnica de shearografia.

No Capítulo 5, RESULTADOS, descreve-se os resultados a cerca das principais características dos interferômetros que usam retardador variável de cristal líquido (LCVR) e do PZT, além de apresentar os resultados obtidos nos ensaios utilizando a técnica de shearografia. Também é apresentada uma proposta de configuração óptica que utiliza o LCVR para realizar o deslocamento de fase.

No Capítulo 6, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES, são apresentadas as conclusões obtidas com o desenvolvimento desta dissertação e recomendações para os próximos trabalhos.



## 2 SHEAROGRAFIA

Atualmente há ampla utilização da técnica de shearografia em indústrias de borracha para avaliar pneus recauchutados e em indústrias aeroespaciais para ensaios não destrutivos de estruturas de materiais compósitos [6]. A Figura 1 ilustra os caças F 16 e F 22, além da aeronave de bombardeio B2 Bomber, nos quais a técnica de shearografia é utilizada para avaliar as estruturas compostas presentes. Outras aplicações da técnica incluem: medição de tensões superficiais, avaliação das propriedades de materiais, tensões residuais, vibrações e detecção de vazamentos de gases através da descoberta de alterações no índice refrativo do ar ambiente em torno do vazamento [7].

Figura 1 - Aplicações da técnica de shearografia em aeronaves.



Fonte: Adaptado de Laser Technology Inc [8].

Quanto ao meio físico utilizado para registro das imagens, três versões de sistemas de shearografia podem ser encontradas na literatura:

- Registro fotográfico [9];
- Registro termoplástico [10];
- Registro digital [11].

As versões de registro fotográfico e termoplástico não serão discutidas neste trabalho devido à sua obsolescência, pois não são mais usadas na indústria e nem na pesquisa. Isso ocorre devido principalmente ao alto custo envolvido na utilização das técnicas e a demora na obtenção de resultados, já que não permitem aplicações em tempo real [7].

Já a versão designada como registro digital [7], mais conhecida como shearografia digital ou SPSI (do inglês: *Speckle pattern Shearing Interferometry*), realiza medições automáticas e diretas de mudanças de fase, utilizando para isso sensores de vídeo (e.g., CCD<sup>1</sup> e CMOS<sup>2</sup>) como mídia de gravação e tecnologia de processamento digital para análise e aquisição de dados, permitindo inspeções em tempo real.

## 2.1 INTERFEROMETRIA

A interferência óptica consiste na interação entre duas ou mais ondas luminosas, com geração de um padrão em que a irradiância total difere da soma das irradiâncias individuais [12]. A interferência entre duas ou mais ondas de luz pode ser utilizada como base para a realização de medições de diversas grandezas, dando origem ao conceito de interferometria [13].

Assumindo que duas ondas estão propagando-se na mesma direção e são polarizadas com seus vetores de campo no mesmo plano, apresentando a mesma frequência, a amplitude complexa  $A$  em qualquer ponto no padrão de interferência é o resultado da soma das amplitudes complexas das duas ondas [14] [15] [16], como mostra a Equação 1:

$$A = A_1 + A_2 \quad \text{Equação 1}$$

Na Equação 1,  $A_1$  e  $A_2$  são as amplitudes complexas das duas ondas que interferem mutuamente, podendo ser apresentadas como descrito nas Equações 2 e 3:

$$A_1 = a_1 \exp(-i\phi_1) \quad \text{Equação 2}$$

---

<sup>1</sup> CCD: Dispositivo de carga acoplada ou “*Charge-Coupled Device*” é um sensor para captação de imagens, formado por um circuito integrado que contém uma matriz de capacitores acoplados.

<sup>2</sup> CMOS: Semicondutor metal-óxido complementar ou “*Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*” é um componente eletrônico em estado sólido que converte luz em um padrão de cargas elétricas que se traduz em dados digitais.

$$A_2 = a_2 \exp(-i\phi_2) \quad \text{Equação 3}$$

Nas Equações 2 e 3,  $\phi_1$  e  $\phi_2$  representam as fases das ondas que são função do tempo e do espaço,  $a_1$  e  $a_2$  são as amplitudes das respectivas ondas [13] [16]. A intensidade resultante da interferência entre as duas ondas pode ser encontrada de acordo com as Equações 4, 5, 6 e 7:

$$I = |A|^2 \quad \text{Equação 4}$$

$$I = (A_1 + A_2)(A_1^* + A_2^*) \quad \text{Equação 5}$$

$$I = |A_1|^2 + |A_2|^2 + A_1 A_2^* + A_1^* A_2 \quad \text{Equação 6}$$

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 + I_2} \cos(\Delta\phi) \quad \text{Equação 7}$$

Na Equação 7  $I_1 = a_1^2/2$  e  $I_2 = a_2^2/2$  são as intensidades de cada onda individualmente, sendo  $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$  a diferença de fase entre elas. Se as duas ondas forem provenientes da mesma fonte, de tal modo que apresentem a mesma fase na origem, a diferença de fase  $\Delta\phi$  corresponde a uma diferença de caminho óptico OPD (do inglês: *Optical Path Difference*), que pode ser calculada através da Equação 8 [16].

$$OPD = \left(\frac{\lambda}{2\pi}\right) \Delta\phi \quad \text{Equação 8}$$

Um resultado típico da interferência entre duas ondas é ilustrado na Figura 2. Regiões claras e escuras podem ser notadas representando, respectivamente, as intensidades máximas e mínimas descritas pela Equação 7. Estas regiões formam o padrão de interferência denominado por franjas de interferência. Franjas claras correspondem a lugares geométricos onde  $\cos(\Delta\phi) = 1$ . Franjas escuras, a -1.

Figura 2 - Franjas de interferência.



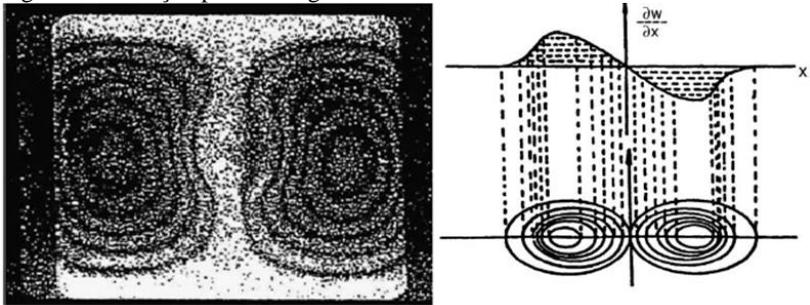
Fonte: Elaborado pelo Autor.

## 2.2 PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS DA SHEAROGRAFIA

A palavra shearografia é uma tradução adotada para o português para a técnica de medição conhecida em inglês como *shearography*. É originária da junção das palavras *shear*, que significa cisalhamento ou deslocamento lateral e *graphy* que significa registro. A shearografia digital também é conhecida como SPSI [17] [18] [19] [20]. Envolve um arranjo óptico em que forma-se uma imagem dupla da superfície analisada, estando uma lateralmente deslocada da outra. A interferência se dá entre as duas imagens lateralmente deslocadas.

A shearografia mede aproximadamente a primeira derivada do deslocamento na direção correspondente do deslocamento lateral ao qual a imagem é submetida (horizontal, vertical, diagonal ou radial) [6]. Na Figura 3 ilustra-se um padrão de franjas típico e o gráfico da amplitude que representa a primeira derivada de  $w$  (componente do deslocamento fora do plano) em relação ao eixo  $x$  (horizontal) do campo de amplitudes de uma placa retangular [7]. Se o campo de deslocamentos for constante em cada ponto do objeto a primeira derivada do deslocamento é igual a zero, e não produzirá franjas na medição, tornando essa técnica praticamente insensível a movimentos de corpo rígido, o que facilita sua aplicação fora do ambiente de laboratório [19] [21].

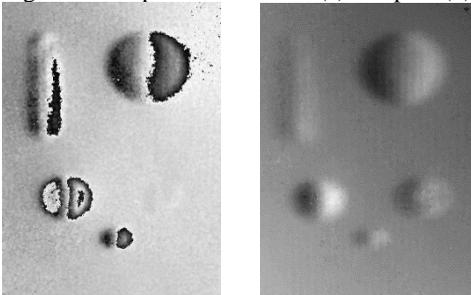
Figura 3 - Medição por shearografia.



Fonte: Referência [7].

Porém, para extrair valores quantitativos com shearografia é necessário o uso de técnicas de medição e processamento de [23] [6]. A Figura 4 ilustra o mapa de fase da medição com shearografia após serem aplicadas as técnicas de deslocamento de fase e remoção do salto de fase (do inglês: *Phase-unwrapping*).

Figura 4 - Mapas de fase antes (a) e depois (b) da remoção do salto de fase.

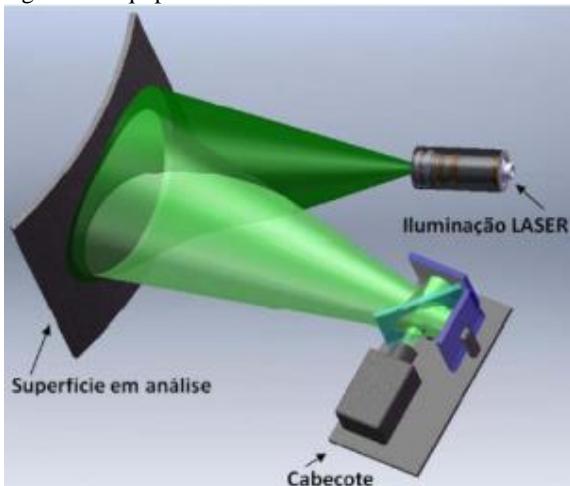


Fonte: Elaborado pelo Autor.

### 2.2.1 Equipamento Clássico

A configuração básica de um sistema de shearografia possui um módulo de iluminação e outro para formação da imagem dupla (cabecote), como mostra a Figura 5. Também é necessário um sistema de suporte e fixação de todos esses módulos e um módulo de comando, processamento e armazenamento de dados, normalmente composto de um computador com um programa de aquisição e processamento de imagens [17] [24].

Figura 5 - Equipamento Clássico.



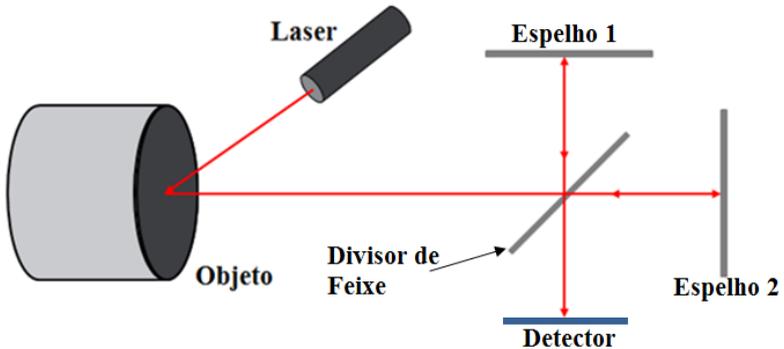
Fonte: Referência [17].

## 2.2.2 Interferômetro de Deslocamento Lateral

No interferômetro de *Michelson* ilustrado na Figura 6, um objeto iluminado por uma fonte *laser*<sup>3</sup> reflete uma onda que se propaga da esquerda para direita. O divisor de feixe divide esta onda em duas ondas com metade da amplitude da onda original, e elas se propagam seguindo direções perpendiculares. As duas ondas são refletidas pelos espelhos 1 e 2 respectivamente e regressam novamente ao divisor de feixe. Parte da onda refletida pelo espelho 2 é refletida pelo divisor de feixe em direção ao detector e parte da onda refletida do espelho 1 atravessa o divisor de feixe sobrepondo-se à anterior. Havendo sobreposição de duas ondas são criadas as condições para haver interferência. É necessário quando não se trabalha com luz monocromática a utilização de um compensador, em um dos braços do interferômetro, sua inclusão compensa efeitos de dispersão e permite a utilização de fontes de banda larga, mas produzindo ainda padrões de franjas discerníveis. Na shearografia não é necessária a utilização do compensador, já que se usa luz oriunda de um *laser*, a qual é monocromática, coerente e colimada [12] [22].

<sup>3</sup> *LASER*: do inglês, *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, ou Amplificação da Luz por Emissão Estimulada de Radiação, é uma fonte de luz que emite radiação eletromagnética com características especiais: monocromática, coerente e expandida.

Figura 6 - Interferômetro de *Michelson*.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

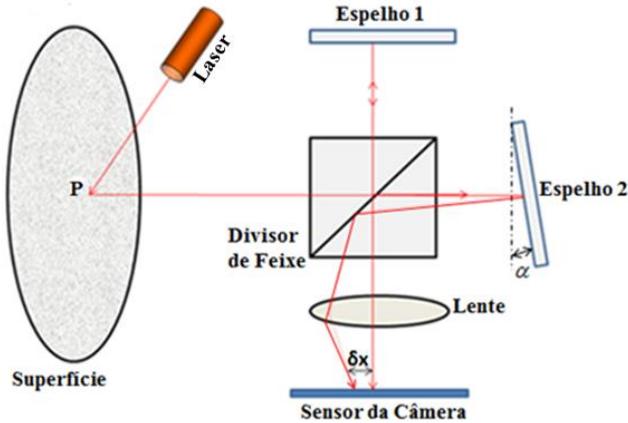
Na shearografia o tipo de configuração óptica mais utilizada é similar ao interferômetro de *Michelson*, e produz no sensor de uma câmera de vídeo uma imagem dupla do padrão de *speckles*<sup>4</sup> da superfície da peça a medir. A interferência é obtida entre a imagem original da superfície medida com uma segunda imagem da mesma superfície, porém, lateralmente deslocada. Na Figura 7 é possível visualizar um exemplo de configuração dos componentes ópticos seguindo o modelo de *Michelson* [17] [19] [25].

A frente de onda refletida pela superfície difusa da peça a medir passa pelo interferômetro, é separada em duas, sendo uma delas deslocada lateralmente pelo desalinhamento do espelho 2, alterando para isso o ângulo de inclinação  $\alpha$  e gerando uma diferença de  $\delta x$ . Com isso, duas imagens lateralmente deslocadas são captadas pelo sensor da câmera [17] [12]. Este deslocamento lateral é conhecido na literatura como *shearing* [19].

---

<sup>4</sup>*Speckle*: É um fenômeno óptico causado pela interferência das inúmeras componentes da luz de um laser refletidas por uma superfície rugosa. A figura de interferência formada é similar a um conjunto de grãos claros e escuros criando um efeito granulado que na língua inglesa é conhecido como *speckle*.

Figura 7 - Configuração clássica inspirada no interferômetro de *Michelson*.



Fonte: Adaptado das Referências [17] e [19].

### 2.2.3 Dispositivo de Deslocamento Lateral

O dispositivo de deslocamento lateral da imagem é considerado o componente chave da shearografia. Fundamentalmente, qualquer dispositivo capaz de levar a luz dispersa a partir de dois pontos da superfície do objeto até a lente da câmera digital, formando assim um único ponto no plano da imagem, pode ser utilizado como dispositivo de deslocamento lateral [26].

Diversos dispositivos para deslocamento lateral fixo são encontrados na literatura. Em [6] são citados alguns:

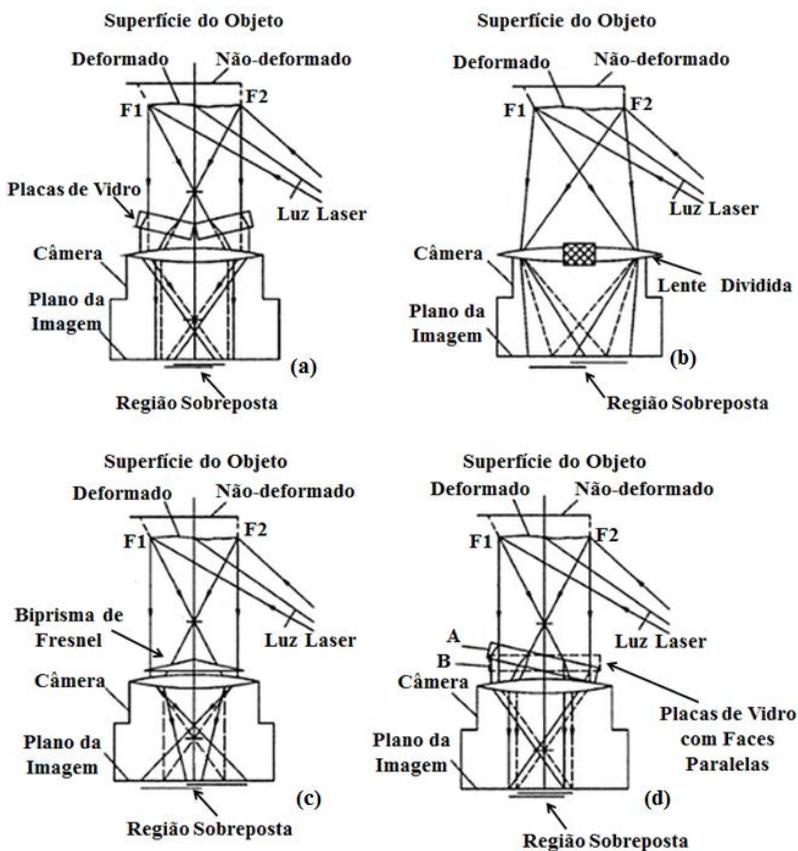
1. Biprisma de Fresnel;
2. Placa de vidro com faces paralelas;
3. Placa de vidro com ajuste angular;
4. Lente dividida;
5. Pequeno prisma em forma de cunha com pequeno ângulo (por exemplo  $0,75^\circ$ ), que cobre metade da abertura de uma lente e determina a magnitude do deslocamento lateral [27].

Outros elementos capazes de efetuar o deslocamento lateral, porém, em diferentes direções também são citados [6]:

1. Prisma pirâmide de três ou mais lados;
2. Duas cunhas de vidro com prismas de ângulo pequeno colocado em um arranjo ortogonal;
3. Cone;
4. Grade de Difração.

A Figura 8 ilustra os principais dispositivos para realizar o deslocamento lateral de forma fixa. Em (a) é ilustrada uma placa de vidro com ajuste angular, que leva a luz dispersa dos pontos F1 e F2 até o plano da imagem da câmera, sobrepondo-os, e gerando um deslocamento lateral fixo entre eles. Em (b), (c) e (d) são mostrados respectivamente, uma lente dividida, um biprisma de Fresnel e duas placas de vidro com faces paralelas 'A' e 'B', que da mesma forma descrita em (a), sobrepõe dois pontos da imagem, deslocamento lateralmente um ponto em relação ao outro.

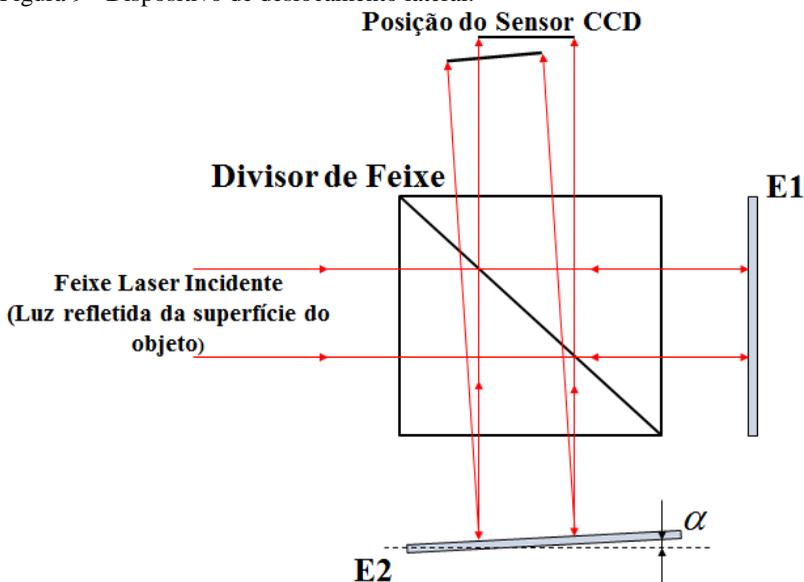
Figura 8 - Dispositivos de deslocamento lateral mais comuns.



Fonte: Adaptado da referência [6].

Em [26] o interferômetro de *Michelson* modificado é apresentado como o melhor método para efetuar o deslocamento lateral, pois, é possível com ele controlar facilmente a direção e a quantidade do deslocamento lateral. Para isso, é modificado o ângulo de inclinação  $\alpha$  e a direção de um dos dois espelhos. A mudança do ângulo de inclinação é claramente observada na Figura 9, a luz oriunda de um *laser* é dividida em dois feixes por um divisor de feixe, um dos feixes vai direto ao espelho  $E_1$  e o outro é refletido ao espelho  $E_2$ . Os feixes de luz refletidos dos espelhos  $E_1$  e  $E_2$  recombina-se e após ressurgem do divisor de feixe. Ao inclinar o espelho  $E_2$ , duas frentes de onda lateralmente deslocadas são produzidas e a interferência é então obtida [6].

Figura 9 - Dispositivo de deslocamento lateral.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Nesta dissertação optou-se pelo uso do interferômetro de *Michelson* modificado para deslocar a imagem lateralmente, devido às vantagens de controlar e modificar a quantidade de deslocamento lateral.

### 2.2.4 Diferença de Fase

Considere o interferômetro da Figura 7. A intensidade sobre o sensor, de um ponto da imagem dupla de um objeto em uma condição inicial sem carregamento é dada pela Equação 7 [6].

Quando o objeto é deformado (estática ou dinamicamente), pode ocorrer alteração no caminho óptico, isto porque deslocamentos diferentes podem ocorrer nos diferentes pontos que interferem em resposta a um carregamento imposto à superfície do objeto. A mudança de caminho óptico induz uma mudança de fase relativa entre os dois pontos que interferem. Assim, a distribuição de intensidade é ligeiramente alterada, sendo representada matematicamente pela Equação 9:

$$I' = I_1 + I_2 + 2\sqrt{(I_1 + I_2)} \cos(\Delta\phi + \phi) \quad \text{Equação 9}$$

onde  $\Delta\phi$  representa a variação de fase entre os pontos vizinhos decorrente da deformação da superfície do objeto e  $\phi$  é o ângulo de fase relativo, antes da deformação [6].

A variação de fase  $\Delta\phi$  pode ser expressa como [6]:

$$\Delta\phi = \phi' - \phi \quad \text{Equação 10}$$

A shearografia digital utiliza uma câmera para registrar digitalmente as intensidades dos dois interferogramas *speckle*, antes e depois do carregamento. As intensidades da posição inicial e do estado deformado podem ser subtraídas digitalmente por um computador. Como a intensidade de uma imagem não pode ser negativa, o quadrado do valor da subtração digital é apresentado como mostrado na Equação 11 [19] [7] [6]:

$$I_s^2 = (I - I')^2 = (4I_0[\sin(\phi + \frac{\Delta\phi}{2}) \sin \frac{\Delta\phi}{2}])^2 \quad \text{Equação 11}$$

onde  $I_0$  é a intensidade média ou de fundo. Quando se trata de processamento de imagens, essa diferença é elevada ao quadrado [17] [19]. Assim, franjas de interferência escuras representam as posições onde a mudança de fase relativa corresponde a um múltiplo inteiro de  $2\pi$ , ou onde não há diferenças de fase entre os dois pontos [6], e nos demais locais franjas claras são observadas.

A mudança de fase relativa  $\Delta\phi$  é a diferença entre os ângulos de fase relativos  $\phi$  e  $\phi'$ , antes e depois de deformação. A determinação quantitativa e automática da mudança de fase relativa  $\Delta\phi$  em um mapa de fase requer primeiramente a determinação dos ângulos de fase relativos, para isso é utilizada a técnica do deslocamento de fase [28] [29] [30].

### 2.2.5 Deslocamento de Fase

Análises quantitativas de um shearograma podem ser realizadas desde que sejam obtidos valores de fase. Para isto, é comum empregar a técnica de deslocamento de fase (do inglês: phase shifting) [31] [6].

Como o valor de intensidade depende da intensidade média, do termo de interferência e da diferença de fase natural entre os correspondentes *speckles*, há necessidade de equações adicionais para obter somente valores relativos à variação de fase  $\Delta\phi$ , representando assim a base da técnica de deslocamento de fase automatizada que também se aplica na shearografia digital [7]. As equações adicionais são obtidas aplicando incrementos de fase conhecidos entre as imagens que interferem.

Para calcular a diferença de fase entre dois estados da superfície, é necessário adquirir e combinar várias imagens com incrementos ou passos de fase bem definidos. Na configuração de *Michelson*, para aplicar incrementos de fase conhecidos é utilizado o espelho 1 do interferômetro, localizado na parte superior da Figura 7. Por meio de um atuador piezelétrico, também chamado de PZT, por exemplo, introduz-se de maneira controlada um pequeno deslocamento paralelo na direção do vetor normal à superfície do espelho, produzindo variação uniforme do caminho óptico e a correspondente variação de fase uniforme em toda a imagem [17].

Quando o espelho é deslocado de uma quantidade  $\delta L$ , o comprimento do caminho óptico é alterado para  $2\delta L$ , sendo esta a diferença de caminho óptico OPD para a técnica SPSI. A alteração de fase é calculada pela Equação 12 [17]:

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} 2\delta L \quad \text{Equação 12}$$

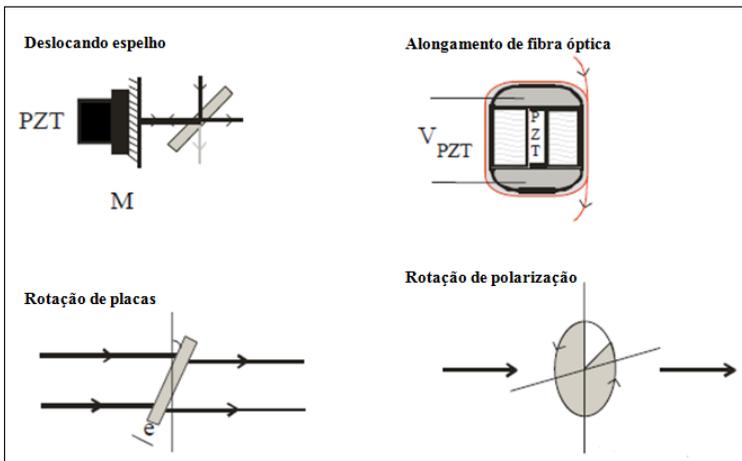
Na shearografia, assim como em outras técnicas interferométricas, o mapa de diferenças de fase  $\Delta\phi$  pode ser obtido com

auxílio do deslocamento de fase temporal. Existem algumas alternativas para aplicar os deslocamentos de fase:

1. Inclinação do objeto [32];
2. Inclinação do feixe do objeto [33];
3. Translação do espelho de deslocamento da imagem [34];
4. Manipulação de frentes de onda por polarização [7];
5. Utilizando um retardador de onda variável [35];
6. Deslocamento de espelho [33];
7. Alongamento de fibra óptica [32];
8. Rotação de placas [33].

A Figura 10 ilustra alguns dos métodos citados acima. Há muitos outros, podendo ressaltar a deriva natural do interferômetro, gerada por variações de temperatura, alterações no índice de refração do ar e vibrações mecânicas [33], sendo que a deriva natural deve ser evitada, a fim de não obter resultados mascarados ao final do processo.

Figura 10 - Geração do deslocamento de fase.



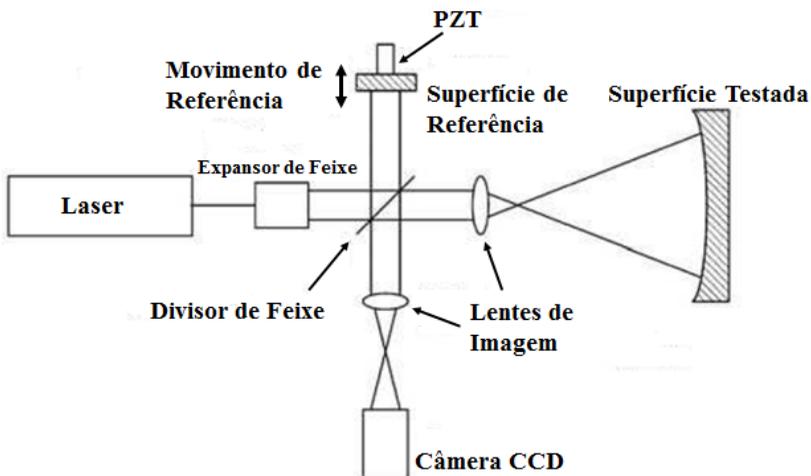
Fonte: Adaptado da referência [33].

O método mais comum de introduzir deslocamentos de fase é acoplar a um dos espelhos do interferômetro um PZT (do inglês: *Lead, zirconium, titanate*), no qual são aplicadas tensões apropriadas [36]. Sendo assim, o movimento do PZT é função da tensão aplicada sobre ele.

Na Figura 11 o PZT pode ser visto acoplado a um dos espelhos de um interferômetro de Twyman-Green [23], sendo utilizado para deslocar

a fase de uma onda. Para gerar uma fase adicional de  $2\pi/3$  ( $120^\circ$ ), o espelho no qual o PZT está acoplado necessita de um movimento de  $\lambda/6$ , sendo  $\lambda$  o comprimento de onda do laser utilizado. Para aplicar uma fase adicional de  $\pi/2$  ( $90^\circ$ ) é necessário movimentar o espelho  $\lambda/8$ , que para um laser de HeNe com comprimento de onda de  $\lambda = 632,8$  nm isto equivale à mover o espelho 79,1 nm entre cada imagem adquirida [6] [37].

Figura 11 - Configuração para deslocamento de fase com PZT.



Fonte: Adaptado da referência [23].

Slangen e Gautier [32] [33] afirmam que a substituição de um PZT por um retardador variável de cristal líquido (LCVR) para gerar o deslocamento de fase permite reduzir o tempo de aquisição dos padrões de *speckle* necessários para calcular a diferença de fase em interferometria. O tempo de aquisição de quatro imagens com a fase deslocada entre elas é reduzido de 1,3 s com a utilização do PZT para 0,6 s utilizando o LCVR [33]. A redução do tempo de aquisição garante um processamento das imagens mais rápido, além disso, minimiza a exposição do sistema às perturbações impostas pelo ambiente. Configurações ópticas utilizando LCVR para deslocar a fase serão apresentadas no decorrer deste trabalho.

Um sistema de deslocamento de fase ideal deveria conter as seguintes características:

1. Características metrológicas adequadas (i.e., boa linearidade, estabilidade no longo prazo, repetibilidade e resolução);
2. Compensação automática de diferentes forças e cargas;
3. Rigidez infinita (dentro do intervalo de cargas);
4. Baixa histerese e rejeição de efeitos aleatórios [33].

### 2.2.6 Determinação do Valor da Fase

Teoricamente, é possível obter o valor da fase a partir de um mínimo de três imagens adquiridas com deslocamentos de fase conhecidos. Contudo, um maior número de imagens envolvidas no processamento tende a reduzir os erros envolvidos [19] [29].

Na literatura são apresentados vários algoritmos para determinar a fase [29], sendo que, o algoritmo mais comumente utilizado necessita de quatro imagens com deslocamentos de fase de  $0$ ,  $\pi/2$ ,  $\pi$  e  $3\pi/2$  [36], resultando na Equação 13 mostrada abaixo:

$$\tan \phi = \frac{I_{(\frac{3\pi}{2})} - I_{(\frac{\pi}{2})}}{I_{(0)} - I_{(\pi)}} \quad \text{Equação 13}$$

onde  $I(0)$  corresponde a um deslocamento de fase inicial,  $I(\pi)$  à um deslocamento de  $180^\circ$  em relação a  $I(0)$ ,  $I(\pi/2)$  e  $I(3\pi/2)$  correspondem respectivamente a deslocamentos de  $90$  e  $270^\circ$  em relação a  $I(0)$ .

Muitos destes algoritmos podem levar ao surgimento de erros de natureza sistemática no valor da fase devido a várias causas. As mais importantes são:

1. Calibração deficiente no deslocador de fase;
2. Não linearidade e histerese do deslocador de fase;
3. Não linearidade do sensor da câmera;
4. Desvios na distribuição de intensidade das franjas de uma senóide devido a múltiplos feixes refletidos [36] [38] [39] [29].

Uma maneira de reduzir alguns destes erros é utilizar algoritmos com um número maior de passos de deslocamentos de fase.

Um algoritmo simples e insensível a erros decorrentes da calibração do deslocamento de fase foi desenvolvido por Hariharan et al. (1987) [30]. Usam-se 5 medições de intensidade do interferograma e assume-se inicialmente um deslocamento de fase constante de  $\alpha$  entre os passos, como segue na Equação 14:

$$\delta i = -2\alpha, -\alpha, 0, \alpha, 2\alpha \dots \quad \text{Equação 14}$$

Para cada ponto da imagem a intensidade é adquirida, conforme as Equações a seguir [30] [23] [40] [6]:

$$I1(x, y) = 2I_0[1 + \gamma \cos(\phi(x, y) - 2\alpha)] \quad \text{Equação 15}$$

$$I2(x, y) = 2I_0[1 + \gamma \cos(\phi(x, y) - \alpha)] \quad \text{Equação 16}$$

$$I3(x, y) = 2I_0[1 + \gamma \cos \phi(x, y)] \quad \text{Equação 17}$$

$$I4(x, y) = 2I_0[1 + \gamma \cos(\phi(x, y) + \alpha)] \quad \text{Equação 18}$$

$$I5(x, y) = 2I_0[1 + \gamma \cos(\phi(x, y) + 2\alpha)] \quad \text{Equação 19}$$

onde  $I_0$  representa o valor da intensidade média ou de fundo;  $\gamma$  representa a modulação para o termo de interferência [17] e  $\phi(x, y)$  é o valor da distribuição de fase a ser determinada.

Estas cinco equações são expandidas e combinadas para produzir o resultado intermediário de acordo com a Equação 20:

$$\frac{\tan[\phi(x, y)]}{2 \sin(\alpha)} = \frac{I_2 - I_4}{2I_3 - I_5 - I_1} \quad \text{Equação 20}$$

Diferenciando esta equação em relação à  $\alpha$ , encontra-se [23]:

$$\frac{d}{d\alpha} \left\{ \frac{\tan[\phi(x, y)]}{2 \sin \alpha} \right\} = \frac{-\cos(\alpha) \tan[\phi(x, y)]}{2\sin^2(\alpha)} \quad \text{Equação 21}$$

A Equação 21 tende para zero quando  $\alpha=\pi/2$ . Quando utiliza-se este valor para deslocar fase, a Equação 20 torna-se insensível a erros de calibração no deslocamento de fase [23]. Assim a Equação 20 se reduz a sua forma final [41]:

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left[ \frac{2(I_2 - I_4)}{2I_3 - I_5 - I_1} \right] \quad \text{Equação 22}$$

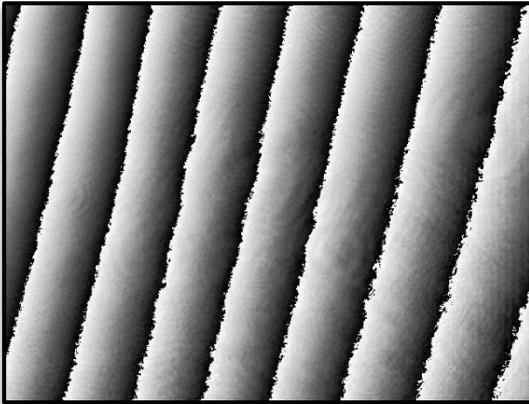
Sendo repetida também após aplicada a deformação, obtendo-se [7]:

$$\phi' = \phi + \Delta\phi = \tan^{-1} \left[ \frac{2(I'_2 - I'_4)}{2I'_3 - I'_5 - I'_1} \right] \quad \text{Equação 23}$$

O erro de fase não é constante, mas é função do valor da fase medida. O erro máximo para uma mudança de  $2^\circ$  no deslocamento de fase linear entre medições ( $88^\circ$  ao invés de  $90^\circ$ ) é cerca de  $0,02^\circ$ . Este mesmo erro do deslocamento de fase para um algoritmo convencional, tal como o algoritmo de 4 passos, resulta em um erro de medição na ordem de  $1^\circ$  [23].

O cálculo computacional do ângulo de fase através da função arcotangente resulta em valores de fase entre  $-\pi$  e  $+\pi$ . Porém, o valor da fase real ultrapassa os limites de  $-\pi$  e  $+\pi$  ( $2\pi$ ), mas as Equações 22 e 23 resultam nos valores cômputos dos ângulos correspondentes à primeira volta apenas. Quando a fase aumenta progressivamente, toda vez que o ângulo de fase completa uma volta há um “salto” de  $360^\circ$  ( $2\pi$ ) no valor calculado da fase [19] [7] [42]. A Figura 12 ilustra um exemplo de mapa das diferenças de fase resultante da subtração de duas imagens de fases. Note a presença dos “saltos” de fase caracterizando o perfil tipo “dente de serra”.

Figura 12 - Exemplo de um mapa de diferenças de fase gerado na shearografia.

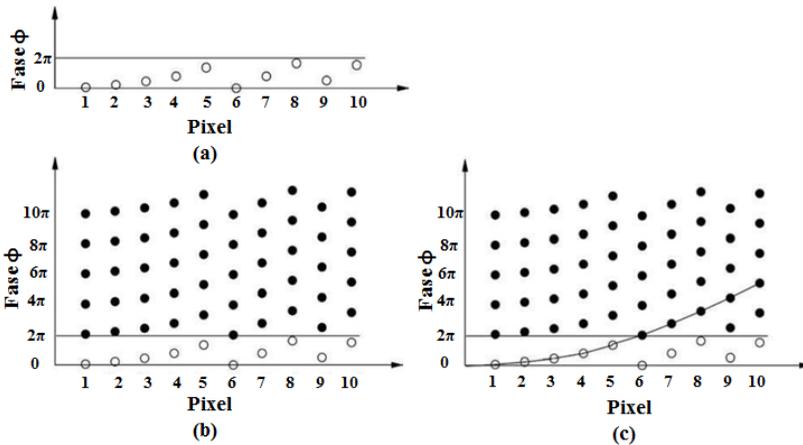


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Assim sendo, o passo final no processo de reconstrução da diferença de fase consiste em remover as descontinuidades de  $2\pi$  que estão presentes nos dados de fase. Este processo, geralmente denominado na literatura como “remoção do salto de fase” (em Inglês

*phase unwrapping*) tem o objetivo de converter o módulo de  $2\pi$  dos dados de fase em uma representação contínua da fase. Sempre que uma grande descontinuidade ocorre na reconstrução,  $2\pi$  ou múltiplos de  $2\pi$  são adicionados aos dados vizinhos para removê-la. Este processo é ilustrado unidimensionalmente na Figura 13, sendo que em (a) apresenta-se o módulo  $2\pi$  da fase em cada pixel, (b) todas as possíveis soluções para a fase e (c) a fase reconstruída [23].

Figura 13 - Processo de remoção do salto de fase e reconstrução da fase.



Fonte: Adaptado da referência [23].

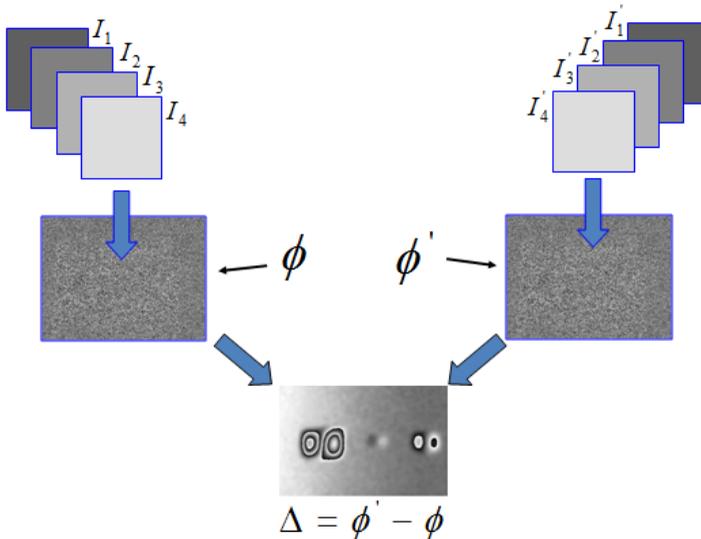
Quando o conjunto de valores de diferença de fase é calculado, e é representado para todos os pixels de uma imagem, forma-se o denominado mapa da diferença de fases, sendo frequentemente representado em imagens monocromáticas com 8 bits de resolução, que apresentam 256 níveis de cinza. É comum adotar uma escala em que 256 níveis de cinza correspondem a  $2\pi$  rad. Assim, se o valor da diferença de fase for 0 ou um múltiplo inteiro de  $2\pi$ , o pixel será visualizado na cor preta [19]. Valores intermediários de diferença de fase serão representados em outros tons de cinza [17].

O mapa de fases de uma superfície contendo *speckle*, como, por exemplo, o de uma condição inicial sem carregamento, apresenta composição tipicamente aleatória, sem um padrão visual que caracterize franjas [17] [19]. Por outro lado, a imagem resultante da diferença de fases do estado inicial ( $\phi$ ) e final ( $\phi'$ ), denominada de Mapa da Diferença de Fases ( $\Delta\phi$ ), apresenta um padrão visual que corresponde às

franjas que interferem de dois estados, carregado e não carregado [17] [19] [7] [28] [40].

O processo para obtenção do mapa da diferença de fase é ilustrado na Figura 14, onde primeiramente são armazenadas quatro distribuições de intensidade ( $I_1, I_2, I_3$  e  $I_4$ ) sendo calculado o valor da fase  $\phi$  do estado sem carregamento. Após, é aplicado o carregamento e mais quatro distribuições de intensidade ( $I'_1, I'_2, I'_3$  e  $I'_4$ ) são adquiridas e é calculado o valor de fase do segundo estado, este com carregamento aplicado. Posteriormente as respectivas distribuições de fase  $\phi$  e  $\phi'$  são calculadas. Finalmente, depois disso o mapa da diferença de fase  $\Delta\phi$  é obtido pela subtração digital de  $\phi'$  e  $\phi$  [6]. A última etapa, não representada na figura, é a remoção do salto de fase.

Figura 14 - Mapa de fase da mudança de fase relativa  $\Delta\phi$ .



Fonte: Adaptado da referência [1].

### 2.3 INTERFERÔMETRO COM RETARDADOR VARIÁVEL DE CRISTAL LÍQUIDO

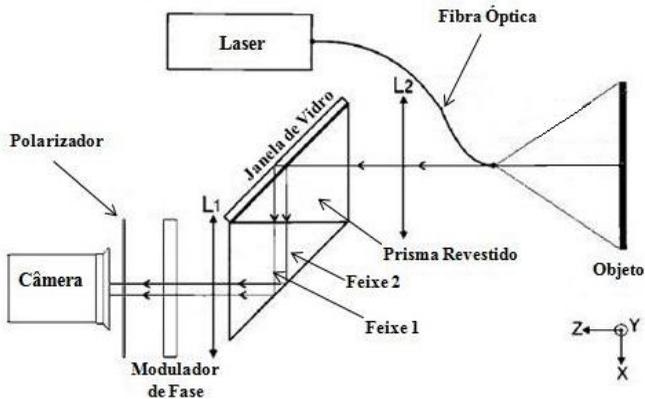
A configuração experimental apresentada a seguir, ilustrada pela Figura 15, é um interferômetro de caminho quase igual, ou seja, os raios de luz que formam as duas imagens deslocadas lateralmente seguem quase o mesmo caminho geométrico antes de interferir. Deste modo,

quando estiverem em um ambiente instável, os dois feixes que interferem serão igualmente perturbados, mantendo praticamente inalterada a diferença de fase relativa. Este interferômetro tem a vantagem de ser compacto e menos sensível a perturbações externas que os tradicionais interferômetros *speckle* [35].

A interferência resultante é oriunda da diferença de caminhos ópticos da frente de onda original refletida pelo objeto com a frente de onda lateralmente deslocada do mesmo objeto. A intensidade resultante dessa interferência é influenciada pela diferença de fase entre dois pontos da superfície medida.

O arranjo óptico da Figura 15 utiliza uma câmera (CCD, CMOS ou *SMART CAMERA*<sup>5</sup>), um modulador de fase formado por um dispositivo de cristal líquido, utilizado para criar um retardo entre os feixes de luz, duas lentes idênticas L1 e L2 com mesmas distâncias focais, um laser, um polarizador e um prisma polarizador.

Figura 15 - Arranjo óptico alternativo.



Fonte: Adaptado da referência [35].

A luz não polarizada refletida pelo objeto chega até o prisma, que possui um revestimento em sua face traseira, sendo separada em duas componentes com estados ortogonais de polarização. O prisma deve ser alinhado ao dispositivo de cristal líquido de forma que uma das ondas

<sup>5</sup> *SMART CAMERA*: Também conhecida como câmera inteligente. É um sistema de visão, que além de capturar uma imagem é capaz de extrair uma informação específica da aplicação a partir das imagens captadas gerando descrições e tomando decisões a cerca das mesmas.

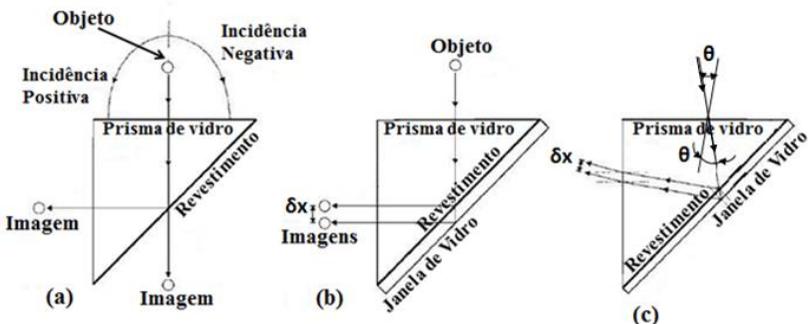
passa através do cristal líquido na direção do eixo rápido e a outra na direção do eixo lento. Logo após a frente de onda passar pelo modulador de fase, o qual tem a função de atrasar de forma controlada uma componente em relação à outra, a mesma passa por um polarizador orientado a  $45^\circ$  em relação ao eixo rápido, que combina as duas componentes ortogonalmente polarizadas, e é então captada pelo sensor da câmera. Nesse arranjo óptico a mudança de fase ocorre a partir de um dispositivo de cristal líquido com controle de tensão, i.e., retardador variável de cristal líquido.

Em [35] é apresentado também um prisma especial, utilizado para realizar o deslocamento lateral, sendo considerado o elemento chave do arranjo óptico da Figura 15, pois, é também através do prisma que se dá a separação dos dois modos de polarização.

O prisma em questão separa uma onda incidente em duas ondas polarizadas linearmente em planos ortogonais. A separação dos dois estados de polarização é realizada por um revestimento a base de filmes finos aplicado na face traseira do prisma de vidro.

Rosso et. al. [35] verificaram o comportamento do prisma pela medição da reflexão e da transmitância das ondas polarizadas. O estudo indicou que na incidência normal, a separação dos dois modos de polarização pode chegar a 93%. No entanto, a separação se mostrou mais adequada para ângulos de incidência entre  $6^\circ$  e  $22^\circ$ , o que é ilustrado na Figura 16 (c).

Figura 16 - Prisma com janela de vidro para realizar o deslocamento lateral.



Fonte: Adaptado da referência [35].

De maneira geral um interferômetro para medições com shearografia, que utilize um LCVR para deslocar a fase, deve ser capaz de:

1. Sobrepor duas imagens, oriundas da superfície do objeto ensaiado;

2. Deslocar lateralmente uma imagem em relação à outra;
3. Deslocar a fase de uma das duas imagens que interferem;
4. Polarizar cada imagem paralelamente aos eixos lento e rápido do LCVR.

### 3 PRINCÍPIOS E CARACTERÍSTICAS DOS DESLOCADORES DE FASE

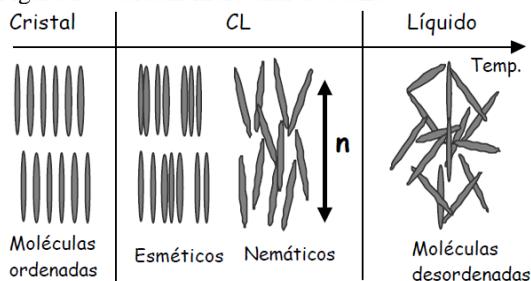
Este capítulo descreve os princípios físicos de dois dos principais elementos normalmente usados para o deslocamento de fase, além de suas características fundamentais.

#### 3.1 CRISTAIS LÍQUIDOS

A descoberta dos cristais líquidos (CLs) é atribuída ao botânico austríaco Friedrich Reinitzer (1888); ele observou que um material conhecido como benzoato de colesterila tinha dois pontos distintos de fusão [43]. Em seus experimentos, Reinitzer observou que aumentando-se a temperatura de uma amostra sólida deste composto, ocorria uma transição para um líquido turvo, e que, aumentando mais ainda a temperatura, o material transformava-se novamente, mas, desta vez, para um líquido transparente. Na mesma época, Otto Lehmann (1889) observou que substâncias como oleato de amônio e p-azoxi-fenetol fundiam, passando por um estado intermediário no qual o líquido era birrefringente [44].

Os cristais líquidos, diferentemente dos líquidos comuns, apresentam anisotropia, a qual faz com que suas propriedades mudem com a direção, como nos sólidos; dividindo com os líquidos a capacidade de fluir, de escoar. Os CLs são caracterizados ainda por apresentarem um grau de ordem molecular intermediário, entre a ordem orientacional e posicional de longo alcance dos sólidos cristalinos, e a desordem de longo alcance dos líquidos isotrópicos e gases, aumentando seu grau de desordem com o aumento de temperatura [45] [46] (como ilustrado na Figura 17).

Figura 17 - Ordem molecular dos CLs.

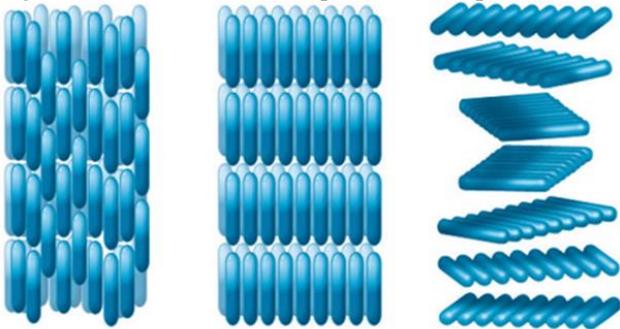


Fonte: Adaptado da referência [45].

Os CLs são usados em aplicações tecnológicas de grande importância por serem anisotrópicos. A sua anisotropia permite a mudança nas propriedades óticas pela aplicação de campos magnéticos ou elétricos [46]. A mudança nas propriedades óticas pode ser usada para modular a luz e, portanto, obter-se a informação a cerca da mesma [43], sendo este efeito a base de todas as aplicações tecnológicas dos cristais líquidos.

Os CLs são classificados em mesofases essencialmente por sua simetria e grau de ordenamento, sendo divididos em duas famílias: termotrópicos e liotrópicos [48] [49] [47]. A família dos termotrópicos tem grande importância em aplicações tecnológicas, como na fabricação de dispositivos eletro-ópticos e sensores de temperatura e pressão [43]. Em 1922 Friedel classificou os CLs termotrópicos em mesofases, de acordo com suas propriedades estruturais e ordem molecular, propondo a divisão em três classes: nemática, colestérica e esmética. Na Figura 18 ilustra-se essas três fases.

Figura 18 - Fases dos cristais líquidos termotrópicos.



Fase Nemática

Fase Esmética

Fase Colestérica

Fonte: Adaptado da referência [50].

Cristais líquidos nemáticos tem menor ordem de nível molecular. As moléculas, que são alongadas estão quase paralelas entre si com centros não alinhados, não existindo camadas definidas. Suas propriedades óticas mudam sob a ação de um campo elétrico [44]. Os cristais líquidos nemáticos servem como principal matéria-prima na fabricação de retardadores variáveis de cristal líquido LCVRs, utilizados para deslocar a fase na técnica de shearografia.

### 3.1.1 Retardadores Variáveis de Cristal Líquido

Um Retardador Variável de Cristal Líquido LCVR é também chamado de Válvula de Cristal Líquido Nemático LCLV ou Modulador Espacial de Luz (SLM). Cristais líquidos nemáticos são hoje frequentemente usados para alterar a polarização ou a fase e amplitude de uma onda de luz [33]. A Figura 19 ilustra um LCVR comercial, fabricado pela empresa Meadowlark Optics, tal dispositivo possui dois eixos principais, que estão indicados pelas letras *s* (*slow*) e *f* (*fast*).

Quando a luz incidente é linearmente polarizada e incide paralela ao eixo lento do dispositivo, o mesmo pode ser usado como modulador de fase de tensão controlada, sendo possível alterar o atraso da fase da luz que atravessa a célula. Alternativamente, quando a luz é linearmente polarizada e possui componentes paralela e perpendicular ao eixo lento, a célula de CL funciona como um retardador variável contínuo ao longo de uma ampla faixa de frequências [43]. A componente polarizada, transmitida paralelamente ao eixo rápido, viaja a uma velocidade mais elevada do que a componente polarizada, transmitida paralelamente ao eixo lento, isto gera uma retardância da fase entre as duas componentes de onda [51].

Figura 19 - Retardador Variável de Cristal Líquido.



Fonte: Referência [51].

Quando uma determinada tensão é aplicada ao cristal líquido, o seu índice de refração é alterado, fazendo com que a velocidade das ondas se altere e a diferença de fase relativa entre as ondas ortogonalmente polarizadas seja também alterada. Para que a diferença

de fase possa ser controlada, é necessário realizar uma calibração que determinará a curva tensão versus diferença de fase do retardador. Essa curva permite conhecer o nível de tensão que deve ser aplicado para promover a diferença de fase desejada. O retardador variável de cristal líquido não é tão compacto quando o PZT, porém, apresenta a vantagem de ser introduzido na transmissão em qualquer lugar da configuração experimental.

Quando combinado com outros componentes ópticos os retardadores variáveis de cristal líquido produzem atenuação eletricamente controlável, rotação de polarização linear ou modulação de fase. A modulação de fase pura é conseguida alinhando o eixo óptico do retardador de cristal líquido paralelamente a um raio de entrada linearmente polarizado. Ele fornece retardo ajustável, alterando a birrefringência do material como função da tensão aplicada [35].

Dispositivos de cristal líquido devem ser impulsionados eletricamente com uma forma de onda AC<sup>6</sup> com nenhuma componente DC<sup>7</sup> para evitar o acúmulo iônico que pode danificar o cristal líquido. O dispositivo que envia tensão ao LCVR deve ser capaz de sintetizar uma onda quadrada na ordem de 2 kHz de amplitude ajustável com tensão média igual a zero para controlá-lo [51].

Um arranjo óptico para deslocar a fase de uma onda de luz utilizando um LCVR, e controlado por um computador, é ilustrado na Figura 20. O esquema possui uma câmera CCD para registrar a intensidade do interferograma, enviando as informações até uma placa de captura de imagens com interface *Firewire* (i.e., IEEE 1394b<sup>8</sup>). Um *laser* é utilizado para realizar a iluminação. O esquema ainda possui um monitor, que serve como uma interface entre o usuário e software. O LCVR é colocado em frente ao dispositivo que separa a frente de onda refletida pelo objeto testado (os feixes F1 e F2 representam, respectivamente, os feixes de referência e medição, os quais são provenientes do objeto). Os eixos (lento e rápido) do LCVR são alinhados aos eixos de polarização do dispositivo que separa a frente de onda. O polarizador recombina as duas componentes ortogonalmente

---

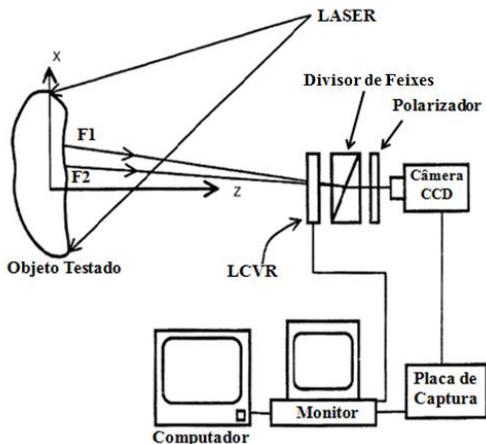
<sup>6</sup> AC: Do inglês *alternating current*, ou corrente alternada, é uma corrente elétrica cujo sentido varia no tempo, sendo usual a várias formas de ondas.

<sup>7</sup> DC: Do inglês *direct current*, ou corrente contínua, é o fluxo ordenado de elétrons sempre em uma direção de polarização.

<sup>8</sup> IEEE 1394b: Também conhecida como *Firewire*, é uma interface serial para computadores pessoais e aparelhos digitais de áudio e vídeo, que oferece comunicações de alta velocidade e serviços de dados em tempo real.

polarizadas para que a figura de interferência seja visível no sensor da câmera.

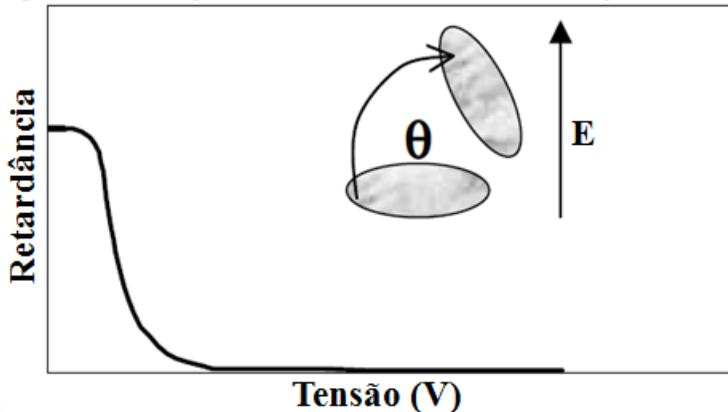
Figura 20 - Esquema de acionamento de um LCVR.



Fonte: Adaptado da referência [7].

Ao aplicar-se uma diferença de potencial elétrico (ddp) sobre a célula, cria-se um campo elétrico  $E$  perpendicular à janela de vidro. Dipolos elétricos são induzidos e as moléculas de CL sofrem torques que as fazem girar alinhando-as com o campo elétrico, como ilustrado através da Figura 21 [43] [45].

Figura 21 - Mudança na retardância com o aumento do campo elétrico  $E$ .



Fonte: Adaptado da referência [52].

À medida que a ddp aumenta, as moléculas (exceto aquelas fixadas na superfície interior da janela) giram cada vez mais em direção ao campo elétrico aplicado, causando uma diminuição na birrefringência e também na retardância  $\Delta\phi$  do LCVR [32].

A birrefringência é função da ddp, temperatura (diminuindo em torno de 0,4% por cada °C crescente) e do comprimento de onda (diminuindo à medida que o mesmo aumenta). A Equação 24 descreve a birrefringência de um LCVR como sendo a diferença entre o índice de refração extraordinário (eixo lento)  $n_e$  e o índice de refração ordinário (eixo rápido)  $n_o$  [32] [43].

$$\Delta n = n_e - n_o \quad \text{Equação 24}$$

Já a retardância é descrita na Equação 25 como:

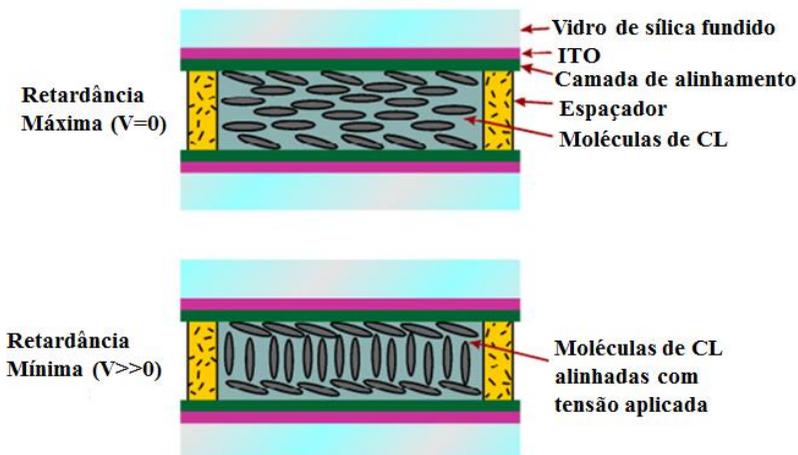
$$\Delta\phi(V, T, \lambda) = \frac{2\pi}{\lambda} d\Delta n \quad \text{Equação 25}$$

onde  $\lambda$  é o comprimento de onda da fonte de luz,  $d$  é a espessura da camada de cristal líquido e  $\Delta n$  a birrefringência da célula de cristal líquido [45].

Os LCVRs usam material de cristal líquido nemático, a sua arquitetura é ilustrada na Figura 22. As faces da cavidade contendo o material birrefringente são feitas de três camadas: vidro de sílica fundido, óxido de índio estanho (ITO) que serve como eletrodo, e uma camada dielétrica polida que assegura o alinhamento das moléculas graças a riscos paralelos microscópicos. O CL é depositado entre estas camadas. As duas faces são separadas por um espaçador de alguns micrometros de espessura [51] [43].

Na ausência de ddp ( $V=0$ ), as moléculas de cristal líquido se encontram paralelas ao substrato de vidro e o retardo máximo é alcançado. Quando a tensão é aplicada ( $V \gg 0$ ) as moléculas de cristal líquido inclinam perpendicularmente de forma proporcional ao próprio valor de tensão, com isso, é possível controlar a retardância  $\Delta\phi$  dos feixes de luz [43] [51]. A Figura 22 ilustra o que foi descrito acima.

Figura 22 - Alinhamento das moléculas para  $V=0$  e  $V \gg 0$ .



Fonte: Adaptado da referência [51].

O tempo de resposta destes dispositivos depende de uma série de fatores: espessura da camada do material nemático, viscosidade, temperatura de operação, variações no drive de tensão e possíveis tratamentos superficiais efetuados na fabricação. Geralmente, a resposta de um LCVR é mais rápida quando aplicam-se valores crescentes de ddp na célula de CL [51]. O tempo de resposta é proporcional ao quadrado da espessura da camada de cristal e, portanto, ao quadrado da retardância total. Em [33] é definido que para um aumento de tensão de  $0,2 \text{ V}$  o tempo de resposta do retardador é  $30 \text{ ms}$ .

O tempo de resposta é melhorado com o uso de materiais customizados com birrefringência alta e com camada de cristal líquido fina. Temperaturas mais elevadas diminuem a viscosidade do material e também contribuem para uma resposta mais rápida [51].

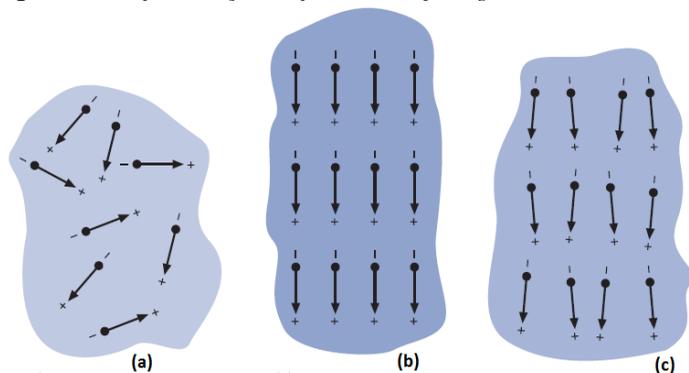
Retardadores de ordem zero são preferidos para aplicações que exigem estabilidade. Um retardador de ordem zero é fino e tem baixa birrefringência [51].

### 3.2 FUNDAMENTOS DA PIEZOELETRICIDADE

A piezeletricidade (ou efeito piezelétrico direto) é a capacidade que determinados materiais possuem de gerar uma polarização elétrica quando submetidos a uma deformação mecânica. Este efeito foi descoberto por Jacques e Pierre Curie no final de 1880 [53].

A piezeletricidade está baseada na formação de forte dipolo entre íons de cargas contrárias na estrutura cristalina de um cristal iônico. A orientação cristalina aleatória faz com que as cerâmicas piezelétricas não estejam naturalmente ativas, sendo necessária a polarização dos cristalitos piezelétricos. Isto é possível através de técnicas que proporcionam uma orientação preferencial da estrutura cristalina durante o processo de fabricação. Um método simples, porém, bastante empregado para a orientação de domínios é o processo de *poling* [54]. A Figura 23 (a) ilustra os dipolos elétricos da cerâmica ferroelétrica antes do processo de *poling*, (b) durante e (c) após o processo.

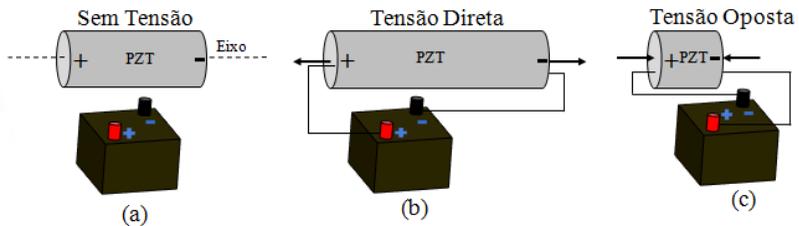
Figura 23 - Representação do processo de *poling*.



Fonte: Adaptado da referência [55].

Depois disso o material cerâmico exibe propriedades piezelétricas e muda suas dimensões quando uma ddp elétrica é aplicada. Quando esses materiais são submetidos a uma deformação mecânica, geram uma diferença de potencial elétrico. Inversamente, quando se aplica uma ddp elétrica nas superfícies desses materiais, eles sofrem deformação mecânica, podendo se contrair ou se expandir, dependendo da polaridade da tensão aplicada [56], como ilustrado na Figura 24. Em (a) o material piezelétrico não é submetido a nenhuma ddp elétrica, (b) uma ddp elétrica é aplicada diretamente sobre o material, expandindo-o. Em (c) a ddp é aplicada com polaridade oposta e o material acaba se contraindo. Em ambos os casos o elemento piezelétrico tende a retornar à sua dimensão original, quando a ddp elétrica é removida.

Figura 24 - Princípio básico da piezeletricidade.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

### 3.2.1 Atuadores Piezelétricos PZTs

Os atuadores piezelétricos proporcionam movimentos de alta precisão (de alguns micrometros) a bicos injetores de motores de combustão interna, lentes e espelhos. O elemento ativo pode pertencer a materiais naturais como cristais de quartzo, rochelle e turmalina, os quais possuem um efeito piezelétrico pequeno, ou ainda a materiais cerâmicos policristalinos com propriedades piezelétricas, como é o caso do titanato de bário e do titanato zirconato de chumbo que é representado pela sigla PZT [57].

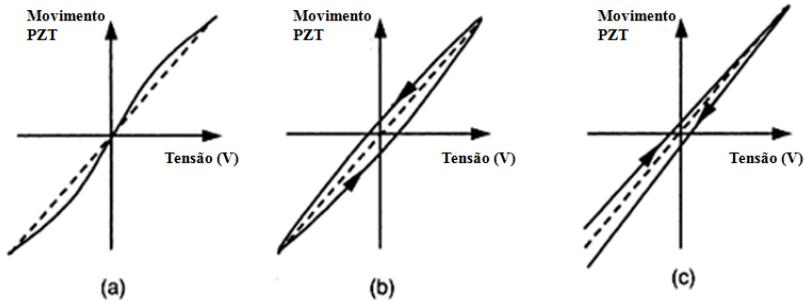
Para o dimensionamento de um atuador piezelétrico, utiliza-se a expressão dada pela Equação 26:

$$\Delta L \approx d_{33}nU \quad \text{Equação 26}$$

onde  $\Delta L$  representa o deslocamento do atuador, o qual é o próprio deslocamento do espelho, ou a variação de caminho óptico da luz,  $d_{33}$  é o coeficiente de deformação mecânica,  $n$  é o número de discos cerâmicos utilizados na fabricação e  $U$  a tensão de operação [55].

Embora muito utilizado, o PZT apresenta características típicas como: (a) não linearidade, (b) histerese e (c) desvio linear, efeitos estes ilustrados na Figura 25.

Figura 25 - Características típicas de um PZT.



Fonte: Adaptado da referência [6].

No contexto das não idealidades do PZT, o equipamento possui resposta não linear (Figura 25a) com desvios de linearidade de  $\pm 1^\circ$  em deslocamentos de fase nominais de  $\pm 90^\circ$ . Em (b), o PZT apresenta o efeito de histerese com desvios de linearidade de  $\pm 2^\circ$  quando o deslocamento de fase corresponde a  $0^\circ$ , e  $\pm 1^\circ$  quando é igual a  $90^\circ$ . O principal erro de fase, apresentado na sequência, é um offset de  $\pm 1^\circ$ , com um erro residual para não linearidade que é inferior a  $\pm 0,005^\circ$ . Outra fonte de erro, ilustrada na Figura 25 (c), é um desvio linear do PZT [6]. Outra fonte de erro que pode ser significativa no deslocamento de fase está relacionado com a qualidade do movimento do espelho. Se o movimento do espelho apresentar pequenas inclinações estas produzirão incrementos de fase diferentes em diferentes regiões da imagem. A minimização deste efeito depende um bom projeto mecânico do dispositivo de deslocamento do espelho.

### 3.3 CALIBRAÇÃO DOS DESLOCADORES DE FASE

Ochoa e Huntley [34] propuseram um método para calibrar um modulador de fase (i.e., retardador variável de cristal líquido) não linear baseando-se na minimização de uma função obtida a partir de uma sequência de imagens interferométricas. O método pode ser aplicado tanto para interferometria de frente de onda plana quanto de frente de onda *speckle*, permitindo uma calibração conveniente *in situ* para uma ampla variedade de configurações de interferômetros. A principal vantagem deste sobre outros métodos de calibração é que tanto os termos de variação de fase linear quanto os de fase quadrática são

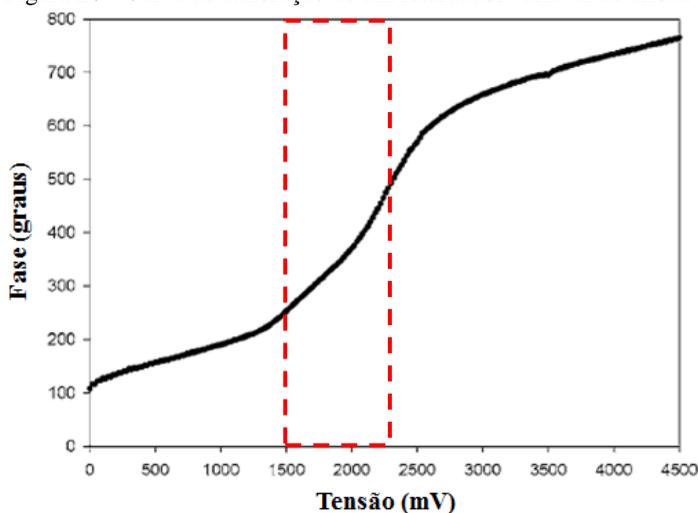
medidos. O desempenho do método proposto foi verificado pelos autores através de ensaios em que o deslocamento de fase é determinado de forma independente por um método de transformada de Fourier.

A calibração do modulador de fase é realizada através da determinação do deslocamento de fase a partir da aplicação de uma tensão induzida. O retardador variável de cristal líquido é bem conhecido por apresentar não linearidade elevada em relação à ddp aplicada [35]. A calibração consiste no registro de duas imagens, antes e depois da aplicação de uma ddp conhecida no modulador de fase. A diferença média do quadrado das intensidades entre as duas imagens é obtida calculando a média sobre todos os pixels da imagem, podendo então ser representada como uma função da ddp.

Rosso et. al. [35] mostram o resultado da curva de calibração de um retardador variável de cristal líquido obtido com uma configuração experimental para shearografia, próxima a que se pretende utilizar neste trabalho. Na Figura 26 ilustra-se a curva obtida por [35].

Em [35], um algoritmo de quatro passos, com incrementos de  $\alpha = \pi/2$  foi utilizado para calcular a fase, sendo aplicado, sucessivamente (1500, 1890, 2166 e 2371) mV de tensão na célula de cristal líquido. É possível observar que a curva de calibração obtida pelos autores apresenta nesta faixa uma melhor linearidade. Na Figura 26 isto é destacado na cor vermelha pela área tracejada.

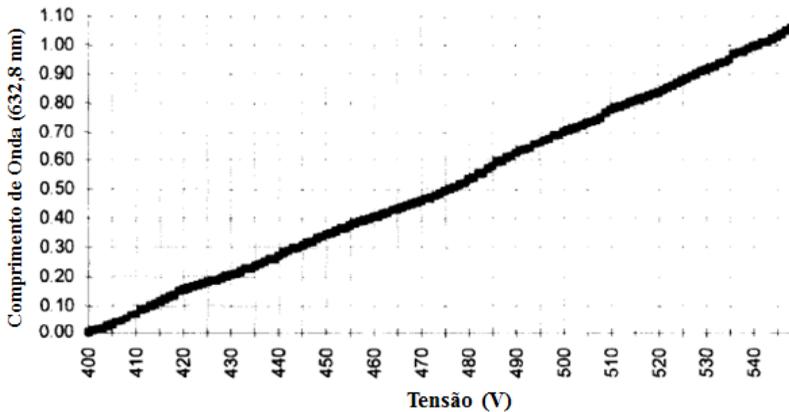
Figura 26 - Curva de calibração de um retardador variável de cristal líquido.



Fonte: Referência [35].

Para um transdutor piezelétrico a curva característica de resposta de uma calibração é apresentada na Figura 27. A calibração do PZT realizou-se utilizando um interferômetro de *Michelson*, controlando-se os incrementos de fase através de um computador e os gerando por meio de um conversor D/A. O PZT desloca, não mais, que um comprimento de onda, para isto é aplicado um intervalo de tensão de 140 V, entre (400 e 540) V [59]. O comprimento de onda de 632,8 nm refere-se ao *laser* HeNe, da cor vermelha.

Figura 27 - Curva de calibração de um PZT.



Fonte: Referência [59].

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

O capítulo 4 tem por objetivo descrever os materiais e métodos utilizados nos ensaios, visando assim, uma melhor compreensão da avaliação das principais características dos deslocadores de fase e do estudo de caso utilizando a técnica de shearografia.

### 4.1 DESENVOLVIMENTO DA BANCADA PARA AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO LCVR E PZT

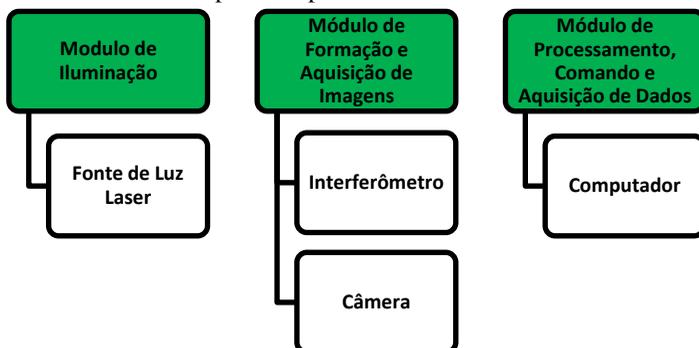
Com o desenvolvimento desta bancada, pretende-se avaliar as características pertinentes aos dois deslocadores de fase (LCVR e PZT), como: curva característica de resposta, linearidade, tempo de resposta, incerteza na medição da diferença de fase e histerese. Também avaliar-se-á características peculiares ao sinal enviado ao LCVR: *duty cycle* e frequência.

Os requisitos necessários para desenvolver a bancada de ensaios, utilizada nesta etapa da dissertação, são listados abaixo:

1. Utilizar um laser como fonte de luz coerente, sendo posicionado de forma que a luz incida diretamente no interferômetro;
2. Montar dois interferômetros, que possibilitem separar e sobrepor dois feixes de luz;
3. Cada interferômetro deve dispor de um dispositivo capaz de realizar o deslocamento de fase (PZT e LCVR);
4. Acoplar uma câmera na saída de cada interferômetro, capturando as imagens obtidas nos ensaios;
5. Possuir um computador para aquisição e processamento das imagens, além de realizar o controle de todos os elementos da bancada.

A bancada de ensaios utilizada para avaliação das principais características dos deslocadores de fase foi montada no Laboratório de Metrologia e Automatização da Universidade Federal de Santa Catarina (LABMETRO), após a especificação do aparato experimental, o qual é ilustrado em módulos de uma forma simplificada na Figura 28.

Figura 28 - Módulos do aparato experimental.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

No aspecto de hardware, a bancada foi composta por quatro partes: câmera digital monocromática, a qual é parte integrante do módulo de formação e aquisição de imagens; fonte de luz *laser*, a qual constitui o módulo de iluminação, computador para processamento, comando e aquisição dos dados e interferômetro, parte constituinte do módulo de formação e aquisição de imagens.

A câmera digital monocromática é uma ferramenta que registra a intensidade de luz e a representa através de uma imagem descrita em níveis de cinza. Hoje em dia, diferentes câmeras digitais estão disponíveis comercialmente. A principal especificação de uma câmera digital é sua resolução espacial, ou seja, o número de pixels. A seleção da resolução espacial depende da aplicação específica e do custo [26]. Para este trabalho foi selecionada uma câmera modelo Flea 3 14S3M, da Point Grey, que possui uma resolução máxima de 1392 pixels na direção horizontal e 1032 pixels na direção vertical, em um sensor CCD modelo Sony ICX267AL de ½ " com taxa de aquisição máxima de 30 Hz. A câmera foi utilizada em conjunto com uma placa de captura de imagens *Firewire* (i.e., IEEE-1394b). A mesma câmera foi utilizada nos ensaios realizados, para avaliar tanto o LCVR quanto o PZT.

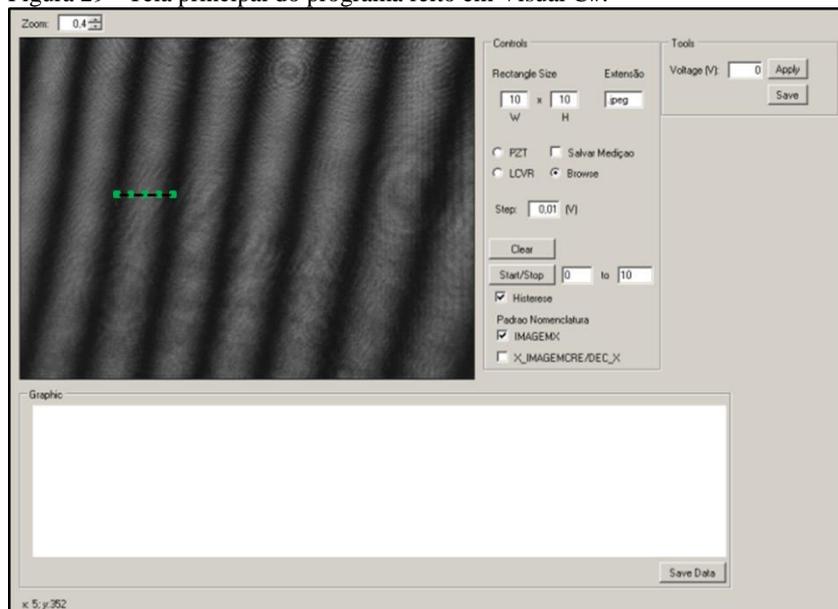
Utilizou-se para esta etapa de ensaios um laser HeNe do fabricante Melles Griot, modelo 05-LHP-991, de 10 mW de potência e com 632,8 nm de comprimento de onda, da cor vermelha.

As imagens de um padrão de franjas de interferência, foram registradas pelo sensor CCD da câmera e processadas utilizando dois *softwares*, um desenvolvido na plataforma *LabVIEW* e outro em *Visual C#*. O *software* desenvolvido em *LabVIEW* serviu para aquisição das

imagens que após foram processadas no *software* desenvolvido no programa *Visual C#*.

O programa desenvolvido em *Visual C#* tem a função de processar um conjunto de imagens, referentes a cada ensaio realizado, calculando a fase de cada imagem em função da tensão aplicada. Para determinar o valor da fase, utilizou-se um algoritmo de 5 passos, melhor detalhado no capítulo 2, seção 2.2.6. A partir desse algoritmo e utilizando mais algumas ferramentas, a imagem de interferência é digitalizada e o ângulo de fase associado às franjas é calculado. Na Figura 29 ilustra-se a tela principal do programa desenvolvido em *Visual C#*, onde através dele é possível monitorar a intensidade da luz em cada um dos 5 detectores virtuais, apresentados na cor verde, e distribuídos na região correspondente a um comprimento de onda ( $360^\circ$ ).

Figura 29 - Tela principal do programa feito em *Visual C#*.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

O interferômetro montado é similar ao interferômetro de *Michelson*. A configuração que utiliza o cristal líquido é apresentada na Figura 30. O LCVR foi conectado a um gerador de funções através de

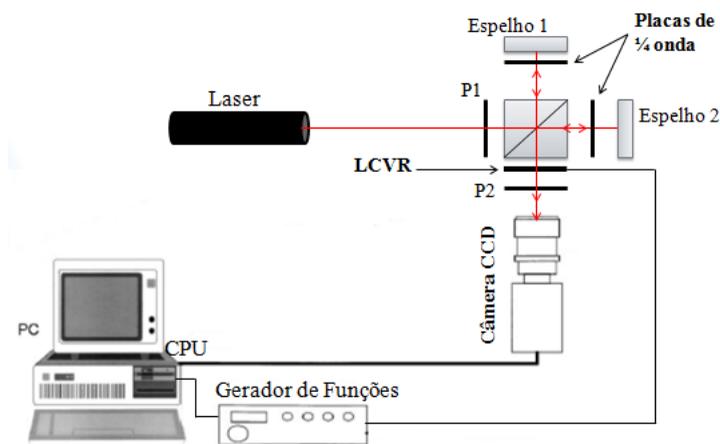
um conector do tipo BNC<sup>9</sup>. O gerador é capaz de produzir sinais com diferentes amplitudes, frequências, tipos de onda, *offset* etc. Foi utilizada uma interface GPIB-USB-HS para realizar a comunicação entre o gerador de funções e o computador. No apêndice A é apresentado o software desenvolvido para controlar o sinal enviado pelo gerador de funções ao LCVR.

Ainda no interferômetro da Figura 30, o polarizador P1 tem seu eixo orientado a 45°. Com isso, a luz que incide no interferômetro se decompõe em componentes com mesma intensidade, polarizadas nos planos vertical e horizontal. A luz incidente atravessa o cubo divisor sensível à polarização, de forma que o mesmo reflita a componente polarizada em uma direção e a transmita a outra. Entre o cubo divisor e cada um dos espelhos são inseridas placas de quarto de onda orientadas a 45° para girar em 90° a polarização dos feixes de cada braço antes da nova passagem das componentes pelo cubo divisor. Assim, a componente que foi transmitida na primeira passagem será refletida na segunda e vice-versa. A montagem ainda possui 2 espelhos (espelho 1 e espelho 2), que devem estar criteriosamente alinhados. O dispositivo LCVR é posicionado entre o divisor de feixes e o polarizador P2. Os eixos principais do dispositivo (eixos rápido e lento) devem ser alinhados às duas componentes de luz ortogonalmente polarizadas que emergem do cristal líquido. Dessa forma, quando uma tensão é aplicada ao dispositivo LCVR, ocorrerá um retardo de fase entre as duas componentes. Finalmente, o polarizador P2 deve ter seu eixo orientado a 45° para recombinar as duas componentes ortogonalmente polarizadas para que a imagem de interferência seja visível no sensor da câmera. A imagem captada pelo sensor da câmera é um padrão de franjas, formado pela interferência dos dois feixes. Uma imagem de um padrão de franjas de interferência é ilustrada na Figura 2 da seção 2.1, capítulo 2.

---

<sup>9</sup> BNC: *Bayonet Neil Concelman* é um conector para cabos coaxiais tipo RG-58 e RG-59, muito utilizado em aplicações de radiofrequência que necessitam de um conector rápido, apto para *UHF* (*Ultra High Frequency*, ou Frequência ultra alta) de impedância constante.

Figura 30 - Bancada para avaliar o LCVR.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

O LCVR utilizado foi fabricado pela Meadowlark Optics, modelo LVR 200, cujas principais características estão na Tabela 1.

Tabela 1: Principais características do LCVR LVR-200.

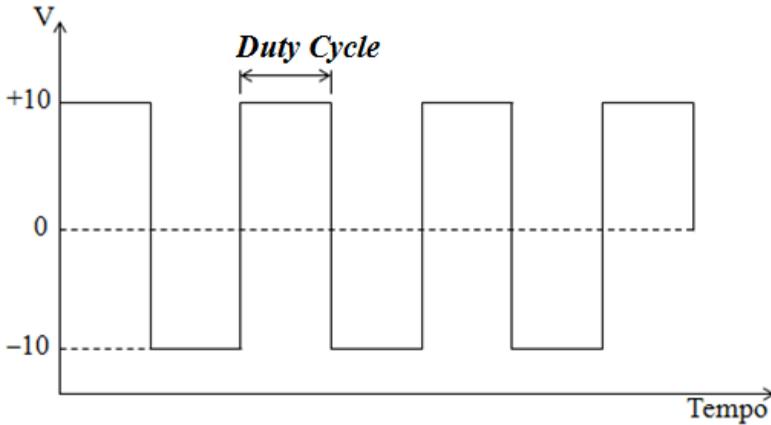
<b>Especificações</b>	
Material do Retardador	Cristal Líquido Nemático
Comprimento de onda utilizável	450 à 1800 nm
Diâmetro da Célula	50,8 mm
Abertura Livre da Célula	17,78 mm
Espessura da Célula	19,05 mm
Índice de Refração $n_e$	1,7904
Índice de Refração $n_o$	1,5277
Espessura da Camada de CL	14 $\mu\text{m}$
Birrefringência	0,2627

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Com o intuito de efetuar os ensaios com segurança, evitando danos à célula de cristal líquido, trabalhou-se dentro de uma faixa de tensões:  $\pm 10$  V. O gerador de funções, modelo 33120A da Agilent, foi configurado com uma forma de onda quadrada, de amplitude média igual à zero. Definiu-se ainda a frequência, não maior que 2 kHz, e também, o *duty cycle*, que é utilizado para descrever a porção de tempo durante a qual um componente, dispositivo ou sistema está em operação,

e pode variar de 0 à 100 %. A Figura 31 ilustra um sinal de tensão, com forma de onda quadrada e o respectivo *duty cycle*.

Figura 31 - Sinal aplicado ao LCVR.

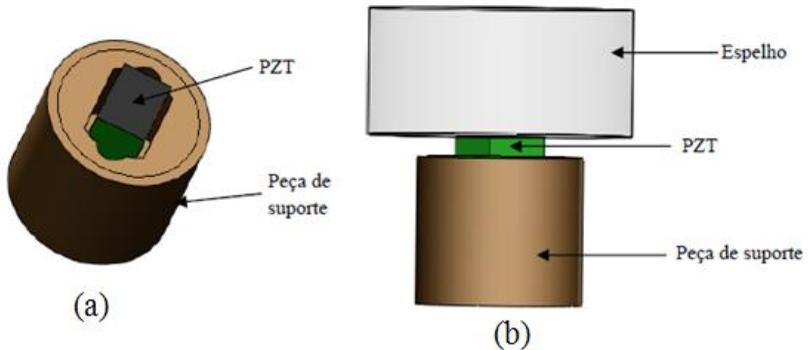


Fonte: Elaborado pelo Autor.

O atuador piezoelétrico utiliza tensão contínua DC, diferentemente do LCVR, expandindo ou contraindo o PZT e criando uma pequena mudança de posição ao espelho colado junto a ele.

A Figura 32 ilustra uma peça, utilizada como parte da configuração óptica para shearografia, onde em (a) o elemento piezoelétrico é suportado por uma geometria cilíndrica, deixando assim o elemento piezoelétrico centralizado e coaxial ao suporte. Já em (b) é ilustrado o espelho já colado sobre o PZT, que necessita um especial cuidado para garantir a perpendicularidade do mesmo em relação ao eixo do movimento de translação [3].

Figura 32 - Peça com suporte, PZT e espelho.



Fonte: Referência [3].

Uma mudança de fase pode ser introduzida no feixe de referência quando monta-se um elemento piezelétrico junto de um espelho, localizado em um dos braços do interferômetro. Com isso um deslocamento muito pequeno é gerado, correspondendo a um passo de fase entre os feixes do objeto e de referência, já que o comprimento do braço é alterado [3].

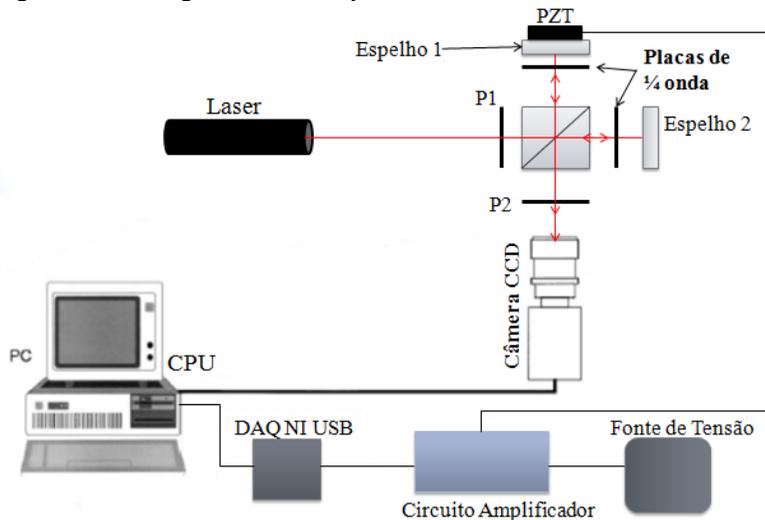
A Figura 33 mostra a disposição óptica para a mudança de fase utilizando um atuador piezelétrico. O interferômetro utilizado é também similar ao interferômetro de *Michelson*, o mesmo usado para o LCVR, a fim de proporcionar uma comparação justa das características dos deslocadores de fase.

O PZT é conectado a um circuito amplificador, fabricado pela Physics Instrument, modelo E-831, cuja função é amplificar um sinal de entrada oriundo de um conversor digital/analógico, modelo NI USB 9264, fabricado pela National Instruments. A imagem vista pela câmera, e então captada, é também um padrão de franjas de interferência, adquiridas e processadas na sequência pelos mesmos *softwares* utilizados na avaliação do LCVR, fornecendo também as informações necessárias para a avaliação das características do PZT.

No interferômetro da Figura 33, que utiliza o PZT para deslocar a fase, os polarizadores e as placas de quarto de onda são necessários devido à utilização de um divisor de feixes polarizado. Utilizou-se tal divisor de feixe, a fim de efetuar uma comparação justa com o cristal líquido, já que a configuração óptica que utiliza o LCVR para deslocar a fase possui todos estes componentes. Sendo assim o polarizador P1 tem seu eixo orientado a  $45^\circ$ , com isso a luz que incide no interferômetro se decompõe em componentes com mesma intensidade, polarizadas nos

planos vertical e horizontal. A luz incidente atravessa o cubo divisor sensível à polarização, de forma que o mesmo reflita a componente polarizada em uma direção e a transmita a outra. Entre o cubo divisor e cada um dos espelhos são inseridas as placas de quarto de onda orientadas a  $45^\circ$  para girar em  $90^\circ$  a polarização dos feixes de cada braço antes da nova passagem das componentes pelo cubo divisor. Assim, a componente que foi transmitida na primeira passagem será refletida na segunda e vice-versa. A montagem ainda possui 2 espelhos (espelho 1 e espelho 2), que devem estar criteriosamente alinhados. O atuador piezolétrico é colado atrás do espelho 1. Dessa forma, quando uma tensão é aplicada ao PZT, o mesmo é expandido ou contraído, movimentando o espelho 1, assim uma diferença de caminho óptico entre os feixes de luz é gerada, a qual corresponde há um certo deslocamento de fase. Finalmente o polarizador P2 deve ter seu eixo orientado a  $45^\circ$  para recombinar as duas componentes ortogonalmente polarizadas para que a imagem de interferência seja visível no sensor da câmera. A imagem captada pelo sensor da câmera é um padrão de franjas, formado pela interferência dos dois feixes.

Figura 33 - Montagem da bancada para o PZT.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

O PZT utilizado foi fabricado pela empresa Piezomechanik, modelo STr-35/150/6 com as características principais apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: Principais características do PZT utilizado.

<b>Especificações</b>	
Tensão de Operação Máxima	150 V
Deslocamento Máximo	6 $\mu\text{m}$
Capacitância Elétrica	2800 nF
Frequência de Ressonância	10 kHz

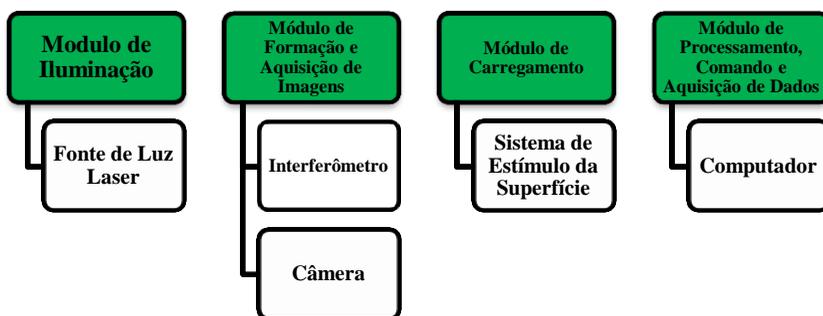
Fonte: Elaborado pelo Autor.

As montagens apresentadas nesta seção controlam os elementos utilizados nos arranjos ópticos para deslocar a fase. A partir da seleção das configurações, apresentadas nas Figuras 30 e 33, foram efetuados ensaios para obter informações referentes ao comportamento dos elementos deslocadores de fase e com isso avaliadas as propriedades inerentes a eles, já descritas no Capítulo 1, Seção 1.1.2 desta dissertação.

#### 4.2 INTERFERÔMETROS UTILIZADOS PARA O ESTUDO DE CASO UTILIZANDO SHEAROGRAFIA

Para realização dos ensaios utilizando a técnica de shearografia foi adicionado aos módulos apresentados na Figura 28 o módulo de carregamento, o qual é utilizado para gerar no corpo de prova uma pequena deformação. A Figura 34 mostra os módulos necessários para realização dos ensaios com a técnica da shearografia.

Figura 34 - Módulos para realização dos Ensaios com shearografia.

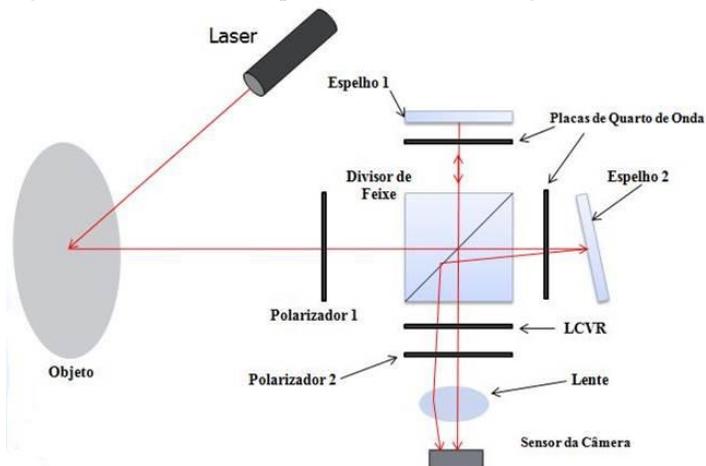


Fonte: Elaborado pelo Autor.

O interferômetro montado para realização dos ensaios utilizando o LCVR é apresentado na Figura 35. O polarizador 1 tem seu eixo orientado a  $45^\circ$ , fazendo com que a luz incidente no interferômetro tenha

componentes com mesma intensidade polarizadas nos planos vertical e horizontal. A luz incidente atravessa o cubo divisor sensível à polarização, de forma que o mesmo reflita a componente polarizada em uma direção e a transmita a outra. Entre o cubo divisor e cada um dos espelhos são inseridas placas de quarto de onda orientadas a  $45^\circ$  para girar em  $90^\circ$  a polarização dos feixes de cada braço antes da nova passagem das componentes pelo cubo divisor. Assim, a componente que foi transmitida na primeira passagem será refletida na segunda e vice-versa. A montagem ainda possui 2 espelhos (espelho 1 e espelho 2), que devem estar ligeiramente desalinhados para promover o deslocamento lateral entre as imagens. O dispositivo LCVR é posicionado entre o divisor de feixes e o polarizador 2. Os eixos principais do dispositivo (eixos rápido e lento) devem ser alinhados às duas componentes de luz ortogonalmente polarizadas que emergem do cristal líquido. Dessa forma, quando uma tensão é aplicada ao dispositivo LCVR, ocorrerá um retardo de fase entre as duas componentes. Finalmente o polarizador 2 deve ter seu eixo orientado a  $45^\circ$  para recombinar as duas componentes ortogonalmente polarizadas para que a imagem de interferência seja visível no sensor da câmera. A imagem captada pelo sensor da câmera é um padrão *speckle*, formado pela interferência dos dois feixes.

Figura 35 - Interferômetro para ensaios com shearografia utilizando LCVR.

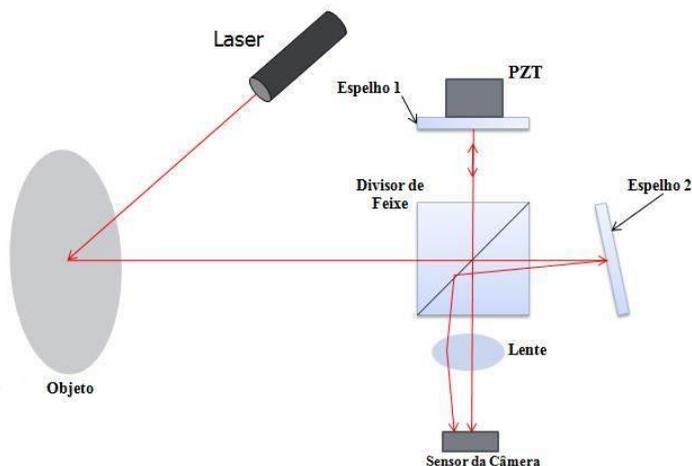


Fonte: Elaborado pelo Autor.

O arranjo óptico clássico utilizado atualmente no LABMETRO emprega um PZT para gerar o deslocamento de fase. A Figura 36

apresenta um divisor de feixe não polarizado, dois espelhos, um deles inclinado para gerar a interferência e outro sendo deslocado pelo PZT para provocar o deslocamento de fase. Utiliza-se também uma câmera para captar os resultados, representada na figura como uma lente e um sensor e a qual capta o padrão *speckle* de interferência. Utilizou-se esta configuração para obter resultados que serviram como referência para comparação com os resultados obtidos através da configuração que utiliza o LCVR.

Figura 36 - Interferômetro para ensaios com shearografia utilizando PZT.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Os resultados obtidos através de um mapa de fases possibilitam comparar de modo qualitativo o uso do PZT e do LCVR como deslocadores de fase na técnica de shearografia. A fase será calculada a partir da mudança na intensidade de cada ponto na imagem, devido ao deslocamento de fase imposto por cada deslocador. Os mapas de fase serão gerados através de uma subtração ponto-a-ponto de um conjunto de imagens defasadas de  $90^\circ$  entre elas.

#### 4.2.1 Montagem da Bancada para o Estudo de Caso

As Figuras 37 e 38 são fotos das bancadas montadas para realização dos ensaios de shearografia com o PZT e o LCVR, respectivamente.

As duas montagens tem em comum os módulos 1, 2 e 3, os quais representam, respectivamente:

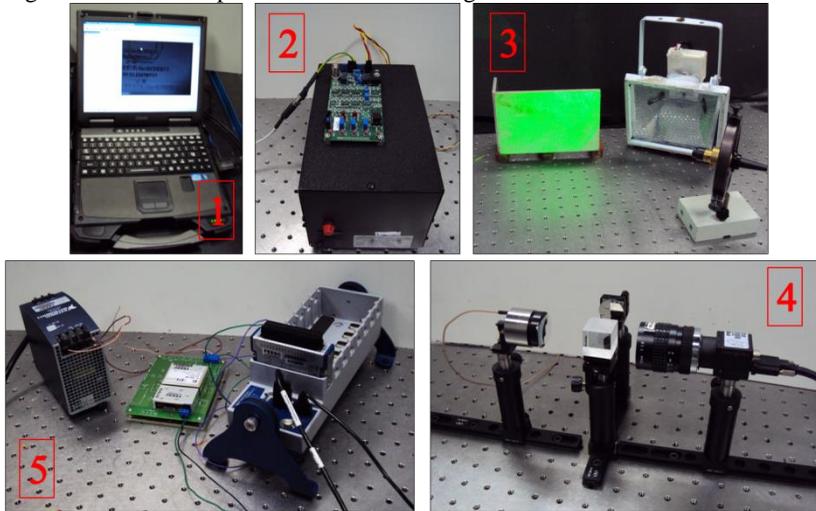
1. Computador para aquisição e processamento das imagens adquiridas;
2. Fonte de alimentação e *drive* de controle, para o *laser*;
3. *Laser*, corpo de prova e lâmpada alógena.

O *laser* utilizado para esta etapa do trabalho é do tipo DPSS, *diode-pumped solid-state*, da marca Thorlabs, modelo DJ532-40, com potência típica de 40 mW e comprimento de onda de 532 nm. O *drive* utilizado para controle do *laser* é da marca Thorlabs, modelo IP500.

Para os ensaios com o PZT, e como ilustrado na Figura 37 (4), o interferômetro utilizado é similar ao de *Michelson*, que já havia sido descrito na Figura 36, da seção 4.2. Para enviar um sinal DC até o PZT utilizou-se o esquema ilustrado em (5) da Figura 37, onde se tem um conversor digital/analógico e um circuito amplificador alimentado por uma fonte, os quais foram descritos com maiores informações na seção 4.1.

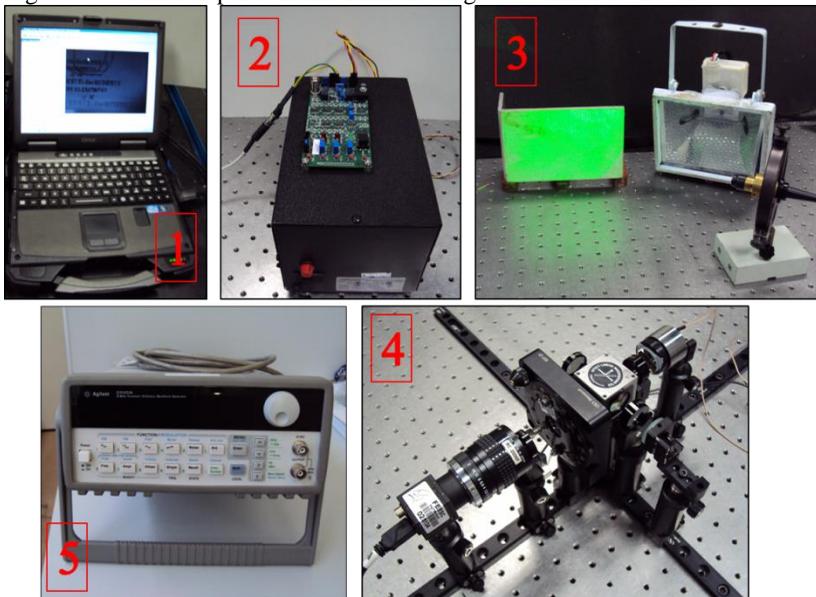
Já ao utilizar-se o LCVR nos ensaios de shearografia, realizou-se mudanças na forma de enviar o sinal ao retardador variável e também em relação ao interferômetro montado. A Figura 38 (4) ilustra o interferômetro, o qual é melhor visualizado na Figura 35, sendo também descrito na seção 4.1. A Figura 38 (5) mostra o gerador de funções utilizado para enviar o sinal até o LCVR, sendo descrito em detalhes na seção 4.1.

Figura 37 - Bancada para ensaios com shearografia utilizando PZT.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 38 - Bancada para ensaios com shearografia utilizando LCVR.

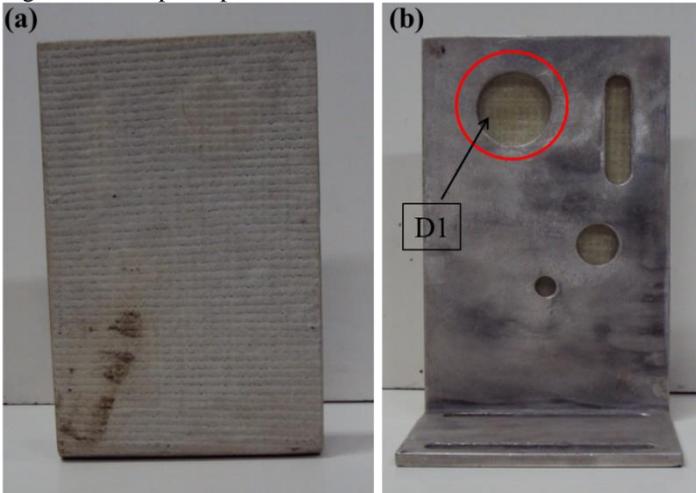


Fonte: Elaborado pelo Autor.

A lâmpada halógena utilizada possui potência de 500 W.

Na Figura 39(a) é ilustrada a parte frontal do corpo de prova utilizado, o qual possui dimensões de 185 mm x 120 mm. Já em (b) pode-se visualizar a vista posterior do CP. Nos ensaios realizados, o sistema de visualização disponível (câmera + lentes) não foi capaz de visualizar o completo CP, foi possível visualizar no sensor da câmera somente o defeito artificial D1, visto de maneira mais clara na Figura 39 (b). Este defeito possui 35 mm de diâmetro e profundidade de 6 mm.

Figura 39 - Corpo de prova utilizado no estudo de caso.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

#### 4.3 PLANEJAMENTO DO ESTUDO DE CASO

O seguinte procedimento foi adotado para a realização dos ensaios utilizando a técnica de shearografia:

1. Enquadramento do defeito D1 do corpo de prova campo de visão do sensor da câmera;
2. Configuração dos parâmetros de imagem (Foco, Ganho, *Shutter*, Gama);
3. Configuração dos parâmetros do software;
4. Aplicação do carregamento térmico com lâmpada halógena;
5. Aquisição automática de cinco imagens, defasadas de 90°, adquiridas durante o resfriamento do corpo de prova;
6. Processamento das imagens;

7. Análise dos resultados e verificação da qualidade da imagem através de impressão visual.

As medições foram realizadas com deslocamento lateral nas direções: horizontal e vertical. Para estas direções utilizou-se o valor de deslocamento lateral de 10 mm, o qual se mostrou suficiente para detectar na imagem o defeito do corpo de prova. Já os interferômetros apresentados nas Figuras 37 (4) e 38 (4) foram fixados a uma distância de aproximadamente 0,7 m do corpo de prova.

Segundo [17], o tempo de duração do carregamento é um fator importante para ensaios com shearografia e pode variar de 3 a 60 segundos. Para os ensaios realizados nesta dissertação utilizou-se um tempo de aquecimento de 5 s, sendo suficientemente necessário devido ao tamanho e profundidade dos defeitos presentes no corpo de prova.

A avaliação dos resultados foi feita através de uma análise qualitativa das imagens adquiridas com os arranjos ópticos utilizados, apresentados nas Figuras 35 e 36. Para isto levou-se em conta: o ruído presente na imagem, contraste, uniformidade da variação de fase e efetividade da calibração.



## 5 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos nesta dissertação. Com os parâmetros analisados e descritos, buscam-se informações pertinentes, a fim de avaliar aspectos positivos e limitações resultantes de uma possível substituição do PZT pelo LCVR para deslocar a fase na técnica de shearografia.

### 5.1 AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DOS DESLOCADORES DE FASE

Analisou-se cinco características pertinentes aos dois deslocadores de fase utilizados: curva característica de resposta, linearidade, tempo de resposta, incerteza na medição da diferença de fase e histerese. Também avaliou-se os efeitos de dois parâmetros: *duty cycle* e frequência, peculiares ao sinal enviado ao LCVR. O *duty cycle*, ou ciclo de trabalho, é utilizado para descrever a fração de tempo em que um sistema está em um estado ativo, uma vez que o LCVR é um componente óptico-eletrônico e funciona em regime de liga-desliga, repetitivamente. Já a frequência indica o número de ocorrências de um evento em um determinado intervalo de tempo, e que também está presente no sinal enviado ao LCVR.

A primeira característica analisada reflete a relação entre o estímulo e a resposta de um elemento, sendo denominada de curva característica de resposta [60] [58], podendo ser expressa de diversas maneiras. Aqui optou-se pela utilização de gráficos, visto que torna-se mais fácil a visualização da resposta dos deslocadores de fase em função da tensão aplicada.

Em virtude da não idealidade da relação entre o estímulo e a resposta de um deslocador de fase, verificou-se também o erro de linearidade. É possível assim exprimir o quanto a curva característica de resposta se afasta de uma linha reta ideal.

Idealmente, a resposta dos deslocadores de fase deveria ser instantânea, porém, na prática há sempre um lapso de tempo envolvido, denominado tempo de resposta. O tempo de resposta é o intervalo de tempo entre o instante em que submete-se o deslocador de fase a um estímulo, com uma variação brusca, e o instante em que a resposta atinge e permanece dentro de limites especificados, em torno de seu valor final estável [60] [58].

Outro parâmetro avaliado foi a incerteza na medição da diferença de fase, deslocada pelo LCVR ou PZT. Neste caso a incerteza de

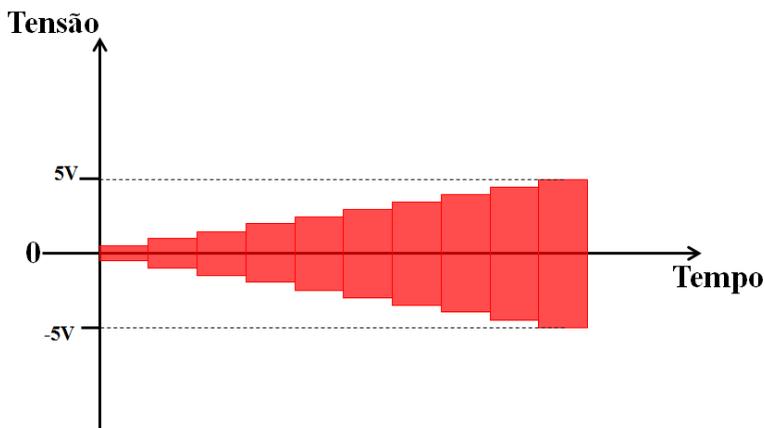
medição é a parcela de dúvida associada ao deslocamento na medição da fase [60].

A última característica avaliada foi a histerese. A histerese é um comportamento não ideal que se manifesta em sistemas elétricos, magnéticos e em alguns cristais piezelétricos. É caracterizada pela diferença de comportamento quando o mensurando<sup>10</sup> cresce ou decresce em intensidade [60].

### 5.1.1 Curva Característica de Resposta do PZT e do LCVR

Para os ensaios realizados a fim de obter a curva característica de resposta, os níveis de tensão aplicados ao LCVR variaram de (1 a 10) V. A Figura 40 ilustra a forma que o sinal quadrado que alimenta o LCVR é modificado. O valor da tensão máxima apresentado na figura é uma tensão pico a pico de 10 V, variando de +5 V até -5 V, enquanto que o valor mínimo é de 1 V, variando de +0,5 V até -0,5 V. Um nível DC igual a zero é requerido em toda a faixa de tensões aplicada.

Figura 40 - Esquema do sinal quadrado enviado ao LCVR.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

O gráfico da Figura 41 ilustra a variação da intensidade dos pixels de uma imagem versus tensão do LCVR para um ensaio realizado, com incrementos de tensão positivos de 10 mV. A variação da intensidade decorre do deslocamento das franjas de interferência ao longo do ensaio

<sup>10</sup> MENSURANDO: é a grandeza específica submetida a medição.

em função da variação da tensão aplicada, sendo que a distância entre duas cristas, ou dois vales, corresponde a uma variação do caminho óptico no valor de um comprimento de onda ( $\lambda$ ) do *laser*.

O mesmo é ilustrado na Figura 42, porém com valores de fase já processados. Os valores de fase obtidos foram encontrados a partir do mesmo conjunto de imagens, de um padrão de franjas de interferência, utilizado para obter o gráfico da Figura 41, porém, calculados através de um algoritmo de 5 passos, com o software *Visual C#*, já comentado na seção 4.1 do capítulo 4. A célula de cristal líquido foi acionada através de um sinal AC de baixa tensão, com forma de onda quadrada, frequência de 2 kHz e *duty cycle* de 50%. A resposta obtida representa a variação de fase (retardância) entre os feixes de luz ortogonalmente polarizados, que chegam até o cristal líquido.

O LCVR apresentou uma sensibilidade maior, deslocando aproximadamente  $3\lambda$ , no intervalo de tensões entre (2 à 5) V, intervalo este destacado nos gráficos através das linhas tracejadas.

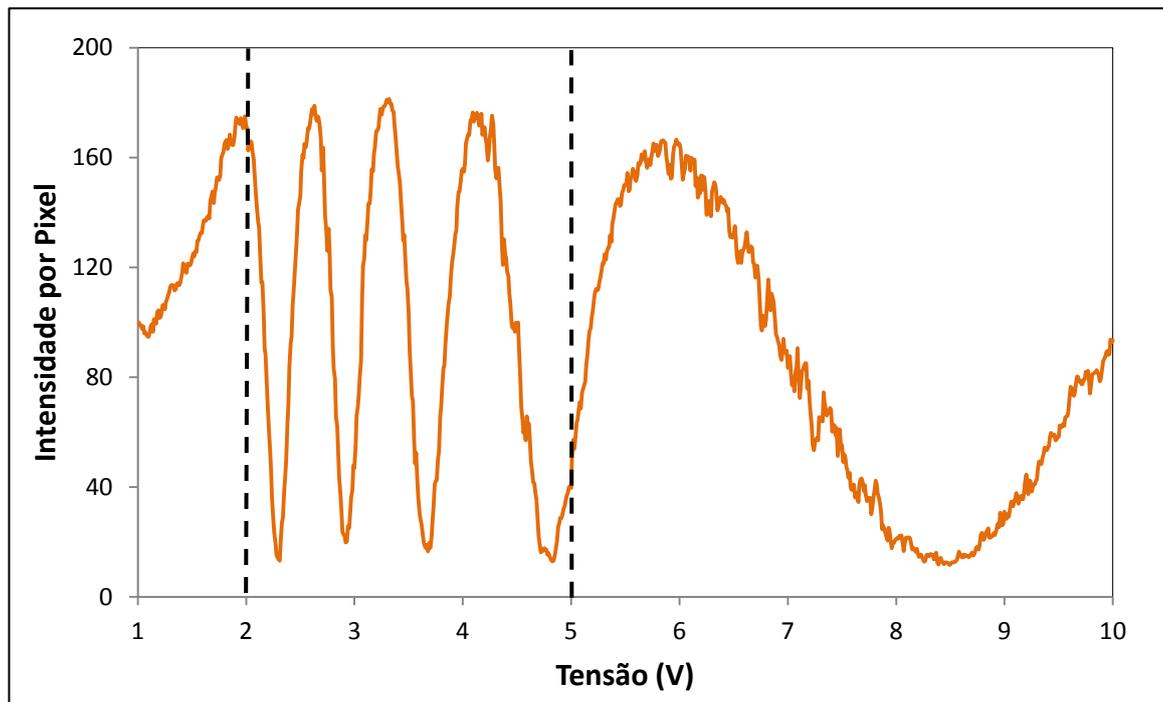
A célula de cristal líquido é capaz de deslocar, utilizando todo o intervalo de tensão aceitável, mais de três ondas completas ( $360^\circ$ ), que neste caso equivalem cada uma a 632,8 nm, referente ao comprimento de onda do *laser* HeNe utilizado para os ensaios.

Na Figura 43 ilustra-se o gráfico da variação da intensidade versus a tensão aplicada para o atuador piezelétrico. O ensaio realizado de (0 a 100) V permite captar a variação contínua entre os pontos de intensidade máxima e mínima, que indicam a posição das franjas claras e escuras, respectivamente. Ao analisar o resultado pode-se perceber que ao aplicar-se um intervalo de tensão de 100 V desloca-se aproximadamente 1,5 comprimentos de onda, mostrando que o modelo de PZT utilizado no ensaio possui uma sensibilidade bem menor que a célula de cristal líquido.

Na Figura 44 é ilustrado o gráfico da curva característica de resposta encontrada para o PZT. O software utilizado para obter o valor da fase em função da tensão aplicada ao PZT foi o mesmo usado para o LCVR. Para deslocarmos um comprimento de onda completo precisa-se utilizar uma faixa que englobe 70 V de tensão, (10 à 80) V, por exemplo.

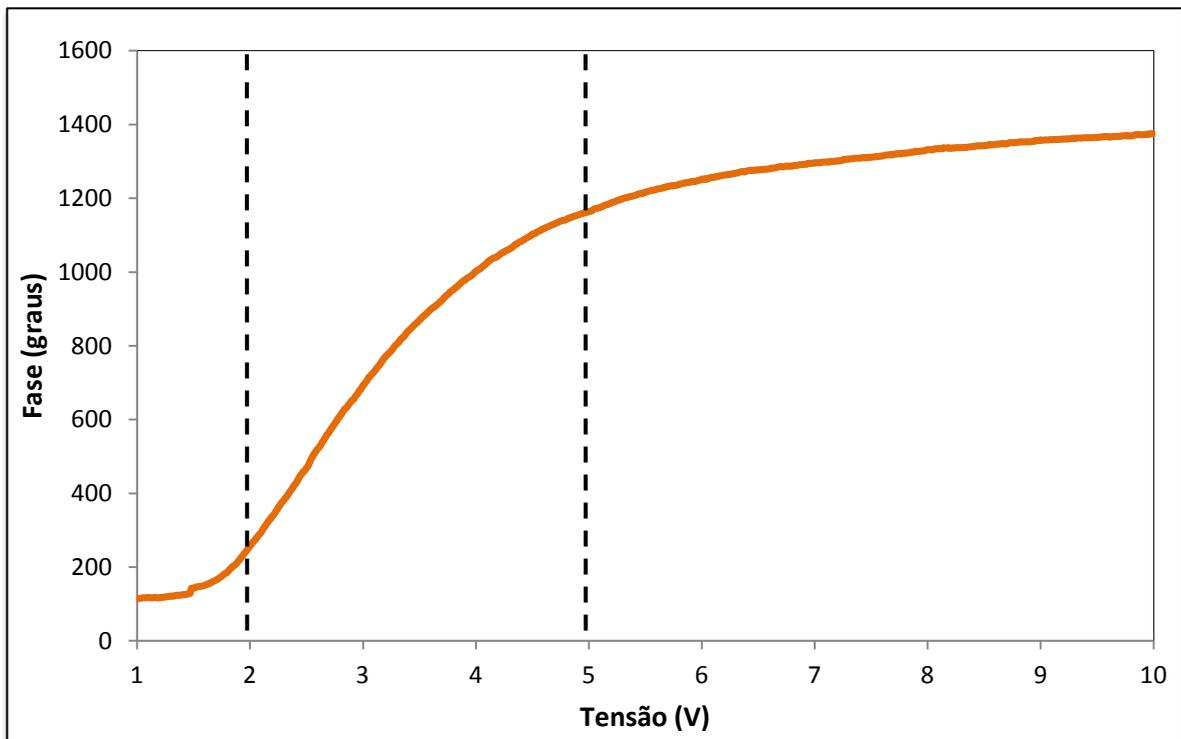
A forma das curvas depende fortemente da ausência de perturbações (movimentos de ar, variações de temperatura, vibrações mecânicas). Para assegurar que tais perturbações não agiram durante os ensaios, os mesmos foram repetidos inúmeras vezes, obtendo-se as mesmas curvas características.

Figura 41 - Gráfico da variação da intensidade em função da tensão aplicada no LCVR.



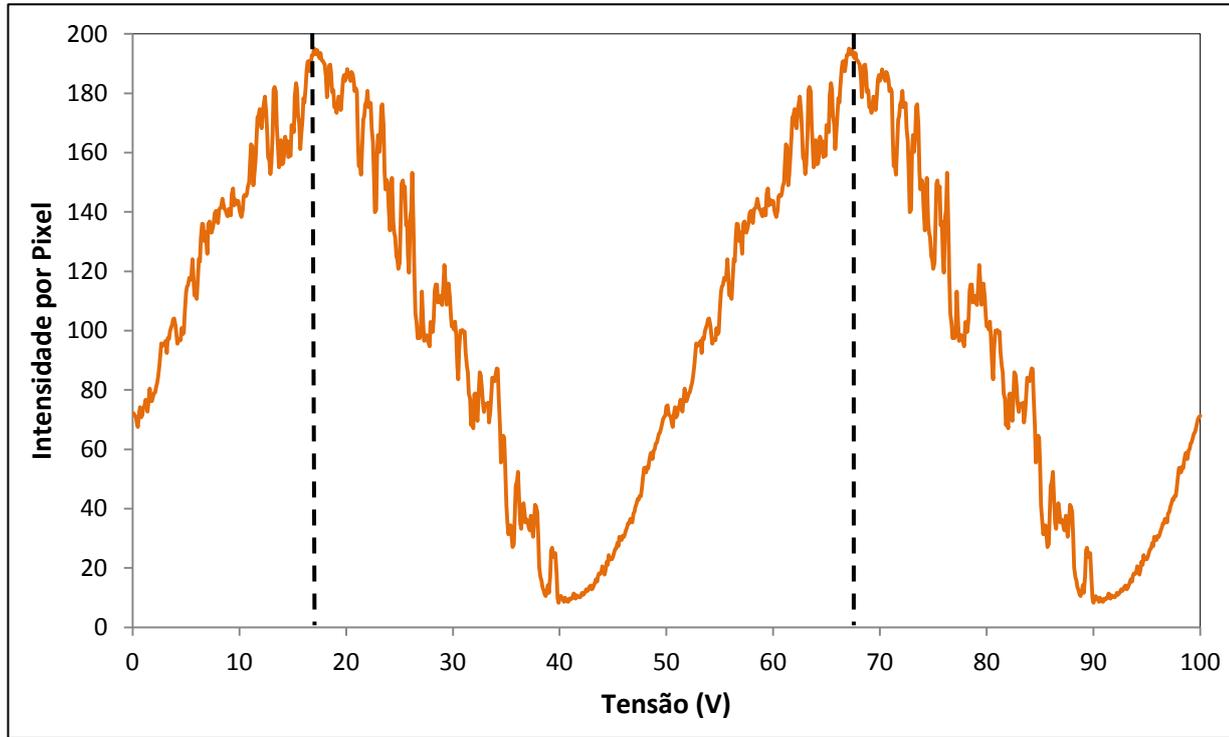
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 42 - Curva Característica de Resposta do LCVR.



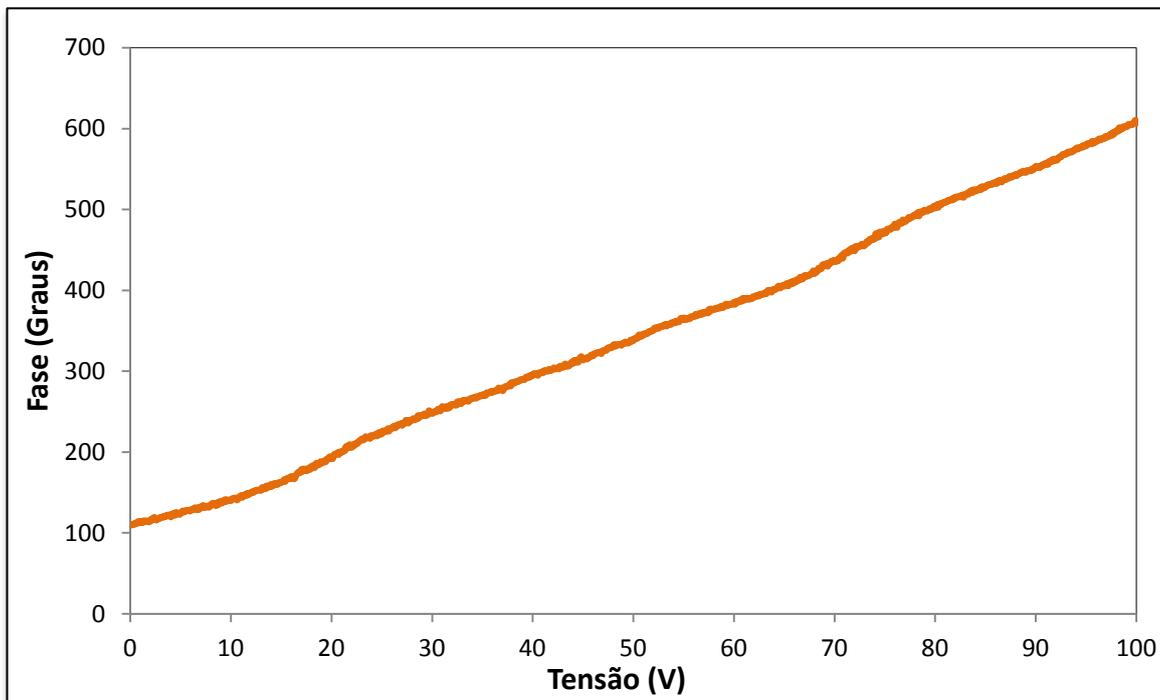
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 43 - Gráfico da variação da intensidade em função da tensão aplicada no PZT.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 44 - Curva Característica de Resposta do PZT.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

### 5.1.2 Avaliação da Linearidade

Para quantificar o erro de linearidade foi escolhido o método dos mínimos quadrados MMQ, que determina a equação de uma reta de regressão relacionando as variáveis  $x$ (Tensão) e  $y$ (Fase), e, após, calcula-se o quadrado do coeficiente de correlação  $R^2$ , o qual é uma medida de relacionamento linear entre estas variáveis. A equação da reta obtida pela regressão linear está apresentada na Equação 27.

$$Y = Ax + B \quad \text{Equação 27}$$

A Figura 45 ilustra o gráfico obtido utilizando a configuração da Figura 30 da seção 4.1, no qual é possível avaliar a linearidade no intervalo entre (2 à 2,82) V, no caso de se gerar o deslocamento de fase com o LCVR. A faixa correspondente apresenta um coeficiente de correlação de  $R^2=0,9991$ , o que indica uma linearidade muito próxima da ideal “1”. Como o LCVR apresenta uma retardância alta para valores baixos de tensão, é possível deslocar um comprimento de onda completo dentro desta faixa. Quando uma variação de tensão de 0,82 V é aplicada, ocorre uma variação de fase de, aproximadamente,  $360^\circ$  ( $2\pi$ ). O gráfico também apresenta a equação da reta de regressão linear mais adequada para esta faixa.

Na Figura 46 apresenta-se o gráfico que avalia a linearidade do LCVR na faixa de tensões entre (2,83 à 3,9) V. O coeficiente de correlação obtido para esta faixa foi de  $R^2=0,9932$ , inferior se comparado ao valor encontrado no gráfico da Figura 45. Para esta faixa também desloca-se um comprimento de onda, porém, o intervalo de tensão utilizado é maior que o aplicado na faixa anterior, isto porque, com o aumento da tensão a retardância tende a se aproximar de zero  $V \gg 0$ , como já descrito na seção 3.1.1 do capítulo 3.

A linearidade, ou o grau de proporcionalidade entre o sinal gerado e a grandeza física (fase) também foi analisada para o caso do PZT. Através da configuração apresentada na Figura 33 da seção 4, realizou-se os ensaios no intervalo de tensão entre (0 à 100) V, com incrementos de 0,1 V.

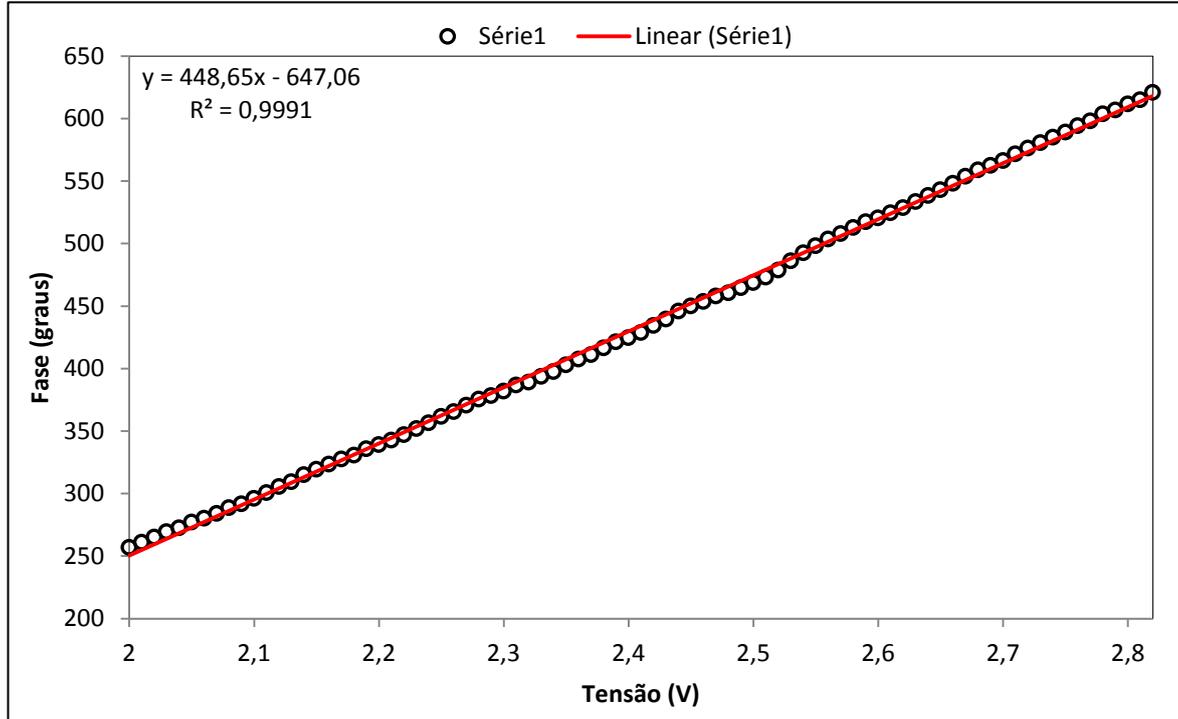
A Figura 47 ilustra o gráfico para avaliação da linearidade na faixa entre (10 e 79,6) V, a qual possibilita deslocar um comprimento de onda completo, e apresenta coeficiente de correlação de  $R^2=0,9967$ , inferior ao LCVR se comparado com coeficiente de correlação

encontrado no gráfico da Figura 45, que equivale ao intervalo de tensões entre (2 à 2,82) V.

Para o PZT, utilizando a faixa de (10 à 79,6) V, e no caso de se realizar deslocamentos de  $0$ ,  $\pi/2$ ,  $\pi$ ,  $3\pi/2$  e  $2\pi$ , as tensões enviadas seriam, respectivamente, 10; 26,3; 45,9; 65,7 e 79,6 V.

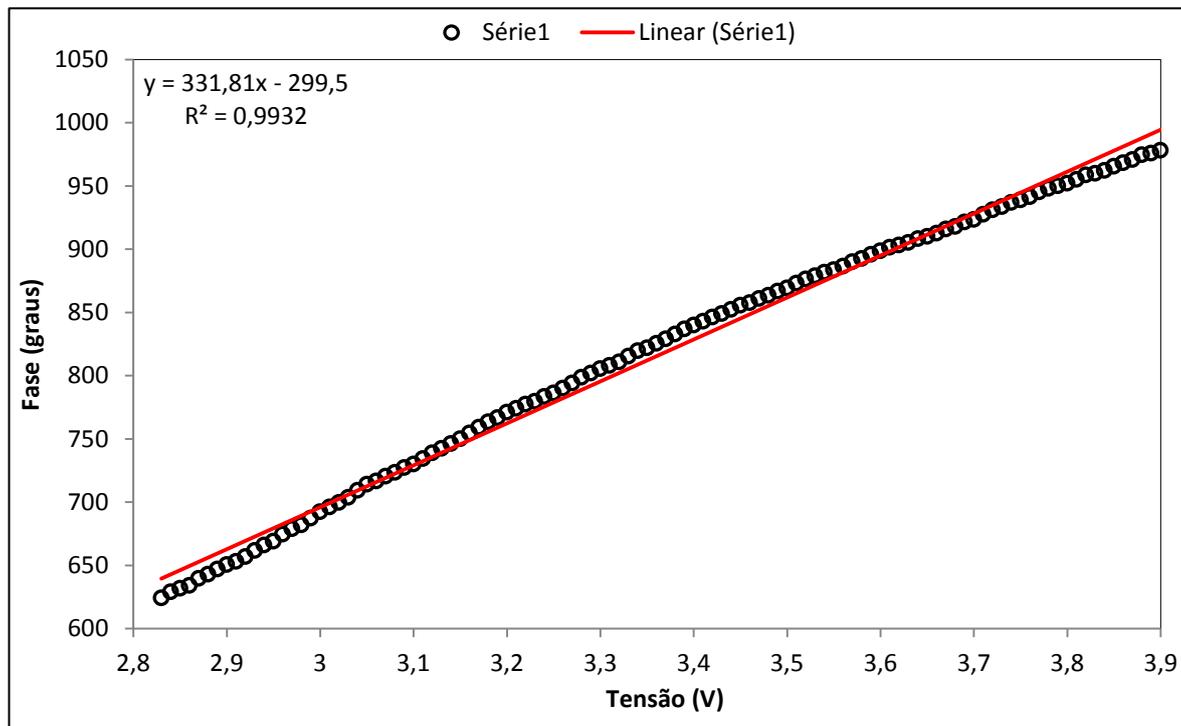
O intervalo avaliado adequado para realizar as 5 mudanças de fase, utilizando o LCVR, é a zona mais linear entre 2 e 2,82 V. Medições refinadas qualificaram este aspecto linear do deslocamento de fase versus tensão. No caso de aplicar-se um algoritmo de 5 passos, o incremento de fase  $\alpha=\pi/2$  é obtido aplicando, por exemplo, sucessivamente 2000, 2220, 2380, 2600 e 2820 mV no retardador variável de cristal líquido.

Figura 45 - Gráfico Avaliação da Linearidade do LCVR (2 à 2,82) V.



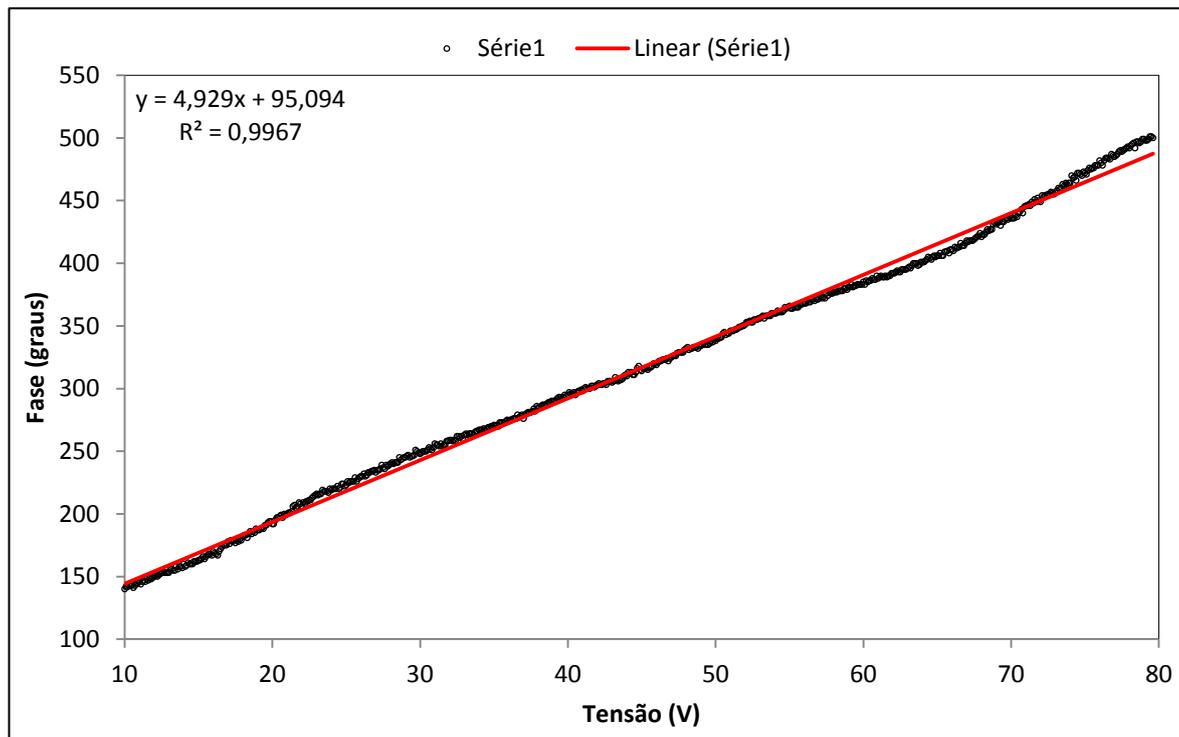
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 46 - Gráfico Avaliação da Linearidade do LCVR (2,83 à 3,9) V.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 47 - Gráfico Avaliação da Linearidade do PZT (10 à 79,6) V.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

### 5.1.3 Avaliação do *Duty Cycle* e Frequência do Sinal do LCVR

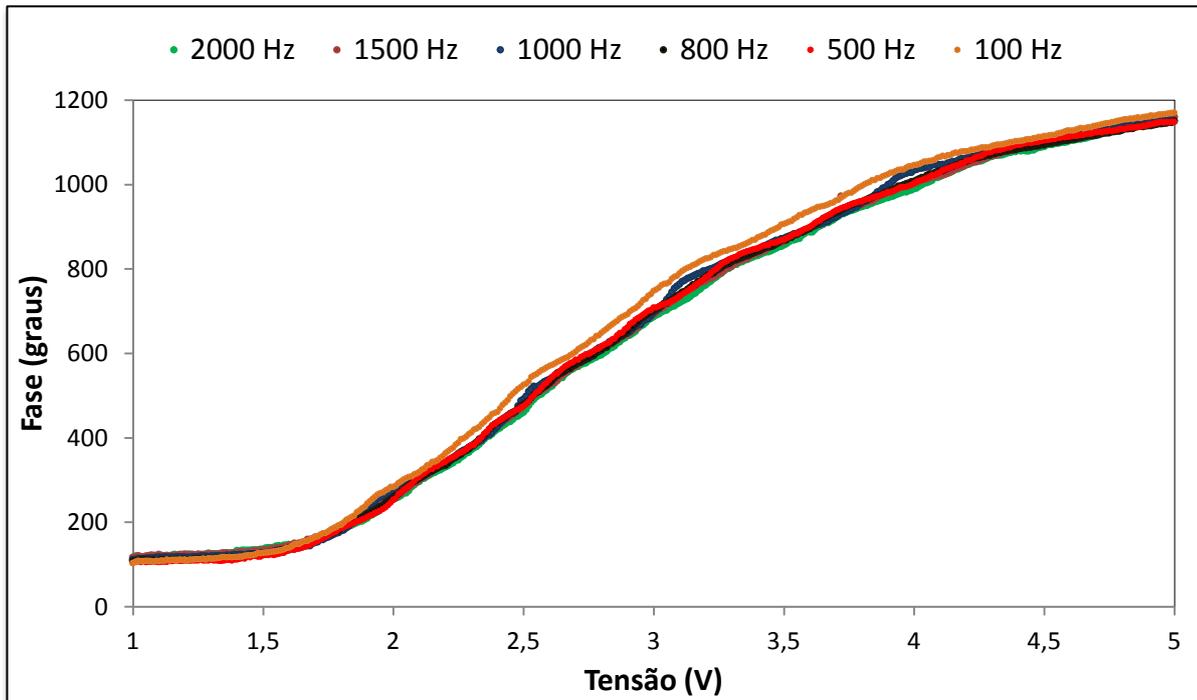
Duas características presentes no sinal de tensão enviado ao LCVR, e que podem ser variadas, são: frequência e *duty cycle*. Realizou-se ensaios com intervalo de tensão entre (1 à 5) V, com incrementos de tensão de 10 mV, a fim de avaliar e conhecer a influência destes parâmetros na curva característica de resposta.

A influência da frequência na curva de resposta do LCVR é ilustrada na Figura 48. Um gráfico de fase versus tensão para seis frequências diferentes (2000, 1500, 1000, 800, 500 e 100) Hz foi gerado. O resultado apresentado mostra que a frequência não influencia significativamente no resultado final da curva. Deve-se tomar cuidado, porém, em não ultrapassar o valor de 2000 Hz especificado pelo fabricante, como valor suficiente para controlar a célula de cristal líquido, evitando com isso possíveis avarias.

Outro parâmetro avaliado foi o *duty cycle*, o qual descreve a fração de tempo em que um sistema está em estado ativo. Os valores ensaiados para o *duty cycle* foram 70 %, 60%, 50%, 40% e 30%. A Figura 49 ilustra a curva de resposta do cristal, a qual não tem uma mudança notável causada pela mudança de valores do *duty cycle*.

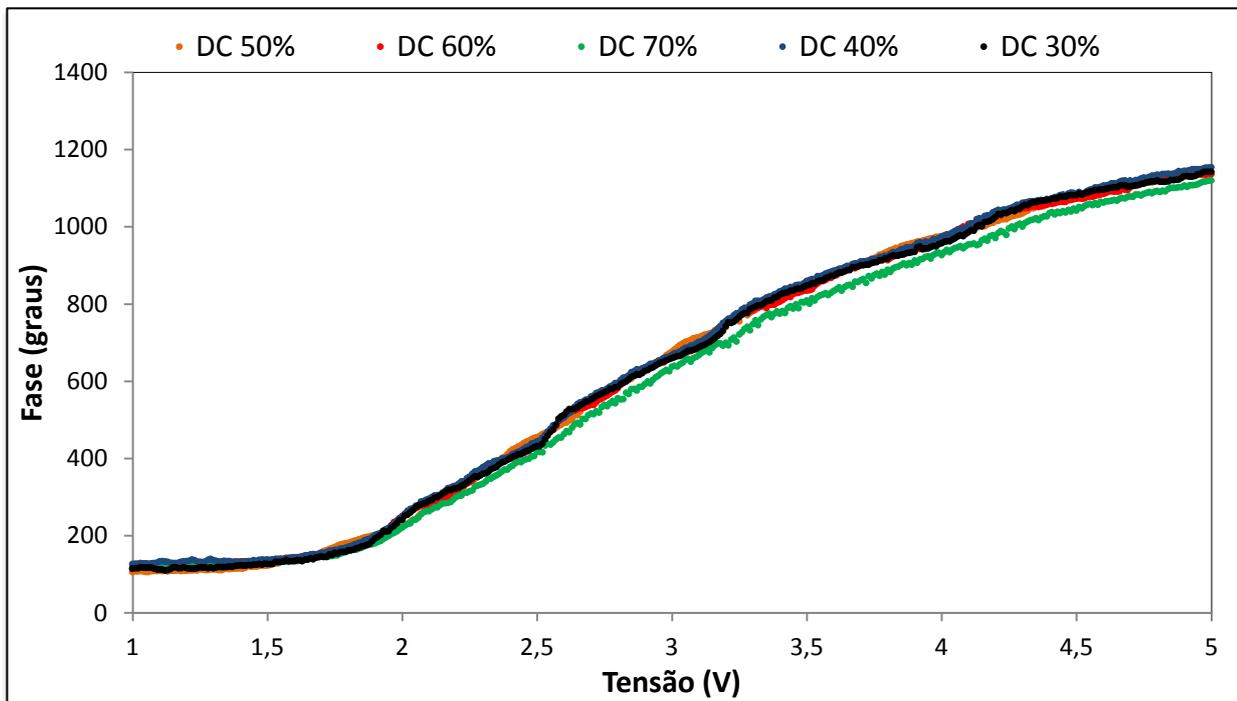
Visto que não existem diferenças significativas nos resultados apresentados em relação a frequência e ao *duty cycle*, os valores de frequência de 2 kHz e *duty cycle* de 50% foram os valores selecionados para se trabalhar como o LCVR.

Figura 48 - Gráfico Avaliação da Frequência LCVR.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 49 - Gráfico Avaliação *Duty Cycle* LCVR.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

### 5.1.4 Tempo de Resposta

Para realizar os ensaios referentes ao tempo de resposta dos deslocadores de fase, foram utilizados dois softwares independentes, um para adquirir as imagens e outro para controlar o sinal enviado aos deslocadores. A câmera foi configurada no modo manual, adquirindo imagens monocromáticas de 8 bits, resolução espacial de 640 pixels na direção horizontal e 480 pixels na direção vertical e taxa de aquisição de imagens de 30 Hz.

Para o ensaio utilizando o LCVR como deslocador de fase, um sinal em degrau foi acionado, com tensão baixa de 2,22 V e tensão alta de 2,42 V. Esse intervalo de tensões garante que o LCVR seja capaz de realizar um deslocamento na fase de 90°. Para o PZT, um sinal em degrau também foi utilizado para acionar o dispositivo, o intervalo de tensão que garantiu um deslocamento na fase de 90° se encontrou entre 50,1 V e 68,4 V. Detectaram-se esses intervalos ao obter as curvas características de resposta do dois elementos deslocadores de fase, já comentadas na seção 5.1.1.

Dentro de um intervalo de 5 s, 150 imagens eram adquiridas, garantindo assim tempo suficiente para estabilizar a resposta dos deslocadores de fase. Após ser obtido o conjunto de imagens, que continham franjas portadoras, as mesmas foram processadas utilizando o software MATLAB. Através da análise do nível de cinza de um ponto da imagem, foi possível verificar qual dispositivo realizava o deslocamento de fase de maneira mais rápida.

A Figura 50 ilustra o gráfico do tempo de resposta obtido com os dois deslocadores de fase. O PZT, representado pela linha azul do gráfico, mostra uma resposta mais rápida comparando-se ao LCVR, representado pela linha vermelha. O sinal de tensão é subitamente variado, originando assim a resposta dos elementos, a qual não é instantânea, mas segue as curvas representadas em linha cheia no gráfico.

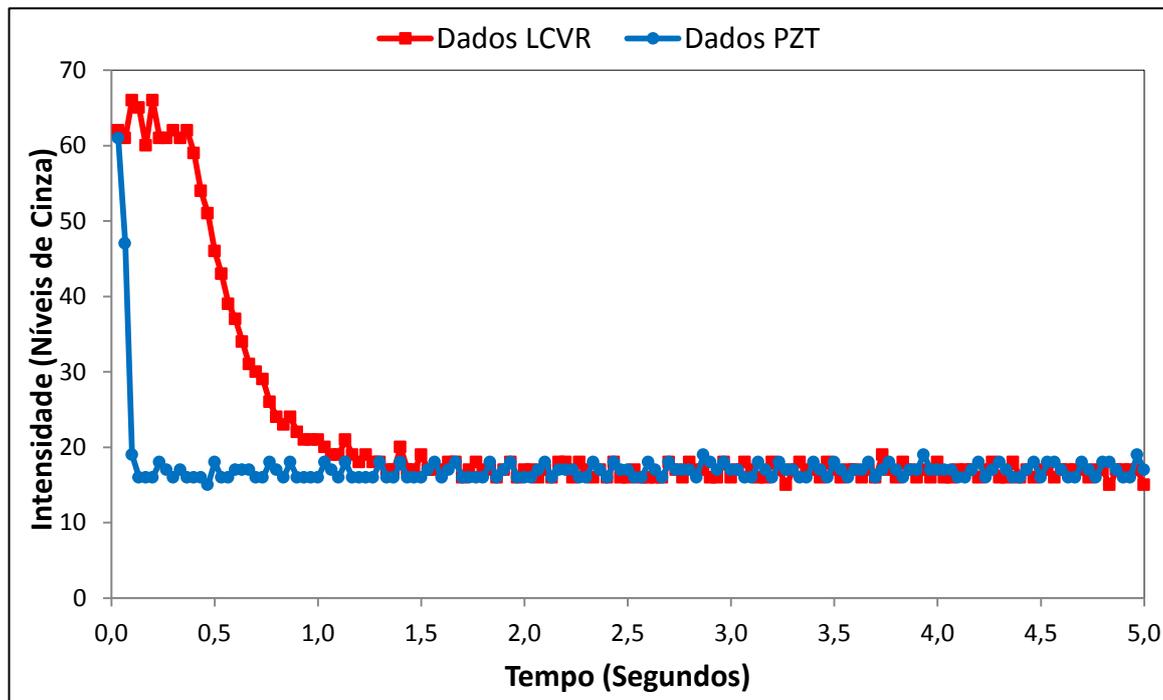
O tempo de aquisição de 5 imagens defasadas 90° entre si seria de 4,3 s para o LCVR utilizado e 1,1 s para o PZT. O tempo de resposta observado para um deslocamento de  $\pi/2$  foi de 0,86 s para o LCVR e 0,23 s para o PZT.

Em [61] são apresentados tempos de resposta para o LCVR de 1 ms no caso da utilização de tensões crescentes e 5 ms para tensões decrescentes, quando desloca-se 90°, utilizando uma célula de cristal líquido com birrefringência alta, de  $\Delta n=0,225$ , e camada de cristal com

espessura de 3  $\mu\text{m}$ . Isso poderia justificar os valores mais altos encontrados para este estudo, visto que o LCVR utilizado possui uma camada de cristal líquido de 14  $\mu\text{m}$ , mesmo tendo birrefringência alta, de 0,2627. Outro fator a se considerar é a faixa de tensão utilizada, aqui optou-se por uma faixa dentro do intervalo que apresentou melhor linearidade (2 à 3) V, porém, a célula de cristal líquido responde de maneira mais rápida se aplicado valores de tensão maiores.

Vários métodos para melhorar esses tempos de resposta do LCVR são encontrados na literatura, podendo se chegar a valores de 50  $\mu\text{s}$  em alguns casos, para cada  $90^\circ$  deslocados [62] [63] [64] [65].

Figura 50 - Avaliação do Tempo de Resposta dos Deslocadores de Fase.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

### 5.1.5 Avaliação da Incerteza na Medição da Diferença de Fase

O histograma é uma forma gráfica de representar uma contagem sendo útil para indicar o percentual de pixels que a imagem tem de um determinado nível de cinza.

O histograma da Figura 51 pode ser associado a uma distribuição normal, pois, as extremidades da figura tendem assintoticamente para zero. Assim sendo, é possível caracterizar tal distribuição através de um desvio padrão<sup>11</sup>. Uma distribuição com desvio padrão pequeno determina uma homogeneidade maior da imagem, diferentemente, se o desvio padrão se mostra grande a imagem será mais heterogênea, com uma maior variabilidade.

Um histograma pode pertencer a mais de uma imagem. Neste sentido realizaram-se ensaios com o PZT e o LCVR, obtendo conjuntos de cinco imagens, deslocadas de 90° entre si e geradas com cada um dos deslocadores de fase, para então obter os mapas de fase referentes a cada conjunto de imagens.

O histograma para avaliação da incerteza na medição da diferença de fase obtido utilizando o PZT e o LCVR foi gerado através dos seguintes passos:

1. Aquisição de dois conjuntos de cinco imagens, de um padrão de franjas de interferência, defasadas de 90° entre si e obtidas através do deslocamento de fase gerado com o PZT e o LCVR, em momentos distintos;
2. Processar cada conjunto de cinco imagens, a fim de obter o respectivo mapa de fase para cada dispositivo;
3. Deslocar a fase em um valor constante e repetir o passo 1;
4. Processar cada conjunto de cinco imagens, a fim de obter um segundo mapa de fase gerado com o PZT e um segundo mapa com o LCVR;
5. Obter a imagem resultante da diferença dos mapas de fase obtidos nos itens 2 e 4 para cada um dos dispositivos;
6. Processar os mapas de fase, obtendo-se a frequência com que cada nível de cinza aparece na mesma imagem e construir os respectivos histogramas.

Para obter as imagens necessárias, a câmera teve seus parâmetros configurados manualmente, buscando com isso diminuir uma eventual mudança nos tons de cinza que poderia ocasionalmente ocorrer se a

---

<sup>11</sup> Desvio padrão: em uma distribuição normal é uma medida do seu grau de dispersão.

câmera estivesse em um modo automático. A câmera foi configurada, para os dois deslocadores de fase, como segue:

1. Resolução: 640 pixels na horizontal x 480 pixels na vertical;
2. Taxa de aquisição de 15 Hz;
3. Imagem do tipo monocromática com 8 bits, o que indica que a imagem terá 256 níveis de cinza.

A Figura 51 ilustra os histogramas das diferenças de fase obtidos para o LCVR (linha vermelha) e para o PZT (linha azul). O histograma construído a partir dos dados de fase obtidos com o LCVR possui largura média mais estreita do que os obtidos com o PZT, o que significa menor dispersão dos dados. Para se calcular a incerteza dos dados, foram utilizados os valores de largura do histograma medidos a meia altura. Foram obtidos 10 níveis de cinza para a curva do LCVR e 12 níveis de cinza para a curva do PZT. A incerteza na medição da diferença de fase para ensaios utilizando o *laser* HeNe, da cor vermelha, com comprimento de onda igual a 632,8 nm é apresentada Tabela 3.

Tabela 3: Resultados da incerteza na medição da diferença de fase.

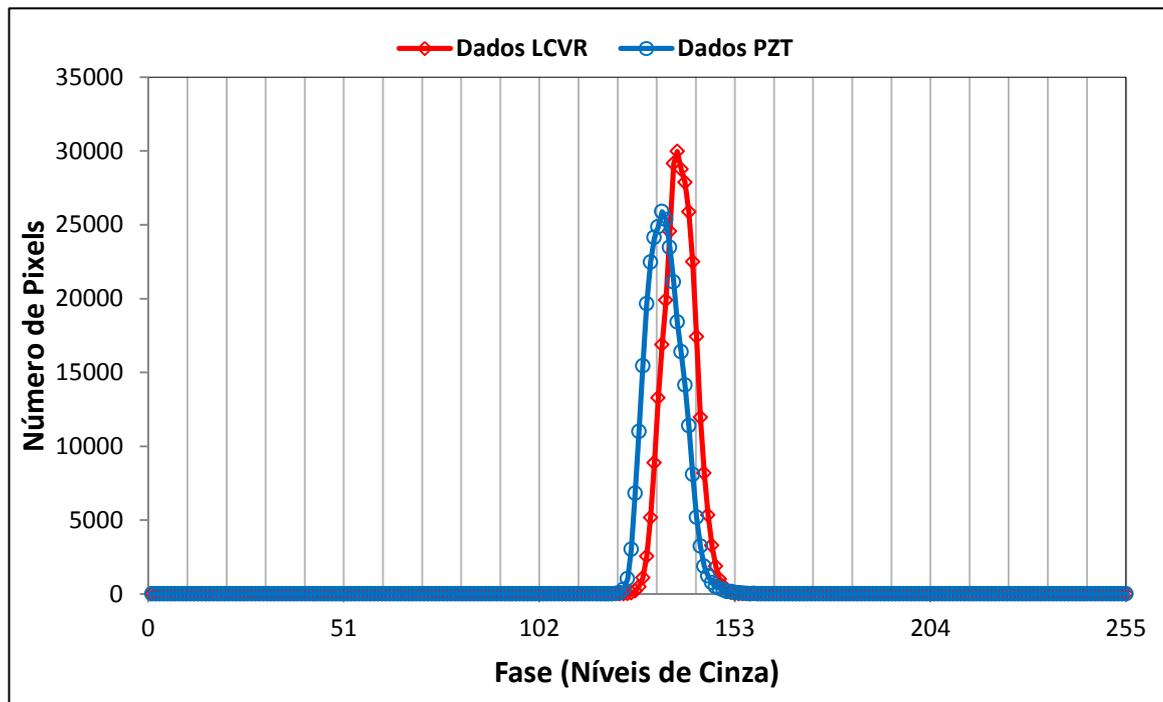
<i>Deslocador de Fase</i>	<i>Valor de Meia Largura</i>	<i>Incerteza na Medição</i>
LCVR	10	$\lambda/25$
PZT	12	$\lambda/21$

Elaborado pelo Autor.

Para chegar ao valor de  $\lambda/25$ , os 255 níveis de cinza da imagem foram divididos pelo desvio padrão de 10 níveis de cinza encontrados para o LCVR. Da mesma forma, para o PZT, os 255 níveis de cinza da imagem foram divididos pela dispersão da altura média do histograma, que corresponde há 12 níveis de cinza, sendo encontrado o valor de  $\lambda/21$ .

Em [32] e [33] são apresentados valores para a incerteza de medição de  $\lambda/25$  e  $\lambda/28$  para o PZT e o LCVR, respectivamente. O valor de meia largura em torno dos níveis de cinza encontrado nos mesmos trabalhos são de 9 níveis de cinza para o LCVR e 10 para o PZT. Os autores não especificam o modelo de PZT e LCVR utilizados.

Figura 51 - Histograma da diferença de fase entre dois mapas de fase obtidos com PZT e LCVR.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

### 5.1.6 Avaliação da Histerese

A histerese é a diferença indicada pelo instrumento de medição para um mesmo valor dentro do intervalo de medição quando o mensurando é variado nos sentidos crescente e decrescente. Para um deslocador de fase ideal esta característica deveria ser nula [32]. De acordo com os gráficos das Figura 52 e 53, o LCVR apresenta um efeito de histerese bem menos acentuado que o PZT. Alguns trabalhos já indicavam tal comportamento para o PZT [35] [32] [33].

A Figura 52 ilustra o gráfico de fase versus tensão para um ensaio utilizando o PZT para deslocar a fase, o intervalo utilizado para realizar o ensaio varia de (0 à 100) V, com incrementos de 0,1 V. A trajetória de ida (linha vermelha) e vinda (linha preta) forma um laço de histerese claramente visível. A histerese é um efeito que normalmente se manifesta em cristais piezelétricos. O erro de histerese máximo encontrado para o PZT, analisando toda faixa de tensões aplicada, foi de aproximadamente 154 nm, que equivale a 88°, para um comprimento de onda de 632,8 nm, correspondente a tensão de 29 V. Uma característica que pode ser observada visualmente no gráfico é que a faixa de tensões intermediária concentra erros maiores de histerese.

Interferômetros utilizados na shearografia e que utilizam o PZT para deslocar a fase envolvem peças móveis, como por exemplo, espelhos deslocados por atuadores piezelétricos. Esses espelhos são movimentados com o intuito de se provocar uma variação de fase constante na onda luminosa, se o sentido do movimento é invertido, a variação de fase poderá ser afetada pela histerese, dando origem a erros de medição.

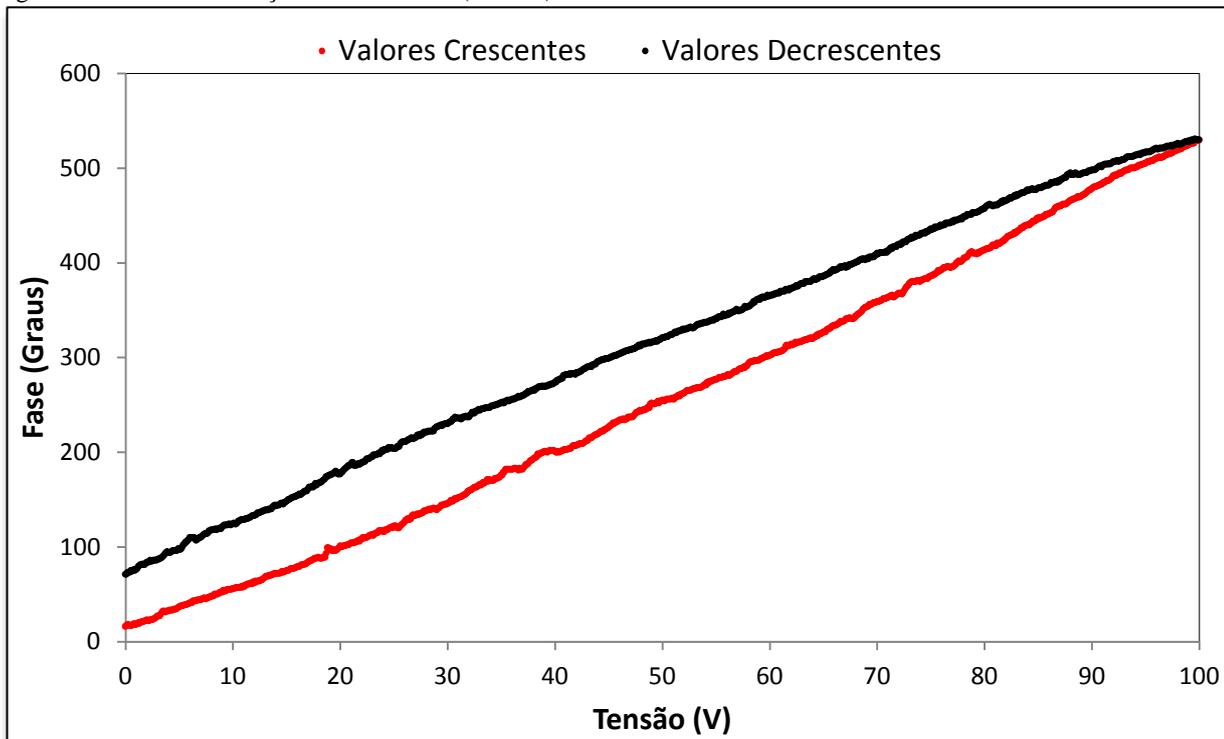
Medições aplicando valores crescentes e decrescentes de tensão também foram efetuadas utilizando o LCVR para deslocar a fase, a fim de identificar um possível comportamento de histerese no elemento. A Figura 53 apresenta o gráfico que ilustra o resultado obtido com o LCVR dentro do intervalo de tensões que vai de (1 à 10) V, com incremento de tensão de 10 mV.

É notável, ao analisar o gráfico, que o deslocador de fase de cristal líquido não apresenta um efeito de histerese tão acentuado quanto o PZT, o que é facilmente visualizado pelas trajetórias de ida (linha vermelha) e volta (linha preta), não formando o laço de histerese ilustrado na Figura 52.

Em termos quantitativos o erro máximo causado pela histerese e encontrado no LCVR foi de aproximadamente 32 nm, que equivale a 18°, para o mesmo comprimento de onda do PZT. Esse valor de

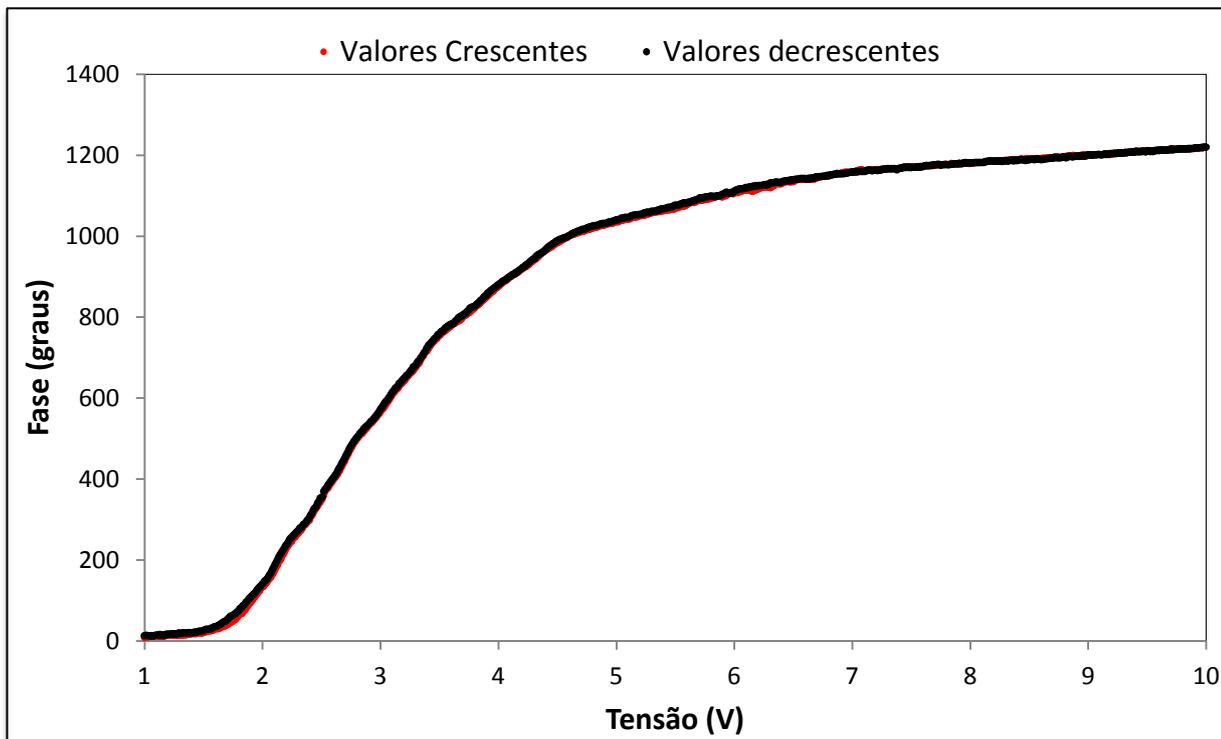
histerese corresponde a tensão de 1,83 V, sendo que para tensões maiores aplicadas a célula de cristal, este erro diminui para praticamente zero.

Figura 52 - Gráfico Avaliação Histerese PZT (0 à 100) V.



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 53 - Gráfico Avaliação Histerese LCVR (1 à 10) V.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

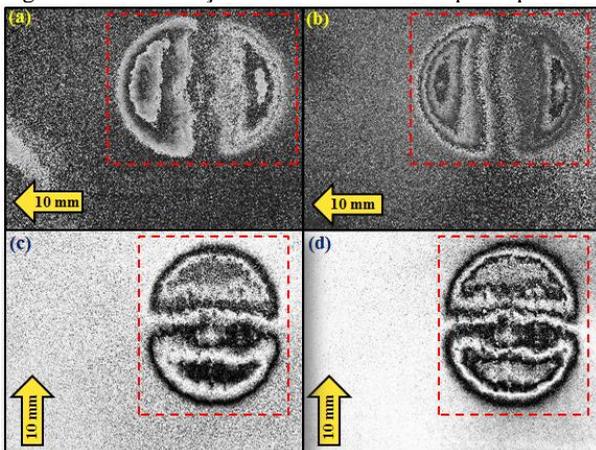
## 5.2 RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO

Tipicamente, os defeitos revelados com a utilização da técnica de shearografia, são representados por anomalias presentes no mapa de fase. Para defeitos de geometria simples, como, por exemplo, bolhas, o mesmo ilustrado na Figura 39, as imagens apresentam-se como dois lóbulos simétricos com eixo de simetria perpendicular à direção do deslocamento lateral. O padrão de franjas nesses casos é similar a uma borboleta.

As imagens da Figura 54 ilustram os mapas da diferença de fase obtidos com a técnica de shearografia, utilizando o PZT para gerar o deslocamento de fase. O defeito D1, apresentado na Figura 39, foi revelado no resfriamento do corpo de prova. O resultado da medição é destacado em vermelho, sendo que as franjas das imagens (a) e (b) correspondem à direção do deslocamento lateral na horizontal, para a esquerda. Já em (c) e (d) o deslocamento lateral foi realizado na direção vertical, para cima. Todos os deslocamentos laterais realizados foram de aproximadamente 10 mm.

O defeito possui bordas bem definidas e de fácil identificação, com baixo nível de ruído e bom contraste. As imagens (a) e (b) são repetições, o mesmo ocorre com (c) e (d).

Figura 54 - Verificação do defeito D1 do corpo de prova utilizando o PZT.

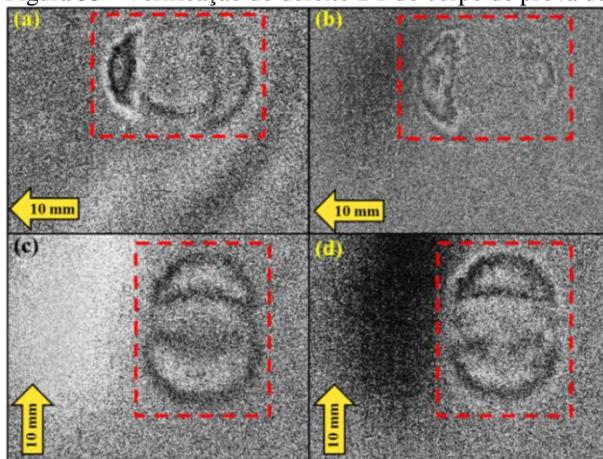


Fonte: Elaborado pelo Autor.

As imagens da Figura 55 ilustram os mapas da diferença de fase obtidos com a técnica de shearografia, utilizando o LCVR para gerar o

deslocamento de fase. O defeito D1, revelado no resfriamento do corpo de prova, pode ser melhor visualizado com deslocamento lateral realizado na vertical, sendo destacado em vermelho. Isto se deve porque o defeito deslocado lateralmente na vertical fica situado em uma região do plano da imagem onde a zona de interferência das duas imagens é mais nítida e com melhor contraste. Os deslocamentos laterais utilizados foram de 10 mm.

Figura 55 - Verificação do defeito D1 do corpo de prova utilizando o LCVR.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Comparando com as imagens obtidas utilizando o PZT, percebe-se um nível maior de ruído nas imagens obtidas utilizando o LCVR, além de um contraste menor, afetando o contorno do defeito e a nitidez das franjas. Mesmo com todas estas ressalvas, o defeito pode ser identificado.

Um dos motivos observados na diferença de qualidade das imagens é o fato, de ter-se utilizado para os ensaios com o LCVR um arranjo óptico com um maior número de componentes em relação ao arranjo óptico do PZT, ou seja, dois polarizadores, duas placas de quarto de onda, um divisor de feixe polarizado, além do próprio LCVR. Sabe-se que cada componente óptico utilizado contribui para perda de intensidade luminosa, e portanto, à necessidade de aumentar o *shutter* e ganho da câmera para aquisição de imagens com luminosidade comparável àquelas obtidas no arranjo com o PZT. Além da perda de intensidade, o arranjo óptico contendo o LCVR deve ser muito bem alinhado de forma que as duas componentes luminosas, provenientes do

divisor de feixes, possuam níveis médios de intensidade muito próximos. Uma diferença significativa nos níveis de intensidade luminosa entre as duas componentes compromete a qualidade da medição de fase. Sendo assim, a dificuldade no alinhamento desse segundo interferômetro pode ter causado “grande” perda de qualidade das imagens de fase.

Outra possível causa na diferença de qualidade das imagens pode ter sido o tempo de aquisição mais longo para o conjunto das imagens defasadas de  $90^\circ$  utilizando o LCVR. Nesse caso, ao se utilizar um carregamento térmico, a mudança de fase causada pelo resfriamento/aquecimento se adiciona aos deslocamentos de fase de  $90^\circ$  introduzindo erros significativos no cálculo de fase [30], degradando a qualidade do mapa final.

Com a finalidade de comparar o desempenho dos dois sistemas de deslocamento de fase de forma mais justa um novo ensaio, desta vez utilizando carregamento estático, foi realizado. Como as franjas não mudam entre as exposições quando o corpo de prova é carregado estaticamente, o mapa de fase não será prejudicado, eliminando o efeito causado pelo tempo de aquisição nesta análise.

Para o referido ensaio utilizou-se como corpo de prova uma montagem, a qual é ilustrada na Figura 56. Nela uma chapa de alumínio circular é engastada entre duas placas de aço, sofrendo um carregamento estático através do aperto de um parafuso micrométrico localizado na parte traseira da montagem.

Figura 56 - Chapa engastada para estudo de caso com shearografia.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

As bancadas montadas para os ensaios utilizando carregamento estático foram as mesmas ilustradas nas Figuras 37 e 38, anteriormente utilizadas nos ensaios com carregamento térmico, realizando o deslocamento de fase com o PZT e o LCVR, respectivamente. Da mesma forma, os interferômetros utilizados para realizar os ensaios com carregamento estático foram apresentados nas Figuras 35 e 36. O *laser* do tipo DPSS, *diode-pumped solid-state*, da marca Thorlabs, modelo DJ532-40, com potência típica de 40 mW e comprimento de onda de 532 nm foi utilizado em conjunto com um drive de controle da marca Thorlabs, modelo IP500, para efetuar a iluminação da superfície medida, da mesma forma que nos ensaios com o carregamento térmico.

O acréscimo dado, em comparação com ensaios anteriores, além do tipo de carregamento, foi a realização de medições com shearografia utilizando o interferômetro da Figura 35 sem o LCVR para deslocar fase, utilizando para isto o PZT. Espera-se assim uma comparação mais justa da qualidade das imagens obtidas utilizando o PZT e o LCVR para deslocar a fase, pois, os mesmos elementos compõe a configuração óptica.

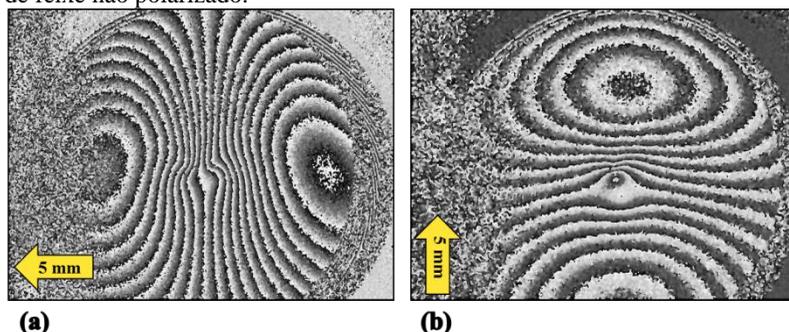
O procedimento realizado para obter os resultados da medição com shearografia utilizando carregamento estático foram:

1. Posicionamento do interferômetro de modo a obter uma imagem nítida da montagem com a chapa de alumínio;
2. Configuração apropriada dos parâmetros de imagem (Foco, Ganho, *Shutter*, Gama);
3. Configuração dos parâmetros do software;
4. Aquisição do primeiro conjunto de 5 imagens, defasadas de 90° entre si, que representam o estado não carregado da chapa de alumínio;
5. Aplicação do carregamento estático através do aperto de um parafuso micrométrico;
6. Aquisição automática do segundo conjunto de 5 imagens, do estado carregado e defasadas de 90° entre si;
7. Processamento das imagens, obtendo o mapa de fase de cada um dos conjuntos de 5 imagens;
8. Obtenção do resultado da medição através da diferença dos mapas de fase, antes e depois do carregamento;
9. Análise dos resultados e verificação da qualidade da imagem através de impressão visual.

A Figura 57 ilustra o resultado da medição com shearografia, quando utilizado o PZT para realizar o deslocamento de fase. Com as

imagens obtidas através da configuração óptica da Figura 36, que é composta de dois espelhos e um divisor de feixe não polarizado, foi possível observar a deformação gerada por um pequeno aperto do parafuso micrométrico contra a chapa engastada. Em (a) o deslocamento lateral de aproximadamente 5 mm foi realizado na direção horizontal, para a esquerda, gerando um padrão de franjas nítido, de fácil identificação, contendo uma pequena degradação da imagem perto da borda esquerda, devido a dificuldade de focalizar no plano da imagem toda a chapa metálica. Em (b) o deslocamento lateral, também de 5 mm, foi realizado na direção vertical, para cima, gerando também um resultado de fácil identificação. Nota-se em (b) que o carregamento foi ligeiramente menor que em (a), devido ao menor número de franjas observado na imagem. As duas imagens possuem um aspecto qualitativo muito próximo.

Figura 57 - Resultados da medição com shearografia utilizando PZT e divisor de feixe não polarizado.



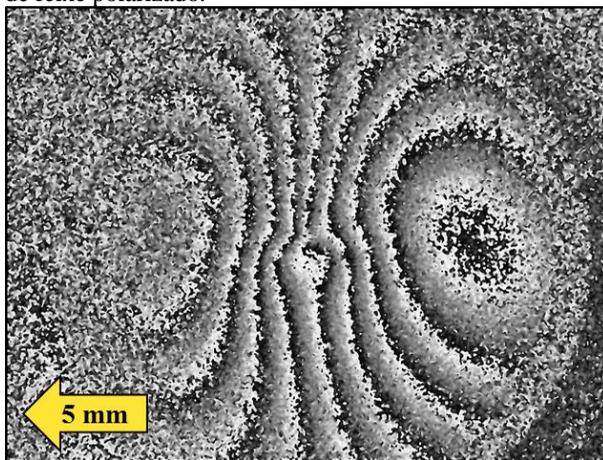
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na Figura 58 ilustra-se a imagem referente ao ensaio que utiliza também o PZT para deslocar a fase, porém, o mesmo foi acoplado ao espelho 1 da Figura 35. Para este ensaio o LCVR foi removido da referida configuração, já que possui a mesma função que o PZT, sendo mantidos os polarizadores, as placas de  $\frac{1}{4}$  de onda e o divisor de feixe polarizado. Optou-se pela realização de mais este ensaio com o PZT, a fim de efetuar uma comparação justa com o LCVR, devido a configuração utilizada possuir um número de componentes ópticos bem maior que a configuração que utiliza dois espelhos e um divisor de feixe não polarizado. Na imagem a deformação pode ser nitidamente percebida, porém, a qualidade em relação a imagem da Figura 57 é

inferior. Nota-se uma degradação mais acentuada do lado esquerdo da imagem, além da nitidez da imagem ter sofrido um ligeiro decréscimo.

O deslocamento lateral realizado na direção horizontal, para esquerda, foi de aproximadamente 5 mm. De forma geral nota-se que a adição de componentes na configuração óptica contribui para a degradação da imagem.

Figura 58 - Resultados da medição com shearografia utilizando PZT e divisor de feixe polarizado.



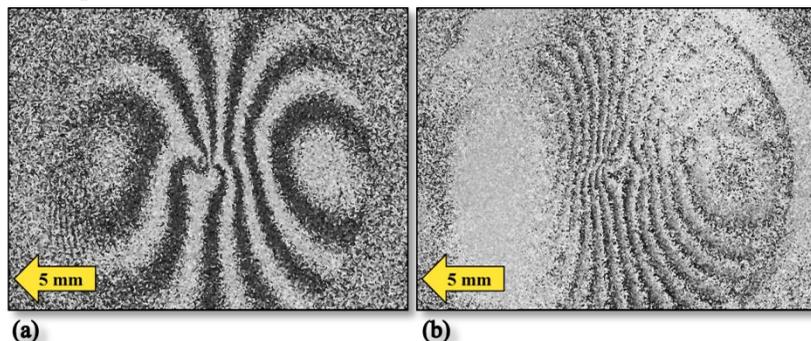
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na Figura 59 são ilustradas imagens referentes ao ensaio utilizando o LCVR para deslocar a fase. A configuração óptica utilizada é apresentada na Figura 35. Efetuou-se um deslocamento lateral horizontal, para a esquerda, de 5 mm, o mesmo utilizado no ensaio anterior. Em comparação com a imagem da Figura 58, a qual foi obtida utilizando a mesma configuração, porém utilizando o PZT para realizar o deslocamento de fase, na imagem (a) a qualidade do mapa de fase demonstra que existem problemas no deslocamento de fase, pois observa-se que o mapa de fase não apresenta o perfil dente de serra esperado. Já em (b) a imagem ilustra que existe modulação apenas no centro da imagem, isto devido a problemas de alinhamento, ou seja, as duas imagens que interferem possuem diferenças de intensidade nas laterais esquerda e direita, o que não gera interferência nestas regiões. Vale ressaltar também a dificuldade encontrada na realização dos ensaios utilizando o LCVR, os quais não mostraram repetibilidade,

obrigando assim a realizar-se várias tentativas até se chegar a resultados aceitáveis.

A principal dificuldade encontrada, quando utilizou-se o LCVR, foi o alinhamento dos eixos do LCVR com o eixo do divisor de feixe polarizado, utilizado na configuração óptica para dividir as imagens que passam pelo polarizador 1.

Figura 59 - Resultados da medição com shearografia utilizando LCVR e divisor de feixe polarizado.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

De modo geral, o PZT apresentou resultados melhores que o LCVR, apesar dos dois elementos serem capazes de efetuar a medição.

### 5.3 PROPOSTA DE OTIMIZAÇÃO

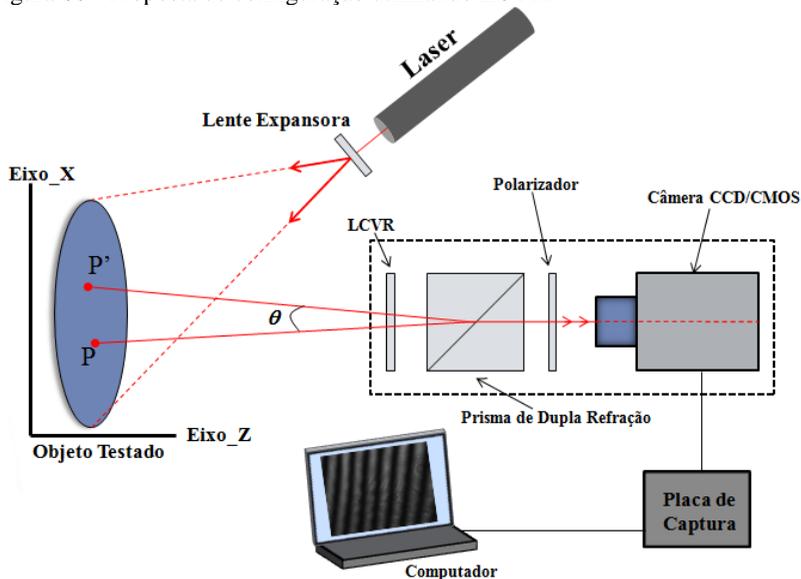
Com base em um estudo feito ao longo deste trabalho, uma proposta de otimização do sistema de shearografia foi criada utilizando o retardador variável de cristal líquido, a qual levou em conta alguns fatores, como por exemplo:

- Eliminação (ou redução) das partes móveis do interferômetro;
- Custo de implementação;
- Tempo (ou grau de complexidade) para implementar a configuração;
- Compactação do sistema de shearografia.

A Figura 60 ilustra o arranjo óptico alternativo proposto neste trabalho. O prisma de dupla refração, frequentemente denominado de prisma de Wollaston, é um elemento birrefringente especial capaz de separar os raios de luz que o atravessam nas componentes ordinária e extraordinária, ambas polarizadas linearmente, porém com planos de

polarização ortogonais. O polarizador, alinhado de maneira a formar  $45^\circ$  com os planos de polarização, é usado para formar o padrão de interferência. A figura permite observar que obtém-se um pequeno ângulo que separa os feixes de referência e de medição refletidos pelo corpo de prova. Este ângulo pequeno permite que a luz oriunda do laser e que ilumina dois pontos vizinhos  $P(x_P, y_P, Z_P)$  e  $P'(x_{P'}, y_{P'}, Z_{P'})$  do objeto seja combinada, interfira e forme uma imagem com padrão granular (*speckle*). Assim, duas imagens deslocadas lateralmente são registradas no plano da imagem da câmera formando uma zona de interferência. A direção e a intensidade com que as imagens são deslocadas afetam a sensibilidade do sistema de inspeção. O LCVR é utilizado para gerar o deslocamento de fase entre as componentes da luz ortogonalmente polarizadas, eliminando as partes móveis de uma configuração que utilizaria o PZT para deslocar a fase. Esta configuração permite o ajuste do deslocamento lateral por meio da rotação do prisma de dupla refração em torno do seu eixo, gerando assim um par de imagens lateralmente deslocadas do objeto investigado.

Figura 60 - Proposta de configuração utilizando LCVR.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Embora esta configuração seja conceitualmente viável, ela não foi experimentalmente avaliada no escopo deste trabalho, pois não se dispunha de um prisma de dupla refração apropriado.

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este capítulo apresenta as conclusões gerais do trabalho e algumas recomendações para trabalhos futuros.

### 6.1 CONCLUSÕES

Esta dissertação investigou o desempenho de um LCVR visando avaliar a possibilidade de substituir o PZT, até então utilizado como dispositivo para deslocar fase na configuração shearográfica presente no LABMETRO.

Para avaliar quantitativamente as principais características de cada deslocador de fase, uma bancada foi desenvolvida, ensaios foram realizados e informações pertinentes a estas características foram levantadas. Além disso, avaliou-se qualitativamente cada deslocador de fase, através de uma montagem de shearografia. Uma placa engastada foi deformada de maneira controlada através de um parafuso micrométrico e os resultados das imagens de diferença de fase foram analisadas. Também carregou-se termicamente um corpo de prova com defeitos conhecidos. Por fim, uma configuração óptica, que utiliza o LCVR para deslocar a fase foi proposta, mas não avaliada.

O tempo de resposta encontrado para o LCVR não se mostrou satisfatório, contrariando as expectativas iniciais do trabalho. Segundo a literatura, melhoramentos em torno do tempo de resposta do LCVR podem ser obtidos com o uso de materiais customizados, com alta birrefringência e camada mais fina de cristal. Temperaturas mais elevadas diminuem a viscosidade do material nemático e também contribuem para uma resposta mais rápida. Porém, como não se dispunha de outro LCVR com características mais apropriadas, não foi possível avaliar eventuais ganhos de desempenho.

Nos experimentos realizados, a linearidade do LCVR apresentou resultados melhores que o PZT, com o quadrado do coeficiente de correlação médio de  $R^2=0,9991$  para a faixa mais linear, entre (2 e 2,82) V, deslocando a fase em  $360^\circ$  neste intervalo. Já para o PZT, o quadrado do coeficiente de correlação médio foi de  $R^2=0,9967$ , ligeiramente inferior ao LCVR, também deslocando a fase de  $360^\circ$  no intervalo de tensão utilizado. O intervalo de tensões utilizado é bem superior ao LCVR, estando entre (10 e 79,6) V.

A histerese observada no PZT foi bem mais acentuada que no LCVR. O cristal líquido apresenta uma pequena histerese no intervalo de tensões entre (1 à 4) V, dirigindo-se para valores próximos a zero

com o aumento da tensão aplicada sobre a célula. O PZT é bem conhecido pela acentuada histerese que apresenta em toda a faixa de tensões aplicadas.

A incerteza na medição da diferença de fase avaliada através da dispersão do valor médio em torno dos níveis de cinza da imagem, mostrou-se menor para o LCVR, apresentando incerteza de medição de  $\lambda/25$ . O PZT apresentou um valor um pouco superior,  $\lambda/21$  quando avaliado nas mesmas condições.

Mudanças em características particulares do sinal enviado ao LCVR, como frequência e *duty cycle*, não mostraram influência significativa na curva característica de resposta do mesmo.

As avaliações realizadas com as configurações de shearografia em um corpo de prova contendo defeitos conhecidos permitiram observar algumas características. Utilizando carregamento térmico, foi possível visualizar os defeitos com as duas configurações, utilizando o PZT e utilizando o LCVR. Porém, a configuração que utilizou o PZT para deslocar a fase apresentou qualitativamente resultados melhores. As imagens obtidas com o PZT mostraram um contraste nas franjas de melhor qualidade, além de um nível de ruído menor, fazendo com que o defeito fosse mais claramente observado. A diferença nos resultados foi primeiramente atribuída ao tempo de resposta de cada deslocador. O LCVR possui um tempo maior de resposta e isso pode influenciar a qualidade dos mapas de fase, que nesse ensaio, foram calculados durante um carregamento dinâmico. Dessa forma, para que a comparação do desempenho dos dois deslocadores seja feita de forma justa, foram realizados novos ensaios com carregamento estático.

Nos ensaios utilizando carregamento estático, as imagens obtidas com o PZT para deslocar a fase também mostraram uma qualidade superior às imagens obtidas com o LCVR. A diferença na qualidade dos resultados obtidos com os dois deslocadores foi atribuída à dificuldade de alinhamento dos eixos lento e rápido do LCVR em relação aos eixos de polarização do divisor de feixe. Os desalinhamentos presentes na montagem produziram imagens de intensidade não uniformes, que quando combinadas não geram interferências visíveis nessas regiões.

A configuração óptica proposta reduz o número de componentes ópticos envolvidos, o que poderia facilitar o alinhamento do sistema, diminuir a perda de luz e conseqüentemente melhorar o contraste das franjas e o cálculo da diferença de fase.

Por fim, com base nos ensaios realizados foi possível chegar a algumas conclusões que são sintetizadas no quadro abaixo.

Características	PZT	LCVR
<b>Linearidade</b>	semelhante	semelhante
<b>Histerese</b>	acentuada	pouco perceptível
<b>Sensibilidade</b>	menor	maior
<b>Tempo de resposta</b>	mais rápido	mais lento
<b>Incerteza na Medição de Fase</b>	semelhante	semelhante
<b>Qualidade da Imagem Obtida</b>	melhor	pior

## 6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Várias limitações, de natureza diversa, impediram que o tema desenvolvido nesta dissertação fosse esgotado, tendo muito ainda por ser feito. Através dos resultados obtidos foram levantadas algumas sugestões para trabalhos futuros:

1. Desenvolver um software no qual seja possível, em conjunto, realizar a aquisição, o processamento e apresentar os resultados finais da medição shearográfica;
2. Adquirir um LCVR com características personalizadas, camada de cristal entre 3 e 7  $\mu\text{m}$ , birrefringência alta  $\Delta n > 0,22$  e baixa viscosidade, afim de se chegar a tempos de respostas próximos a 50  $\mu\text{s}$ , apresentados em alguns trabalhos;
3. Avaliar a viabilidade de reduzir o tempo de resposta a técnica de efeito nemático transiente (Do inglês: *transient nematic effect*), que tem sido reportada na literatura como forma de reduzir tempos de resposta [61] [62] [63] [64] [65] [66];
4. Avaliar o desempenho da configuração proposta neste trabalho;
5. Após otimizações em laboratório, desenvolver um sistema para shearografia onde seja possível avaliar o desempenho do LCVR em campo.



## REFERÊNCIAS

- [1] ALBERTAZZI, Armando. **Metrologia Óptica**. Notas de aula. Florianópolis: Laboratório de Metrologia e Automatização da UFSC.
- [2] HUNG, Yau Y.; TAYLOR, Charles E. **Speckle-Shearing Interferometric Camera--A Tool For Measurement Of Derivatives Of Surface-Displacement**. In: Annual Technical Symposium. International Society for Optics and Photonics, 1974. p. 169-176.
- [3] GERALDES, S.M.M.. **Desenvolvimento e construção de um sistema interferométrico *shear* baseado da *shearography speckle* para medição de deformações no plano**. 2008, 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial Ramo Engenharia Mecânica) – Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança, Portugal, 2008.
- [4] NOLL, V.. **Desenvolvimento de um sistema de controle digital para estabilização de imagens em holografia eletrônica**. 2006. 158 f. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis, 2006.
- [5] TRONCOSO, L. H. S.. **Sistema ativo de estabilização para medição com holografia eletrônica**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.
- [6] STEINCHEN, W.; YANG, L.. **Digital shearography: theory and application of digital speckle pattern shearing interferometry**. Vol. 100. Society of Photo Optical, 2003.
- [7] HUNG, Y.Y.; HO, H.P. **Shearography: An optical measurement technique and applications**. Materials Science and Engineering. A Review Journal, n.49, p. 61–87, 2005.
- [8] Aplicações da técnica de shearografia. Disponível em: <http://www.laserndt.com/index.htm>. Acesso em: 03 jul. 2013.

- [9] HUNG, Y. Y.. **Shearography: a new optical method for strain measurement and nondestructive testing.** Opt. Eng. 21 (3) (1982) 391–395.
- [10] HUNG, Y. Y.; HOVANESIAN, J. D.. **Fast detection of residual stresses in an industrial environment by thermoplastic-based shearography.** in: Proceedings of the 1990 SEM Spring Conference on Experimental Mechanics, Albuquerque, New Mexico, June 4–6, 1990, pp. 769–775.
- [11] HUNG, Y. Y.. **Nondestructive Evaluation by Electronic Shearography.** Presented at the 16<sup>th</sup> Symposium on Nondestructive Evaluation, San Antonio, Texas, April 21-23, 1987, also, Apparatus and Method for Electronic Analysis of Test Object. US Patent 4,887,899, 1989.
- [12] HECHT, E. **Óptica, 2. Ed.** Fundação Calouste Gulbenkian: Lisboa, 2002.
- [13] VELOSA, J. E. C.. **Controlo automático de um interferómetro para monitorização e caracterização de sensores interferométricos.** 2009. 158 p.
- [14] HARIHARAN, P. **Optical Interferometry** (Academic, Orlando, Fla., 1985).
- [15] GUENTHER, Robert D. **Encyclopedia of modern optics.** Elsevier, 2005.
- [16] HARIHARAN, P.. **Basics of Interferometry.** 1991: Academic Press.
- [17] SOUZA, João Paulo F. M. de. **Inspeção de Defeitos em Revestimentos de Materiais Compósitos Aplicados em Tanques Metálicos Utilizando Shearografia.** 2012. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis, 2012.
- [18] ALBERTAZZI, A. G. et al. **Detecção de Falhas de Adesão entre Mantas Poliméricas e Dutos usando Interferometria de Deslocamento Lateral.** In: CONGRESSO NACIONAL DE

ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS, 24, 2006, São Paulo. Anais. São Paulo, 2006.

- [19] SCHÖNTAG, J. M. **Caracterização da profundidade de defeitos em materiais compósitos utilizando shearografia com carregamento vibracional**. 2009, 107 f. Dissertação (Mestrado em Metrologia Científica e Industrial) – Curso de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Florianópolis, 2009.
- [20] WILLEMANN, D. P.; ALBERTAZZI, A. G.; MENICONI, L. C. **Um Sistema Prático para Identificação e Localização de Defeitos em Revestimentos de Materiais Compósitos utilizando Shearografia**. In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL SOBRE TECNOLOGIA DE EQUIPAMENTOS, 9, 2007, Salvador. Anais... Salvador, 2007.
- [21] HUNTLEY, M.Y.Y; SHANG, H.M; YANG, L. – **“Unified approach for holography and shearography in surface deformation measurement and nondestructive testing”** - Optical Engineering, Vol. 42 No. 5, May 2003.
- [22] SANTOS, L. M. dos. **Desenvolvimento de um Sensor de Fibra Óptica Embutido para a Medição de Deformação Lenta à Tração em Argamassa**. Florianópolis, 1999. 115p. Dissertação (Mestrado em Metrologia) – Curso de Pós Graduação em Metrologia Científica e Industrial. Universidade Federal de Santa Catarina.
- [23] MALACARA, D. **Optical Shop Testing**. John Wiley, New York (1992).
- [24] WILLEMANN, D. P. **Detecção de defeitos em juntas adesivadas de tubos compósitos com Shearografia, Termografia e Ultra-Som**. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS, 26, 2008, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2008.
- [25] INTERFERÔMETRO DE MICHELSON 1. Disponível em: <<http://www.ifsc.usp.br/~lavfis/InterMichel-1.htm>>. Acesso em: 24 set. 2013. [apostila].

- [26] YANG, L. X.; HUNG, Y. Y.. **Digital shearography for nondestructive evaluation and application in automotive and aerospace industries.** Proceedings of the 16 th WCNDT, Montreal, Canada, 2004.
- [27] KALMS, Michael; OSTEN, Wolfgang. **Mobile shearography system for the inspection of aircraft and automotive components.** Optical Engineering, v. 42, n. 5, p. 1188-1196, 2003.
- [28] HUNG, Y.Y.; DURELLI, A.J. **Simultaneous measurement of three displacement derivatives using a multiple image-shearing interferometric camera.** Journal of Strain Analysis for Engineering Design, v. 14, p. 81-88, 1979.
- [29] CREATH, K.. **Phase-measurement techniques for nondestructive testing.** In **Proceedings of SEM Conference on Hologram Interferometry and Speckle Metrology.** Baltimore, Maryland (pp. 473-478), 1990, November.
- [30] HARIHARAN, P., OREB, B. F., and EIJU, T.. **“Digital Phase-Shifting Interferometry: A Simple Error- Compensating Phase Calculation Algorithm,”** *Appl. Opt.* 26, 2504 (1987b).
- [31] GREIVENKAMP J. E.; BRUNING, J. H.. **“Phase shifting interferometry,”** . In: Optical Shop Testing, D. Malacara, ed. (Wiley, New York, 1992), Chap. 14.
- [32] SLANGEN, P.; GAUTIER, B.. **“Nematic liquid crystals light valve: application to phase shifting speckle interferometry”.** Proc SPIE Vol. 6616 Optical Measurement Systems for Industrial Inspection V, Gorecki Osten Eds. 2007.
- [33] SLANGEN, P.; GAUTIER, B.. **"Nematic liquid crystals light valve calibration and application to phase shifting speckle interferometry"**. Proc SPIE Vol. 6341 Speckle06, Slangen Cerruti Eds, 2006.
- [34] OCHOA, N. A.; HUNTLEY, J. M. (1998). **Convenient method for calibrating nonlinear phase modulators for use in phase-shifting interferometry.** Optical Engineering, 37(9), 2501-2505.

- [35] ROSSO, Vanessa et al. **Almost-common path interferometer using the separation of polarization states for digital phase-shifting shearography.** Spie, Liège, Belgica, v. 46, n. 10, p.1-8, 19 out. 2007.
- [36] HARIHARAN, P.. **Optical Interferometry, 2<sup>a</sup> Ed.** Academic Press, San Diego (2003). 368 p.
- [37] GOODWIN, Eric P.; WYANT, James C.. **Field guide to interferometric optical testing.** SPIE, 2006.
- [38] SCHWIDER, Johannes et al. **Digital wave-front measuring interferometry: some systematic error sources.** Applied optics, v. 22, n. 21, p. 3421-3432, 1983.
- [39] HARIHARAN, P.. "Digital Phase-Stepping Interferometry: Effects of Multiply Reflected Beams," Appl. Opt. 26 (13), 2506-2507 (1987b).
- [40] ROBINSON, David W. **Interferogram analysis: digital fringe pattern measurement techniques.** Taylor & Francis, 1993.
- [41] HAERTEL, Maryah E. M.. **Perfilômetro Óptico Externo para Dutos Expostos à Corrosão.** Florianópolis, 2009. 79p. Dissertação (Mestrado em Metrologia) – Curso de Pós Graduação em Metrologia Científica e Industrial. Universidade Federal de Santa Catarina.
- [42] HUNG, Michael Y. Y.; SHANG, Huai M.; YANG, Lianxiang.. **Unified approach for holography and shearography in surface deformation measurement and nondestructive testing.** Optical engineering, v. 42, n. 5, p. 1197-1207, 2003.
- [43] HECHT, Eugene; ZAJAC, A. **Optics 4th (International) Edition.** ISBN 0-321-18878-0, Addison Wesley publishing company, 2002.
- [44] BECHTOLD, Ivan H. **Cristais Líquidos: Um Sistema Complexo de Simples Aplicação.** Revista Brasileira de Ensino de Física, V.27, N.3, P.333 – 342. São Paulo, 2005.

- [45] JOCHUMA, L., HERREROA, P., COLLADOSA, M., MARTÍNEZA, V., RODRIGUEZB, J., LOPEZB, M.. **Liquid crystal optical retarders for IMAx to fly with SUNRISE**. In Proc. of SPIE Vol (Vol. 4843, p. 31), 2003.
- [46] GRAY, G.W.; WINSON, P.A.. **Liquid Crystals and Plastic Crystals** (Ellis Horwood Limited, New York, 1974), v. 1.
- [47] FRIEDEL, G.. **Ann. de Physique**. 18, 273 (1922).
- [48] PRIESTLEY, E. B.; WOJTOWICZ, Peter J. **Introduction to liquid crystals**. Plenum Publishing Corporation, 1975.
- [49] GENNES, P.G.; PROST, J.. “**The Physics of the Liquid Crystals**”. 2nd ed., Clarendon, Oxford, (1993).
- [50] FASES DOS CRISTAIS LÍQUIDOS. Disponível em: <<http://2012books.lardbucket.org/>>. Acesso em: 15 maio 2013.
- [51] MEADOWLARK OPTICS POLARIZATION SOLUTIONS. Disponível em: <<http://www.meadowlark.com/>>. Acesso em: 28 mar. 2013.
- [52] YANG, L. X.; HUNG, Y. Y.. **Digital shearography for nondestructive evaluation and application in automotive and aerospace industries**. Proceedings of the 16 th WCNDT, Montreal, Canada, 2004.
- [53] BALLATO, A. **Piezoelectricity: old effect, new thrusts**. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, New York, v. 42, n. 5, p. 916-926, 1995.
- [54] DROESCHER, Roberta E.. **Obtenção e Caracterização Microestrutural e Elétrica de Cerâmicas PZT-PMN**. 2009. 76 p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, UFRGS, Porto Alegre, 2009.
- [55] PHYSICS INSTRUMENTS. Disponível em: <<http://www.physikinstrumente.com>> Acesso em: 17 set. 2013.

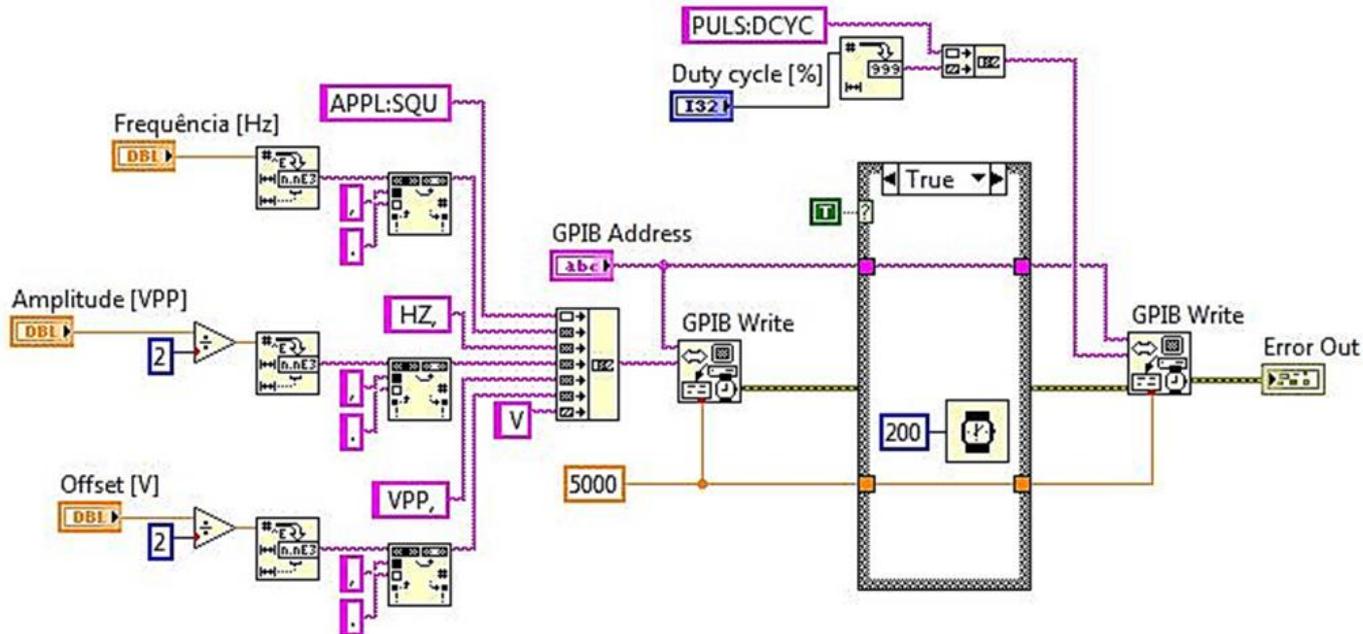
- [56] BENEDET, Mauro E.. **Desenvolvimento de um Sistema de Comunicação Através de Paredes Metálicas de Dutos**. 2011. 90 f. Qualificação (Doutorado) - Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis, 2011.
- [57] GALLEGO-JUAREZ, J. A.. **Piezoelectric ceramics and ultrasonic transducers**. *Journal of Physics e Scientific Instruments*, v. 22, n. 10, 1989. Disponível em:< [http://iopscience.iop.org/0022-3735/22/10/001/pdf/0022-3735\\_22\\_10\\_001.pdf](http://iopscience.iop.org/0022-3735/22/10/001/pdf/0022-3735_22_10_001.pdf)> Acesso em 07 abr. 2011.
- [58] SAMOHYL, Robert W.. **Controle Estatístico de Qualidade**. Florianópolis: Elsevier, 2009. 275 p.
- [59] SLANGEN, Pierre et al. **Digital speckle pattern interferometry (DSPI): a fast procedure to detect and measure vibration mode shapes**. *Optics and lasers in engineering*, v. 25, n. 4, p. 311-321, 1996.
- [60] ALBERTAZZI, Armando; SOUZA, André. **Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial**. Florianópolis: Manole, 2012. 408 p.
- [61] GILMAN, Scott E. et al. **Properties of tunable nematic liquid crystal retarders**. In: 33rd Annual Technical Symposium. International Society for Optics and Photonics, 1990. p. 461-471.
- [62] WU, Shin-Tson; EFRON, Uzi. **Optical properties of thin nematic liquid crystal cells**. *Applied physics letters*, v. 48, n. 10, p. 624-626, 1986.
- [63] WU, Shin-Tson. **Nematic liquid crystal modulator with response time less than 100  $\mu$ s at room temperature**. *Applied Physics Letters*, v. 57, n. 10, p. 986-988, 1990.
- [64] WU, Shin-Tson; WU, Chiung-Sheng. **High-speed liquid-crystal modulators using transient nematic effect**. *Journal of applied physics*, v. 65, n. 2, p. 527-532, 1989.

- [65] WU, Shin-Tson; WU, Chiung-Sheng. **Small angle relaxation of highly deformed nematic liquid crystals**. Applied physics letters, v. 53, n. 19, p. 1794-1796, 1988.
- [66] CHENG, HsienHui; BHOWMIK, Achintya; BOS, Philip J. **Fast-response liquid crystal variable optical retarder and multilevel attenuator**. Optical Engineering, v. 52, n. 10, p. 107105-107105, 2013.

## **APÊNDICE A – Instrumento Virtual para Comunicação entre Computador e Gerador de Funções**

Para acionar o retardador variável de cristal líquido utilizou-se um gerador de funções, que em conjunto com um programa desenvolvido em LabVIEW, possibilitou controlar as variáveis presentes no sinal de tensão enviado ao LCVR. A Figura 61 ilustra o diagrama de blocos do software desenvolvido.

Figura 61 - Instrumento Virtual desenvolvido para efetuar a comunicação entre gerador de funções e computador.



Fonte: Elaborado pelo Autor.