



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
CIÊNCIAS DA VIDA E DA NATUREZA
(ILACVN)**

ENGENHARIA FÍSICA

**PROTOTIPAGEM, MONTAGEM E TESTES DE UM DISPOSITIVO DE OBTENÇÃO
DE IMAGENS POR GRADES INTERFEROMÉTRICAS UTILIZANDO LUZ VISÍVEL**

JUDITH CALLE SUMI

Foz do Iguaçu
2025

**PROTOTIPAGEM, MONTAGEM E TESTES DE UM DISPOSITIVO DE OBTENÇÃO
DE IMAGENS POR GRADES INTERFEROMÉTRICAS UTILIZANDO LUZ VISÍVEL**

JUDITH CALLE SUMI

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Ciências da Vida e da Natureza, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Física.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Gonçalves Hönnicke

Coorientador: Prof. Dr. Edson Massayuki Kakuno

Foz do Iguaçu
2025

JUDITH CALLE SUMI

PROTOTIPAGEM, MONTAGEM E TESTES DE UM DISPOSITIVO DE OBTENÇÃO DE IMAGENS POR GRADES INTERFEROMÉTRICAS UTILIZANDO LUZ VISÍVEL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Ciências da Vida e da Natureza, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Física.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Gonçalves Hönnicke
UNILA

Prof. Dr. Rodrigo Leonardo de Oliveira Basso
UNILA

Prof. Dr. Johan Alexander Cortes Suarez
UNILA

Foz do Iguaçu, 10 de março de 2025.

*O que verdadeiramente somos
é aquilo que o impossível
cria em nós.*

(Clarice Lispector)

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Marcelo Honnicke, e ao meu coorientador, Edson Kakuno, pelo suporte e orientação ao longo deste trabalho. Suas contribuições foram essenciais para meu desenvolvimento acadêmico, e sou grata pela dedicação e pelos ensinamentos compartilhados nesta jornada.

À minha família, Norah e Raquel, expresso minha mais profunda gratidão. Seu apoio, confiança e incentivo foram fundamentais para que eu pudesse seguir em frente.

Agradeço aos meus grandes amigos Adel, Hussein e Eduardo, que tornaram esta etapa mais significativa. Obrigado pelas conversas, pelas risadas e pelo apoio incondicional em cada passo deste caminho. Vocês foram mais do que amigos; foram verdadeiros irmãos nessa caminhada.

Por fim, agradeço à UNILA que me acolheu e possibilitou a realização deste sonho, bem como a todos os professores, colegas e amigos que contribuíram para o meu crescimento pessoal e acadêmico de forma direta ou indireta.

A todos vocês, meu mais sincero obrigado.

*"A força não vem da capacidade física, mas de uma
vontade indomável."
Mahatma Gandhi*

RESUMO

Este trabalho desenvolve um sistema interferométrico do tipo Talbot–Lau para obtenção de imagens por contraste de fase, utilizando a técnica de passo de fase. A instrumentação proposta inclui um conjunto mecânico e eletrônico de baixo custo, controlado por um microcontrolador Arduino, que ajusta com precisão micrométrica o deslocamento das grades interferométricas e captura as imagens por meio de um sensor CMOS OV7670. Os experimentos analisam o padrão de interferência com e sem a presença da amostra, avaliando as variações provocadas pela interação do feixe com o objeto. O processamento digital das imagens em MATLAB identifica alterações no padrão interferométrico associadas às características estruturais da amostra, composta de um material plástico fino e transparente com relevos superficiais. Os resultados obtidos confirmam a viabilidade do sistema para extração do gradiente de fase. Além disso, a similaridade dos princípios físicos envolvidos permite adaptar o dispositivo para aplicações com raios X.

Palavras-chave: contraste de fase; interferometria baseada em grade; Talbot-Lau; sensor de imagem CMOS.

RESUMEN

Este trabajo desarrolla un sistema interferométrico del tipo Talbot–Lau para la obtención de imágenes por contraste de fase, utilizando la técnica de paso de fase. La instrumentación propuesta incluye un conjunto mecánico y electrónico de bajo costo, controlado por un microcontrolador Arduino, que ajusta con precisión micrométrica el desplazamiento de las rejillas interferométricas y captura las imágenes mediante un sensor CMOS OV7670. Los experimentos analizan el patrón de interferencia con y sin la presencia de la muestra, evaluando las variaciones provocadas por la interacción del haz con el objeto. El procesamiento digital de las imágenes en MATLAB identifica alteraciones en el patrón interferométrico asociadas a las características estructurales de la muestra, compuesta de un material plástico fino y transparente con relieves superficiales. Los resultados obtenidos confirman la viabilidad del sistema para la extracción del gradiente de fase. Además, la similitud de los principios físicos involucrados permite adaptar el dispositivo para aplicaciones con rayos X.

Palabras clave: contraste de fase; interferometría basada en rejilla; Talbot–Lau; sensor de imagen CMOS.

ABSTRACT

This work develops a Talbot–Lau interferometric system for phase-contrast imaging using the phase-stepping technique. The proposed instrumentation includes a low-cost mechanical and electronic setup, controlled by an Arduino microcontroller, which enables micrometric precision in adjusting the displacement of the interferometric gratings and captures images using a CMOS OV7670 sensor. The experiments analyze the interference pattern with and without the presence of the sample, evaluating the variations caused by the interaction of the beam with the object. The digital processing of the images in MATLAB identifies alterations in the interferometric pattern associated with the structural characteristics of the sample, which consists of a thin, transparent plastic material with surface reliefs. The obtained results confirm the feasibility of the system for phase gradient extraction. Furthermore, the similarity of the physical principles involved allows the device to be adapted for X-ray applications.

Key words: phase contrast; grating-based interferometry; Talbot–Lau; CMOS image sensor

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.1 – Coerência temporal e espacial..... | 17 |
| Figura 2.2 – Regimes de difração..... | 18 |
| Figura 3.1 – Esquema do interferômetro Talbot-Lau de raios X..... | 25 |
| Figura 3.2 – Imagens adquiridas com interferômetro Talbot-Lau e técnica de passo de fase..... | 27 |
| Figura 3.3 – Esquema da configuração experimental iluminação de bordas..... | 29 |
| Figura 4.1 – Montagem experimental do interferômetro do tipo Talbot-Lau para obtenção de imagens por contraste de fase utilizando luz visível..... | 31 |
| Figura 4.2 – Peças do sistema interferométrico (Parte 1)..... | 33 |
| Figura 4.3 – Peças do sistema interferométrico (Parte 2)..... | 34 |
| Figura 4.4 – Esquema elétrico da fonte de iluminação..... | 35 |
| Figura 4.5 – Esquemático elétrico do sistema experimental..... | 38 |
| Figura 4.6 – Grades..... | 39 |
| Figura 4.7 – Dimensões das grades..... | 39 |
| Figura 4.8 – Imagens obtidas com o sistema interferométrico e processamento das imagens para obter o gradiente de fase do objeto..... | 41 |

SUMÁRIO

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO | 12 |
| CAPÍTULO 2: CONCEITOS FUNDAMENTAIS | 15 |
| 2.1 COERÊNCIA..... | 15 |
| 2.2 REGIMES DE DIFRAÇÃO E A INFLUÊNCIA DA DISTÂNCIA AO DETECTOR. | 17 |
| 2.3 EFEITO TALBOT E INTERFEROMETRIA DE GRADES..... | 18 |
| 2.4 LARGURA DE BANDA DE ENERGIA E CROMATICIDADE..... | 21 |
| CAPÍTULO 3: TÉCNICAS DE IMAGEM BASEADAS EM GRADES | 23 |
| 3.1 INTERFEROMETRIA DE TALBOT-LAU..... | 24 |
| 3.2 TÉCNICA DE PASSO DE FASE..... | 25 |
| 3.3 BUSCA DO FEIXE (BEAM-TRACKING) BASEADO EM PADRÃO DE INTERFERÊNCIA ALEATÓRIA (SPECKLE)..... | 27 |
| 3.4 ILUMINAÇÃO DE BORDAS (EDGE ILLUMINATION - CODED APERTURE)..... | 28 |
| CAPÍTULO 4: PROPOSTA DE EXPERIMENTO DE SISTEMA INTERFEROMÉTRICO | 31 |
| 4.1 PROTOTIPAGEM MECÂNICA..... | 32 |
| 4.2 FONTE DE LUZ..... | 34 |
| 4.3 PROTOTIPAGEM ELETRÔNICA..... | 35 |
| 4.3.1 Controle do Motor de Passo..... | 35 |
| 4.3.2 Prototipagem Eletrônica do Sistema de Aquisição de Imagens..... | 37 |
| 4.4 GRADES..... | 38 |
| 4.5 PROCESSAMENTO DAS IMAGENS E ANÁLISE..... | 39 |
| CAPÍTULO 5: CONSIDERAÇÕES FINAIS | 42 |
| REFERÊNCIAS | 43 |
| ANEXOS | 45 |
| ANEXO A – ROTINA PARA SELEÇÃO DA REGIÃO DE INTERESSE (ROI) E EXTRAÇÃO DO GRADIENTE DO PERFIL DE FASE UTILIZANDO MATLAB | 46 |

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

A formação de imagens por raios X é amplamente utilizada em áreas como medicina, ciência dos materiais e engenharia. No entanto, a técnica convencional baseada na absorção apresenta limitações na visualização de materiais compostos por elementos de baixo número atômico, como tecidos moles e polímeros. Isso ocorre porque pequenas diferenças de absorção entre materiais resultam em baixo contraste nas imagens obtidas. Estudos indicam que a radiografia convencional enfrenta dificuldades significativas na análise de tecidos biológicos moles e outros materiais fracamente absorventes, como compósitos e plásticos, o que reforça a necessidade de abordagens mais avançadas para a visualização dessas estruturas (PFEIFFER, 2006), (WEITKAMP et al., 2004), (DAVIS et al., 1995).

Entre as alternativas disponíveis, os sistemas baseados em grades destacam-se como uma abordagem particularmente promissora. Eles permitem a obtenção de imagens por contraste de fase utilizando fontes convencionais de raios X, superando limitações relacionadas ao uso de fontes síncrotron de alta intensidade (OLIVO; SPELLER, 2007), (THÜRING et al., 2014). A interferometria do tipo Talbot–Lau, em especial, tem se mostrado eficaz em contextos clínicos, como no diagnóstico de artrite reumatoide e câncer de mama, mesmo quando são empregadas fontes de raios X de foco convencional ((PFEIFFER, 2006), (THÜRING et al., 2014), (WEITKAMP et al., 2004), (WILKINS et al., 1996), (MOMOSE, 2005), (MOMOSE et al., 2003), (MOMOSE et al., 2014)). Esse avanço evidencia o potencial da tecnologia para migrar de ambientes de pesquisa para aplicações práticas em hospitais e outras instituições de saúde (MOMOSE et al., 2014).

Embora essas técnicas sejam consolidadas na faixa dos raios X, é importante destacar que muitos dos princípios subjacentes ao contraste de fase e à interferometria de grades foram inicialmente estudados e aplicados na região da luz visível (CHABIOR et al., 2011). O efeito de Talbot e a interferometria associada, por exemplo, têm sido amplamente explorados com luz visível, especialmente em aplicações de sensoriamento de frentes de onda (MOMOSE et al., 2003). Essa familiaridade na região visível permite a adaptação das técnicas desenvolvidas para diferentes faixas do espectro eletromagnético. A maior flexibilidade oferecida pela

óptica na região visível, aliada à segurança proporcionada pelo uso de radiação não ionizante, torna essa faixa do espectro ideal para testes, prototipagem e desenvolvimento de dispositivos interferométricos (MOMOSE, 2005).

Nesse contexto, o presente trabalho explora a utilização de metodologias geralmente aplicadas na obtenção de imagens por contraste de fase com raios X, adaptando-as para experimentos com luz visível. Essa abordagem não só proporciona um ambiente de pesquisa mais seguro e acessível, como também favorece a compreensão dos princípios físicos e instrumentais envolvidos na formação de imagens sensíveis à fase.

A estrutura deste trabalho está organizada da seguinte forma:

O Capítulo 2 apresenta os conceitos essenciais para a compreensão da técnica empregada, abordando tópicos como coerência, regimes de difração, influência da distância ao detector, largura de banda de energia e cromaticidade, efeito Talbot e interferometria de grades. Esses fundamentos fornecem a base teórica para o entendimento dos fenômenos físicos envolvidos na formação das imagens interferométricas.

No Capítulo 3, são discutidas as principais técnicas de imagem baseadas em grades, incluindo interferometria de Talbot-Lau, técnica de passo de fase, rastreamento do feixe (*Beam Tracking*) baseado em padrões de interferência aleatória (*Speckle*) e iluminação de bordas (*Edge Illumination* com *Coded Aperture*). Essas abordagens são analisadas com foco na extração de informações de contraste de fase e sua potencial aplicação em diferentes contextos experimentais.

O Capítulo 4 descreve a proposta experimental, contemplando desde a prototipagem mecânica e eletrônica do sistema até a aquisição e processamento dos dados. São detalhados os componentes do experimento, incluindo a fonte de luz, o sensor de imagem, o motor de passo para controle do posicionamento das grades e os métodos utilizados para a análise das imagens capturadas.

Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho, discutindo os resultados obtidos e apontando possíveis perspectivas para o aprimoramento do sistema e futuras aplicações da técnica desenvolvida.

1.1 OBJETIVO GERAL

Prototipar, montar e testar de um dispositivo de obtenção de imagens por

grades interferométricas (interferômetro de Talbot-Lau), de baixo custo, utilizando luz visível, com o objetivo de compreender a instrumentação e o processo de coleta e tratamento de dados, exigidos pela técnica que vem amplamente sendo utilizada na faixa dos raios X.

1.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS

- Apresentar os princípios físicos do contraste de fase, ressaltando sua importância na detecção precisa de variações sutis e aplicações experimentais.
- Investigar a interferometria de grades, focando na conversão de variações de fase em sinais de intensidade e em seus fundamentos teóricos e operacionais.
- Projetar e construir um sistema experimental baseado na interferometria de Talbot-Lau com componentes de baixo custo e impressão 3D.
- Implementar um controle eletrônico para o deslocamento das grades, utilizando Arduino para garantir precisão e repetibilidade.
- Obter o gradiente do perfil de fase de uma amostra por meio da interferometria de Talbot-Lau e da técnica de passo de fase, analisando a viabilidade e limitações do método.
- Discutir os desafios na coleta e no processamento de dados experimentais, propondo soluções para as dificuldades enfrentadas.
- Apontar perspectivas futuras, visando o aprimoramento do sistema e a obtenção de imagens de contraste de fase em experimentos posteriores.

CAPÍTULO 2: CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Neste capítulo, abordaremos conceitos fundamentais para compreender as especificidades do dispositivo de obtenção de imagens por grades interferométricas, que propomos prototipar neste trabalho.

2.1 COERÊNCIA

A fase de uma onda luminosa descreve sua posição dentro do ciclo de oscilação e é um parâmetro fundamental para caracterizar sua propagação no espaço e no tempo. Esse conceito é essencial para a compreensão de fenômenos ópticos, como interferência e difração, nos quais a interação entre diferentes ondas dá origem a padrões característicos. A previsibilidade dessa interação depende do grau de coerência óptica, que quantifica a correlação entre as fases das ondas em diferentes pontos e momentos. Quando essa correlação é alta, a relação de fase se mantém estável, permitindo a formação de franjas de interferência bem definidas. Caso contrário, as oscilações tornam-se irregulares e os padrões de interferência perdem nitidez. (TERVO; SETÄLÄ; FRIBERG, 2012).

Para gerar contraste baseado em informações de fase, é necessário empregar um feixe de luz coerente, embora o grau de coerência não precise ser completo. A coerência óptica pode ser analisada em duas direções: ao longo do eixo óptico (coerência temporal ou longitudinal) e perpendicularmente a ele (coerência espacial ou transversal).

A coerência temporal está associada à estabilidade da fase de uma onda ao longo do tempo e está diretamente relacionada à monocromaticidade da fonte. Esse conceito pode ser ilustrado pela figura 2.1(a), onde duas ondas planas com comprimentos de onda ligeiramente distintos (λ e $\lambda - \Delta\lambda$), se propagam na mesma direção. No ponto P , ambas estão em fase, mas, conforme avançam, a diferença de frequência entre elas faz com que essa relação de fase se desfça progressivamente. O comprimento de coerência temporal l_t é a distância que a luz percorre antes que essas ondas fiquem completamente fora de fase e está relacionado à transformada de Fourier do espectro da fonte, sendo aproximadamente dado por:

$$l_t \approx \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} \quad (2.1)$$

Onde, λ é o comprimento de onda e $\Delta\lambda$ é variação de comprimentos de onda dentro do feixe, isto é a largura de banda espectral. Dessa forma, a coerência temporal aumenta à medida que a monocromatização do feixe melhora. Esse parâmetro é fundamental em experimentos interferométricos, pois determina a máxima diferença de caminho óptico entre dois feixes para que ainda seja possível observar padrões de interferência.

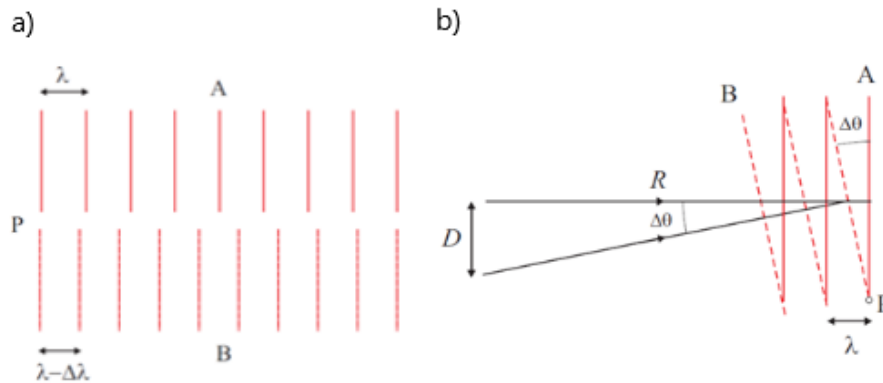
Por outro lado, a coerência espacial descreve a correlação de fase entre diferentes pontos de uma frente de onda. Esse conceito pode ser visualizado na Figura 2.1(b), onde duas ondas com o mesmo comprimento de onda λ se propagam em direções ligeiramente distintas, separadas por um pequeno ângulo $\Delta\theta$. No ponto P , suas frentes de onda coincidem, mas, à medida que se propagam, a diferença de trajetória entre elas causa um desalinhamento progressivo de fase. O comprimento de coerência espacial l_s é definido como a distância ao longo da frente de onda necessária para que esse desalinhamento se torne significativo e é um fator determinante na qualidade dos padrões de interferência. Esse comprimento afeta diretamente a resolução e o contraste em técnicas ópticas e de imagem. O grau de coerência espacial é determinado pela transformada de Fourier da distribuição de intensidade da fonte de luz, conforme o teorema de van Cittert-Zernike, e pode ser expresso por:

$$l_s \approx \frac{\lambda}{2\pi\Delta\theta} \quad (2.2)$$

Onde, $\Delta\theta$ representa o tamanho angular da fonte de luz. Esse ângulo surge porque as ondas se originam de pontos distintos de uma fonte estendida, separados por uma distância D , e se propagam até um ponto de observação P , localizado a uma distância R , resultando na relação: $\Delta\theta = \frac{D}{R}$.

Dessa forma, quanto menor for a extensão da fonte, maior será a coerência espacial (MOMOSE, 2005), (ALS-NIELSEN; MCMORROW, 2011).

Figura 2.1 – Coerência temporal e espacial. (a) Coerência temporal ou longitudinal. Duas ondas planas, com comprimentos de onda distintos, propagam-se na mesma direção com um deslocamento vertical. Após percorrerem uma distância l_s , correspondente ao comprimento de coerência longitudinal, a diferença de fase entre as ondas atinge π , resultando na perda de correlação entre elas. (b) Coerência espacial ou transversal. Duas ondas com o mesmo comprimento de onda são emitidas a partir das extremidades de uma fonte luminosa de altura finita D . Esse esquema representa a influência do tamanho da fonte na coerência espacial da luz emitida.



Fonte: ALS-NIELSEN; MCMORROW, 2011.

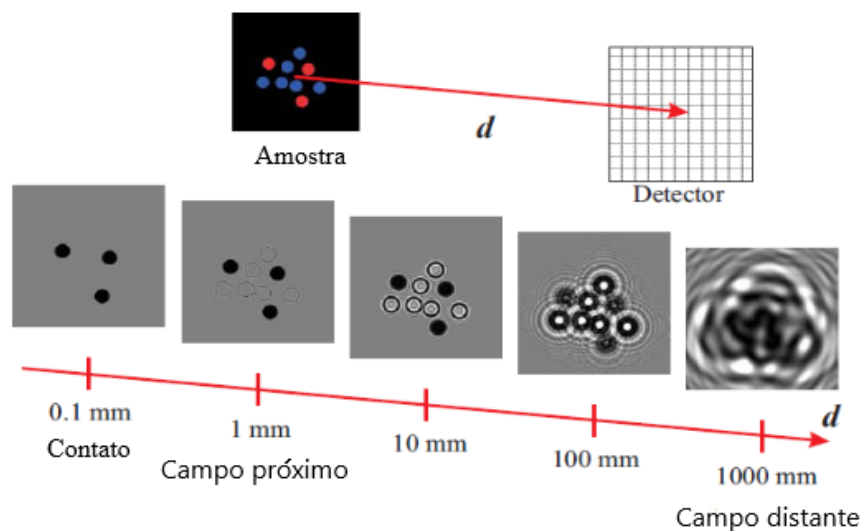
2.2 REGIMES DE DIFRAÇÃO E A INFLUÊNCIA DA DISTÂNCIA AO DETECTOR

A distância entre o objeto e o detector desempenha um papel essencial na formação de imagens com um feixe de luz, determinando o regime de difração predominante e o tipo de contraste observado. Dependendo dessa distância, podemos classificar a propagação das ondas espalhadas em três regimes principais: Fraunhofer (campo distante), Fresnel (campo próximo) e de contato.

No regime de Fraunhofer, ou campo distante, as ondas espalhadas podem ser aproximadas como ondas planas e a diferença de fase entre elas depende apenas do vetor de onda e da posição relativa dos pontos dispersores. Essa aproximação simplifica a análise da difração, tornando-se válida quando a distância do detector é muito maior que a^2/λ , onde a representa a separação entre os objetos (dispersores) e λ o comprimento de onda da luz utilizada. Já no regime de Fresnel, ou campo próximo, as ondas espalhadas ainda possuem curvatura significativa, e a diferença de fase deve ser determinada considerando a geometria exata da propagação. Esse regime ocorre quando a distância do detector é da ordem de a^2/λ . Aqui, o contraste da imagem passa a incluir efeitos de fase, tornando visíveis detalhes estruturais que não aparecem no regime de contato. E finalmente

no regime de contato, que ocorre para distâncias muito menores que a^2/λ , a interferência entre as ondas espalhadas torna-se desprezível e o contraste da imagem surge apenas das variações na absorção do material. Esse é o regime mais simples (ALS-NIELSEN; MCMORROW, 2011).

Figura 2.2 – Regimes de difração. Radiografias simuladas de um conjunto de discos microscópicos, realizada para uma onda plana monocromática de raios X com $\lambda = 1 \text{ \AA}$ e considerando tanto objetos puramente absorvedores (vermelho) quanto objetos que apenas introduzem deslocamento de fase (azul). À medida que a distância aumenta, observa-se a evolução do contraste da imagem, destacando efeitos de absorção no regime de contato, realce de bordas no campo próximo e padrões de interferência no campo distante.



Fonte: ALS-NIELSEN; MCMORROW, 2011.

2.3 EFEITO TALBOT E INTERFEROMETRIA DE GRADES

A interferometria Talbot baseia-se no efeito Talbot, descrito no século XIX, um fenômeno no qual objetos periódicos, como grades de transmissão, geram autoimagens quando iluminados por uma fonte de luz espacialmente coerente. Esse efeito é caracterizado pela formação e dissipação periódica da autoimagem da grade ao longo do eixo óptico, este fenômeno é entendido como difração de Fresnel pela grade. Para os raios X, o uso desse dispositivo foi demonstrado, por (David et al., 2002), (Momose et al.,2003) e (Weitkamp et al., 2005) (MOMOSE et al., 2003), (MOMOSE, 2005), (WEITKAMP et al., 2004), (ALS-NIELSEN; MCMORROW, 2011).

A função de transmissão $T(x)$ de uma grade pode ser expressa como

uma série de Fourier:

$$T(x) = \sum_n a_n \exp\left(i \frac{2\pi n x}{d}\right), \quad (2.3)$$

Onde, a_n são as amplitudes dos n -ésimos harmônicos e d é o período da grade. Quando uma onda plana de amplitude unitária incide sobre essa grade, o campo elétrico resultante na região posterior é dado por:

$$E(x, z) = \sum_n a_n \exp\left(-i \frac{\pi n^2 z \lambda}{d^2}\right) \exp\left(i \frac{2\pi n x}{d}\right) \quad (2.4)$$

Onde, λ é o comprimento de onda da radiação utilizada. O eixo óptico é paralelo ao eixo z , e a grade encontra-se no plano (x, y) com $z=0$. As ranhuras da grade são assumidas como paralelas ao eixo y .

Esse resultado mostra que $E(x, z)$ coincide com $T(x)$ quando z assume valores múltiplos de md^2/λ , onde m é um número inteiro par. Isso significa que imagens auto similares são formadas nessas distâncias, conhecidas como distâncias de Talbot. Se m for ímpar, a autoimagem aparece deslocada de $d/2$, ou seja, com um deslocamento lateral em relação à grade original.

Caso seja utilizada uma grade de fase, $T(x) = \exp(i\phi(x))$, as imagens auto similares não apresentam contraste nas distâncias de Talbot. No entanto, a modulação de fase é convertida em uma modulação de intensidade na posição $z = (m + 1/2)d^2/\lambda$, resultando no chamado efeito de Talbot fracionário z_T :

$$|E(x, z)|^2 = 1 + \sin[\phi(x) - \phi(x + d/2)] \quad (2.5)$$

Se a iluminação for uma onda não plana com fase $\phi(x, y)$, a Eq. 2.5 pode ser reescrita como:

$$E(x, y, z) = \sum_n a_n \exp\left(-i \frac{\pi n^2 z \lambda}{d^2}\right) \exp\left(i \frac{2\pi n}{d}(x - z\phi(x, y))\right) \quad (2.6)$$

Onde o termo de inclinação da frente de onda é dado por $\phi(x, y)$. Isso indica que as imagens auto similares sofrem deformações proporcionais a z , dependendo da curvatura da frente de onda.

Na interferometria de Talbot, coloca-se uma segunda grade (G2) a uma distância z_T em relação à primeira grade (G1). Se (G2) for ligeiramente inclinada por um pequeno ângulo θ , ocorre uma superposição entre a autoimagem de (G1) e o padrão da (G2), resultando no aparecimento de franjas de Moiré. O espaçamento das franjas é $\sim d/\theta$ quando a iluminação incidente é uma onda plana.

Se a frente de onda incidente apresentar curvatura devido a $\phi(x, y)$, as franjas de Moiré também se curvam. Esse deslocamento pode ser usado para estimar $\phi(x, y)$ por meio da relação:

$$\phi(x, y) \approx \frac{\xi(x, y)\theta}{z_T} \quad (2.7)$$

Onde, $\xi(x, y)$ representa o deslocamento das franjas na direção y .

O padrão de intensidade das franjas de Moiré pode ser expresso como:

$$I(x, y, z_T) = b_0 c_0 + 2 \sum_{n>0} b_n c_n \cos A(x, y, z_T) \quad (2.8)$$

Onde os coeficientes b_n e c_n representam os componentes harmônicos da autoimagem de (G1) e da transmissão de intensidade de (G2), respectivamente. A fase do padrão é dada por:

$$A(x, y, z_T) = \frac{2\pi n}{d}(y\theta + z_T\phi(x, y) + \chi) \quad (2.9)$$

Sendo χ o deslocamento entre as duas grades na direção x .

Verifica-se pela Eq. 2.5 que o contraste da autoimagem produzida por uma grade de fase é máximo quando a amplitude da modulação de fase espacial é $\pi/2$ (MOMOSE et al., 2003).

2.4 LARGURA DE BANDA DE ENERGIA E CROMATICIDADE

A eficiência da imagem por contraste de fase pode ser influenciada pela largura de banda do feixe incidente. A cromaticidade não é um requisito absoluto, mas a escolha da largura de banda impacta a visibilidade das franjas e a qualidade da imagem, especialmente em técnicas interferométricas (OLIVO et al., 2001), (WILKINS et al., 1996).

Na imagem de contraste de fase por propagação, a cromaticidade pode ser relaxada dentro de certos limites, sem perda significativa de contraste. A mudança de $\Delta\phi$ causada por uma variação do comprimento de onda $\Delta\lambda$ pode ser expressa como:

$$\Delta\phi \approx r_e \Delta\lambda \int \rho(x, y, z) dz \quad (2.10)$$

Onde, r_e é o raio clássico do elétron e $\rho(x, y, z)$ é a densidade eletrônica da amostra (DAVIS et al., 1995).

Para garantir um contraste adequado, assume-se uma condição semelhante à regra do quarto de onda de Rayleigh ($\Delta\phi < \frac{\pi}{2}$, o que impõe um limite para a largura de banda relativa aceitável:

$$\Delta\lambda = \frac{\pi}{2r_e t\rho} \quad (2.11)$$

Onde t é a espessura da amostra e ρ é uniforme (MOMOSE, 2005).

Quando se utiliza interferometria de grades, a cromaticidade torna-se mais crítica devido à dependência do sistema com a condição de Talbot. O contraste das franjas (C) varia sinusoidalmente com o comprimento de onda, aproximadamente como:

$$C \propto \sin\left(\frac{\pi\lambda d}{g_2^2}\right), \quad (2.12)$$

onde d é a distância de entre as grades e g_2 é o período da grade (G2).

A meia largura $\Delta\lambda = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2}$, (para ambos os lados do comprimento de onda de projeto λ_0), da faixa de energia efetiva do interferômetro pode ser expressa como:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_0}{2m-1} \quad (2.13)$$

Isso implica que, para ordens superiores de Talbot, a cromaticidade se torna mais restritiva. No entanto, mesmo para a quinta ordem de Talbot, a largura de banda relativa aceitável ainda é superior a 10% (WEITKAMP et al., 2005).

CAPÍTULO 3: TÉCNICAS DE IMAGEM BASEADAS EM GRADES

Grades desempenham um papel essencial nos sistemas baseados em contraste de fase. Elas modulam a frente de onda do feixe incidente, convertendo gradientes de fase em variações de intensidade mensuráveis. A periodicidade das grades g e a distância entre elas são projetadas para maximizar o contraste. A distância de Talbot (d_m) para o caso de uma onda plana iluminante, e dado por:

$$d_m = \left(m - \frac{1}{2}\right) \frac{g_1^2}{4\lambda}, \text{ com } m = 1, 2, 3, \dots \quad (3.1)$$

Onde g_1 e λ são a constante da grade de fase e o comprimento de onda, respectivamente. d_m é fundamental para o alinhamento e formação de padrões de interferência nítidos.

Para uma onda esférica proveniente de uma fonte a uma distância L do divisor de feixe, as distâncias são ajustadas de forma que o contraste máximo seja alcançado em:

$$d'_m = \frac{Ld_m}{L-d_m} \quad (3.2)$$

Se uma frente de onda deformada incidir sobre a grade (G1), o padrão gerado refletirá a deformação da frente de onda. Essa deformação, representada por deslocamentos locais das franjas d , pode ser calculada pela relação:

$$d = \frac{D\lambda}{2\pi} \frac{\partial\Phi}{\partial x} \quad (3.3)$$

Onde D é a distância entre a grade de fase (G1) e o plano de detecção, λ é o comprimento de onda, Φ é o perfil de fase da frente de onda incidente e x é a coordenada transversal perpendicular às linhas da grade.

Para que as franjas sejam claramente visíveis, o tamanho projetado da fonte na posição de observação não deve exceder um quarto do espaçamento entre

as franjas. Isso corresponde a um comprimento de coerência transversal mínimo na direção perpendicular às linhas da grade, dado por:

$$l_{coh} \geq mg_1, \quad (3.4)$$

Se o plano de detecção estiver localizado em uma das distâncias de Talbot d_m , conforme a Eq. 3.1 (ALS-NIELSEN; MCMORROW, 2011).

Para manter os requisitos de comprimento de coerência l_{coh} moderados, a periodicidade g_1 da grade de fase (G1) não deve exceder alguns micrômetros, isto também é necessário para manter a configuração experimental compacta (WEITKAMP et al., 2004).

3.1 INTERFEROMETRIA DE TALBOT-LAU

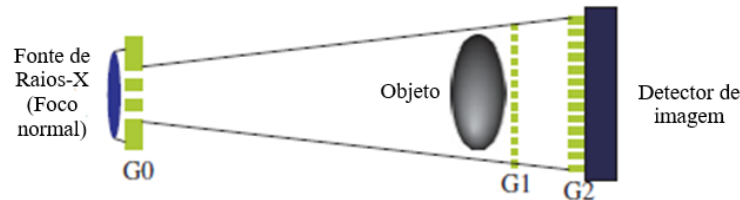
A interferometria Talbot-Lau, originalmente desenvolvida para luz visível, foi adaptada para raios X e feixe de nêutrons devido sua simplicidade de implementação e alinhamento quando comparada a outras técnicas interferométricas (GRÜNZE et al., 2019).

A configuração do interferômetro Talbot-Lau utiliza uma grade de fase (G1) e uma grade de absorção (G2) (Ver Figura 3.1). A (G1) atua como um divisor de feixe. Suas linhas apresentam absorção insignificante, mas provocam um deslocamento de fase substancial. Já a (G2) transforma o padrão de interferência gerado pela (G1) em sinais de intensidade detectáveis, funcionando como uma máscara de transmissão para os detectores (WEITKAMP et al., 2005).

Para o caso de fontes de baixa coerência, uma outra configuração, baseia-se em três grades. A grade fonte (G0), funciona como uma máscara absorvente com fendas transmissoras. Essa grade cria uma matriz de fontes que são individualmente coerentes. É fundamental garantir que a proporção γ_0 , definida como a razão entre a largura de cada linha fonte e o período da grade g_0 , seja suficientemente pequena para fornecer coerência espacial adequada à formação da imagem ((PFEIFFER, 2006), (WEITKAMP et al., 2005), (CHABIOR et al., 2011), (VITTORIA; ENDRIZZI; OLIVO, 2017)).

Figura 3.1 – Esquema do interferômetro Talbot-Lau de raios X.

O interferômetro Talbot-Lau de raios X permite o uso de um gerador de raios X de foco normal, comum em hospitais. Para preservar o contraste das franjas geradas pelas grades (G1) e (G2), uma grade de amplitude (G0) é adicionada ao sistema, filtrando parte dos raios X incidentes.



Fonte: MOMOSE et al., 2014

Para uma grade de fase com um deslocamento de fase de π iluminada por uma onda plana, a periodicidade g do padrão de franja é igual à metade do período de (G1).

A periodicidade da grade de absorção g_2 deve ser igual à periodicidade g das franjas de interferência não perturbadas. Para uma onda plana, $g_2 = \left(\frac{g_1}{2}\right)$. Para uma onda esférica com raio L , essa periodicidade se ajusta para $g_2 = \left(\frac{g_1}{2}\right) \times \frac{L}{L-d}$.

Pequenas variações em g_2 resultam em franjas Moiré nos interferogramas, mas esses efeitos podem ser eliminados ao subtrair a imagem de fase de fundo da imagem do objeto (WEITKAMP et al., 2004), (WEITKAMP et al., 2005).

3.2 TÉCNICA DE PASSO DE FASE

Em sistemas interferométricos, um detector de área posicionado no plano de detecção geralmente não possui resolução suficiente para resolver diretamente as franjas de interferência, tampouco para determinar com precisão menor que o tamanho do pixel sua posição. Para contornar essa limitação, uma grade de absorção (G2) é utilizada como analisador simplificando significativamente o arranjo experimental, tornando-o mais compacto e de fácil implementação. Se essa grade for escaneada ao longo da direção transversal, ao eixo óptico, x ao longo de um período completo, a intensidade registrada em cada pixel (i,j) do detector oscilará em

função da posição da grade x_g (ver Figura 3.2). A fase dessa oscilação, ϕ_{ij} , pode ser determinada a partir do primeiro componente de Fourier da oscilação de intensidade. Esse valor está diretamente relacionado ao deslocamento das franjas d_{ij} pela equação:

$$d_{ij} = \phi_{ij} \frac{g_2}{2\pi} \quad (3.5)$$

Onde o período da grade de absorção g_2 é aproximadamente $g_2 \approx g_1/2$.

A partir da relação (3.3), pode-se obter a primeira derivada do perfil de fase da frente de onda em cada pixel $\left(\frac{\partial\Phi}{\partial x}\right)_{ij}$, como uma função da fase de oscilação da intensidade ϕ_{ij} :

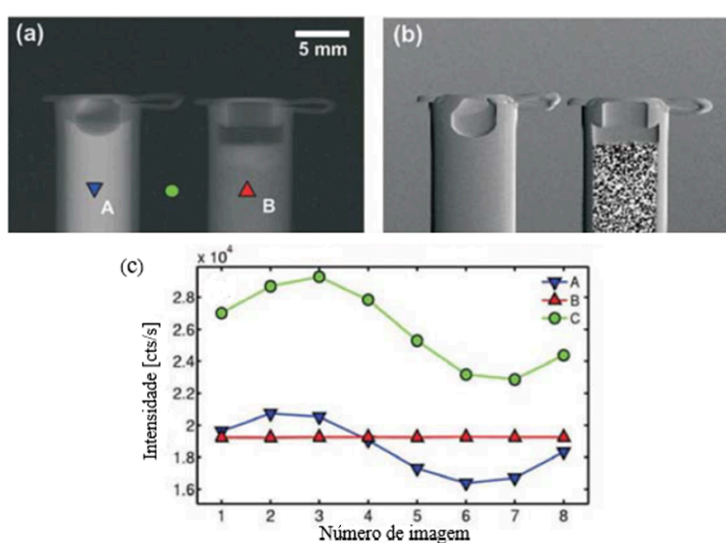
$$\left(\frac{\partial\Phi}{\partial x}\right)_{ij} = \frac{g_2}{\lambda D} \phi_{ij} \quad (3.6)$$

Onde, D é a distância entre (G1) e (G2) e λ o comprimento de onda da radiação utilizada. Essa equação é válida para objetos finos em geometria de feixe paralelo. É importante destacar que a fase de oscilação da intensidade ϕ_{ij} não contém contribuições do perfil de amplitude da onda, ou seja, não inclui informações sobre o contraste de absorção (WEITKAMP et al., 2004), (WEITKAMP et al., 2005), (CHABIOR et al., 2011).

O perfil de fase Φ da frente de onda pode ser recuperado a partir de ϕ por uma simples integração unidimensional ao longo da direção perpendicular às linhas da grade. Desde que os gradientes de fase na amostra não sejam muito íngremes, a primeira derivada da Φ não excederá π (WEITKAMP et al., 2005).

No caso mais geral, em que a frente de onda incidente no objeto já apresenta distorções, é necessário determinar a distribuição de fase de fundo $\phi_{back}(x, y)$ antes da inserção da amostra. Isso pode ser feito medindo a fase sem o objeto no feixe e posteriormente subtraindo essa contribuição dos dados obtidos com a amostra (WEITKAMP et al., 2004), (WEITKAMP et al., 2005).

Figura 3.2 – Imagens adquiridas com interferômetro Talbot-Lau e técnica de passo de fase. (a) Imagem convencional por transmissão de raios X, onde o contraste se baseia na absorção, dificultando a distinção entre os materiais. (b) Imagem por contraste de fase diferencial, evidenciando variações na fase do feixe transmitido. A estrutura granular do açúcar em pó (B) provoca forte espalhamento, resultando em uma distribuição aleatória de pixels pretos e brancos devido à perda de visibilidade das franjas. Já a água (A) apresenta transições mais suaves, indicando menor dispersão. (c) Oscilações de intensidade registradas nos pixels do detector em três regiões distintas da amostra, obtidas a partir de oito imagens adquiridas para diferentes posições transversais da grade (G2) em relação à (G1). Esse deslocamento permite mapear a modulação das franjas e reconstruir as variações de fase no feixe. As curvas correspondem a diferentes interações do feixe com os materiais. Curva verde: Amplitude constante, pois o feixe não interage com nenhum material. Curva azul: Amplitude reduzida devido à passagem pelo fluido (água), que atenua parcialmente a modulação das franjas. Curva vermelha: Representa uma linha reta, pois o açúcar em pó dispersa fortemente a luz, tornando a intensidade transmitida uniforme e eliminando a oscilação.



Fonte: ALS-NIELSEN; MCMORROW, 2011.

3.3 BUSCA DO FEIXE (BEAM-TRACKING) BASEADO EM PADRÃO DE INTERFERÊNCIA ALEATÓRIA (SPECKLE)

A técnica de acompanhamento do feixe (*Beam-Tracking*) baseado em padrão de interferência aleatória (*speckle*) é um método avançado de imagem por contraste de fase que se baseia na análise dos deslocamentos de padrões de interferência aleatórios (*speckle*), que são formados quando um feixe de luz atravessa uma superfície rugosa ou uma superfície com padrão bem definido. A interação do feixe com a amostra provoca variações nesses padrões, permitindo reconstruir detalhes estruturais do material analisado.

O princípio de funcionamento do *Beam-Tracking* consiste em quatro

etapas principais. Primeiro, o feixe de luz passa por uma superfície rugosa ou uma grade, gerando um padrão de interferência. Em seguida, esse feixe atravessa a amostra, sofrendo pequenas alterações em sua direção devido a diferentes processos de interação. A seguir, um detector de alta resolução captura a imagem do padrão de interferência modificado. Por fim, algoritmos de processamento de imagem analisam os deslocamentos dos padrões antes e depois da interação com a amostra, permitindo a extração de informações detalhadas sobre sua estrutura (VITTORIA; ENDRIZZI; OLIVO, 2017).

3.4 ILUMINAÇÃO DE BORDAS (EDGE ILLUMINATION - CODED APERTURE)

A técnica iluminação de bordas surgiu como uma solução inovadora para superar limitações de métodos interferométricos de contraste de fase baseados em fontes convencionais de raios X. Esses métodos, embora promissores, enfrentam desafios como divergência angular do feixe e aumento significativo do tempo de exposição. Inspirada em experimentos realizados com radiação síncrotron, essa técnica demonstrou que a sensibilidade à fase pode ser ampliada ao iluminar seletivamente as bordas dos pixels do detector.

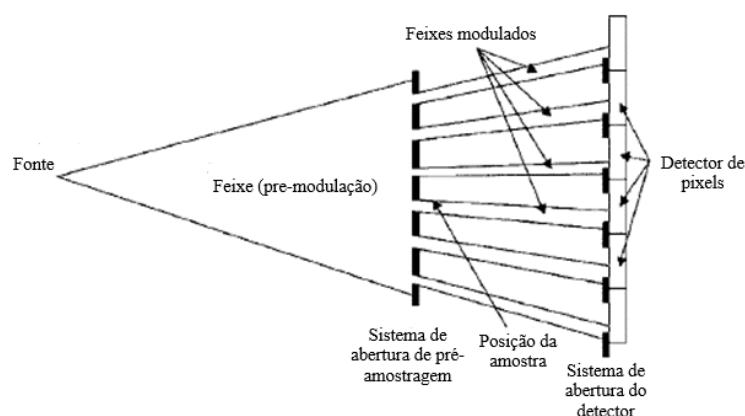
Ao adotar essa abordagem, pequenas variações na frente de onda causadas pela amostra resultam no deslocamento de fótons para dentro ou para fora da área ativa do pixel. Esse efeito gera picos negativos e positivos no sinal adquirido, permitindo a amplificação do contraste sem necessidade de óptica complexa.

Nos experimentos iniciais com radiação síncrotron, a técnica foi facilitada pelo uso de um feixe laminar paralelo e um detector linear. Para adaptar essa configuração a fontes convencionais de raios X, é projetado um conjunto de máscaras codificadas que modulam a distribuição do feixe, garantindo sua aplicação em feixes divergentes e policromáticos.

O sistema é composto por dois conjuntos de máscaras perfuradas: A máscara do detector, a qual gera regiões insensíveis entre pixels adjacentes, garantindo que apenas os fótons que sofreram deslocamentos detectáveis contribuam para o contraste da imagem. Essa máscara pode ser alinhada com o

detector ou diretamente laminada em sua superfície. E a máscara da amostra, que é posicionada imediatamente antes da amostra, criando múltiplos subfeixes que atingem as bordas dos pixels definidos pela máscara do detector. Esse arranjo elimina a necessidade de varredura da amostra, permitindo aquisição direta de imagens bidimensionais (OLIVO; SPELLER, 2007).

Figura 3.3 – Esquema da configuração experimental iluminação de bordas (não em escala). O feixe gerado pela fonte é subdividido em múltiplos feixes individuais pela máscara da amostra. Cada um desses feixes incide na borda da área sensível de um pixel do detector, conforme definido pela máscara do detector. As distâncias entre a fonte e a máscara da amostra, e entre a máscara da amostra e o detector, eram de 1,6 m e 0,4 m, respectivamente. As aberturas das fendas em ambas as máscaras possuíam 50 μm de largura, com passos de 203 μm na máscara da amostra e 254 μm na máscara do detector.



Fonte: OLIVO; SPELLER, 2007.

A técnica melhora significativamente a eficiência do contraste de fase ao manter um tempo de exposição reduzido, minimizando exposição desnecessária ao direcionar o feixe apenas para regiões relevantes da amostra. Assumindo um fator de preenchimento de 50% para a máscara da amostra, o tempo de exposição aumenta apenas duas vezes em relação a um sistema convencional, uma melhoria significativa quando comparada a outras técnicas, onde esse aumento pode ser de uma ordem de grandeza ou mais. Assim também apresenta menor sensibilidade a vibrações, tornando-a ideal para aplicações clínicas e industriais além de possibilitar a medição simultaneamente da absorção, contraste de fase e campo escuro, permitindo uma análise mais detalhada das propriedades estruturais das amostras.

Além disso, estudos demonstraram que a intensidade do sinal de contraste de fase pode ser aumentada ao reduzir a fração de pixels iluminada

diretamente pelo feixe de raios X. No entanto, a difusão do sinal entre pixels adjacentes pode influenciar sua intensidade e forma, sendo um fator a ser considerado no processamento da imagem (OLIVO; SPELLER, 2007).

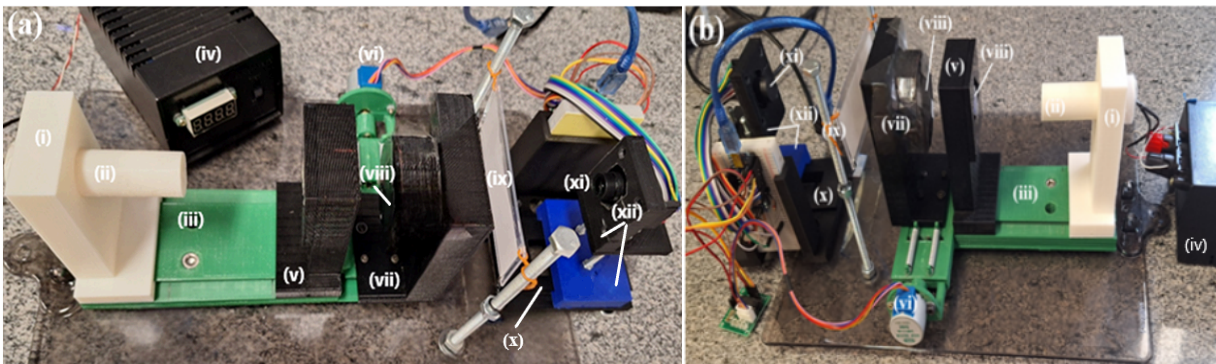
CAPÍTULO 4: PROPOSTA DE EXPERIMENTO DE SISTEMA INTERFEROMÉTRICO

Esta seção descreve a construção e a validação experimental de um sistema de obtenção de imagens por contraste de fase utilizando grades interferométricas e luz visível. O sistema proposto tem como objetivo explorar a interferometria de Talbot-Lau baseada em padrões de modulação de intensidade para viabilizar um método de imageamento óptico de baixo custo. Para isso, a abordagem experimental envolveu a prototipagem mecânica e eletrônica do dispositivo, com a utilização de impressão 3D para fabricação dos componentes estruturais e a integração de um sistema eletrônico baseado em Arduino para controle do movimento das grades e captura de imagens.

O conjunto interferométrico foi montado sobre uma prancha de acrílico transparente tamanho A4, na qual foram fixados: o trilho para sustentação e translação das grades, o anteparo e o suporte do sensor de imagem CMOS posicionado de forma a capturar as imagens do feixe modulado pelas grades.

A montagem dos componentes foi realizada com o auxílio de parafusos e suportes ajustáveis, garantindo estabilidade e minimizando erros de posicionamento.

Figura 4.1 – Montagem experimental do interferômetro do tipo Talbot-Lau para obtenção de imagens por contraste de fase utilizando luz visível. (a) Vista lateral, de esquerda a direita: (i) Suporte do colimador, (ii) colimador, (iii) trilho para fixação e translação longitudinal das grades (iv) fonte de alimentação, (v) suporte com dispositivo de translação longitudinal e dispositivo de fixação da primeira grade, (vi) motor de passo 28BYJ-48, (vii) Suporte com dispositivo de fixação, rotação e translação transversal da segunda grade. (viii) grade, (ix) anteparo, (x) Trilho para fixação e translação longitudinal do suporte do detector, (xi) sensor de imagem CMOS (xii) suporte para fixação da câmera OV7670. (b) Vista posterior.



4.1 PROTOTIPAGEM MECÂNICA

A estrutura do sistema foi projetada no *software Autodesk Inventor*, permitindo o desenvolvimento detalhado dos suportes e mecanismos necessários para o alinhamento preciso das grades interferométricas. A modelagem tridimensional possibilitou a visualização completa do dispositivo antes da fabricação, antecipando ajustes para garantir estabilidade estrutural e correta disposição dos componentes.

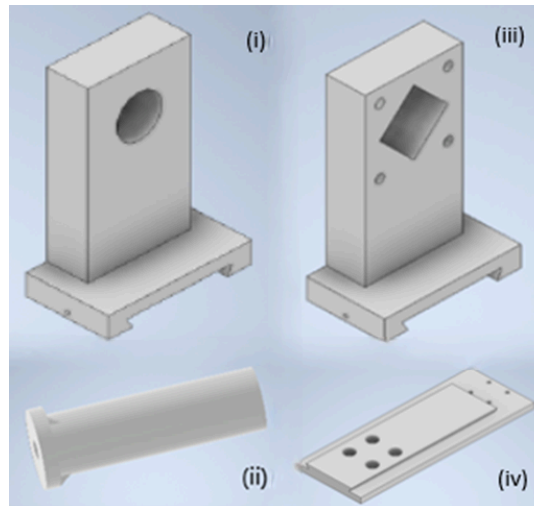
As peças impressas incluem suportes e sistemas de translação e rotação das grades interferométricas (Figura 4.1), fundamentais para o alinhamento e funcionamento adequado do sistema. São elas:

- Tubo colimador com suporte para a fonte de luz – Conjunto composto por uma peça cilíndrica e seu respectivo suporte. A peça cilíndrica possui um furo central de 6 mm de diâmetro que, embora não seja um colimador óptico avançado, reduz a divergência da luz do LED, proporcionando um feixe mais direcionado e aproximadamente paralelo. O suporte permite sua fixação e deslocamento longitudinal sobre o trilho, garantindo estabilidade mecânica.

- Trilho para fixação e translação longitudinal das grades – Base estrutural que possibilita o posicionamento preciso das grades interferométricas e os ajustes longitudinais necessários para calibração.

- Suporte para translação longitudinal da grade divisora de feixe – Estrutura que permite o deslocamento longitudinal da grade divisora de feixe ao longo do eixo óptico, contando com um dispositivo de fixação para mantê-la na posição desejada.

Figura 4.2 – Peças do sistema interferométrico (Parte 1): Modelos CAD das estruturas mecânicas do sistema óptico, incluindo: (i) suporte do colimador, (ii) colimador com cavidade para acomodar a fonte de luz, (iii) suporte para translação longitudinal da grade divisora de feixe e (iv) trilho para fixação e translação das grades interferométricas.

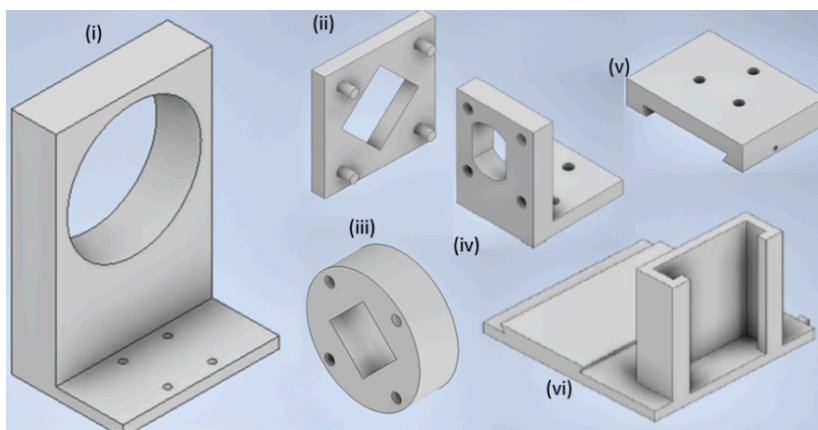


- Suporte para translação transversal da grade de transmissão – Estrutura que possibilita o deslocamento transversal da grade de transmissão, que atua como máscara de modulação para o detector. Além da translação, possui um mecanismo de fixação e ajuste angular essencial para a calibração fina da orientação da grade e para otimizar o contraste das franjas interferométricas no plano do detector.

- Trilho para fixação e translação longitudinal do suporte do sensor de imagem – Estrutura composta por um trilho onde se desloca um suporte ajustável ao qual o sensor de imagem OV7670 é fixado por meio de parafusos. Esse mecanismo permite dois ajustes essenciais: (i) alinhamento vertical do sensor em relação ao anteparo, garantindo sua posição calibrada dentro do sistema óptico, e (ii) ajuste longitudinal para controle do foco, otimizando a nitidez e precisão das imagens adquiridas.

- Suporte para fixação do sensor de imagem CMOS – Estrutura mecânica ajustável que mantém o sensor CMOS rigidamente fixado e alinhado ao eixo óptico do sistema, assegurando um posicionamento estável e compatível com as condições experimentais de captura de imagens.

Figura 4.3 – Peças do sistema interferométrico (Parte 2): Modelos CAD de componentes estruturais, contendo: (i) suporte da segunda grade para fixação no trilho, (ii) e (iii) dispositivo de fixação da grade no suporte, com mecanismo de rotação para ajustes angulares, (iv) trilho para translação do suporte do detector, (v) base do suporte do detector para fixação no trilho e (vi) Trilho com estrutura para acomodar a prototipagem eletrônica do motor e da câmera.



O sistema foi projetado para permitir ajustes manuais e automatizados na posição das grades, possibilitando varreduras precisas para extração da informação de fase a partir da modulação da luz.

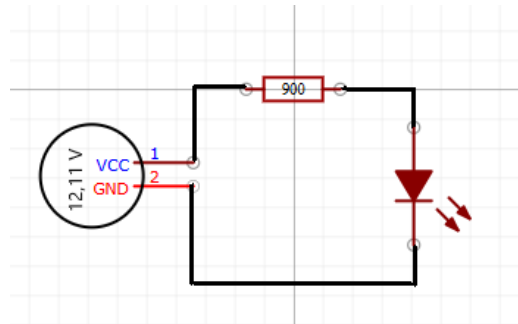
As peças mecânicas foram fabricadas por impressão 3D, utilizando uma impressora Graber3D (*hardware open-source*) e filamento PLA (ácido polilático), um polímero de baixo custo amplamente empregado na prototipagem experimental. O PLA foi escolhido por sua facilidade de impressão, precisão dimensional e estabilidade mecânica.

Após a fabricação, as peças foram inspecionadas para garantir conformidade dimensional. Componentes que exigiam encaixes precisos passaram por pequenas correções manuais para melhorar o ajuste.

4.2 FONTE DE LUZ

Para a iluminação do sistema (Figura 4.3), foi utilizado um LED (*Light Emitting Diode*) branco de alto brilho, que emite luz em diversas frequências, incluindo aquelas dentro do espectro visível. O LED foi alimentado por uma bateria de 12,11 V, com a corrente limitada a 10 mA por meio de um resistor de 900 Ω conectado em série.

Figura 4.4 – Esquema elétrico da fonte de iluminação: Representação do circuito utilizado para alimentar o LED. Desenhado na plataforma online para design e simulação de circuitos eletrônicos, EASYEDA: <https://pro.easyeda.com/editor>



O circuito de alimentação foi projetado para fornecer uma corrente adequada ao LED, garantindo uma intensidade luminosa relativamente alta sem comprometer sua integridade.

Para minimizar interferências externas e melhorar o contraste das imagens, o sistema foi coberto com um material preto opaco, bloqueando fontes de luz indesejadas. Além disso, foram desligadas as luzes do ambiente durante as medições, reduzindo reflexões que poderiam comprometer a qualidade dos padrões de interferência registrados.

4.3 PROTOTIPAGEM ELETRÔNICA

A prototipagem eletrônica do sistema foi desenvolvida para permitir o controle preciso da movimentação da segunda grade interferométrica e a aquisição sincronizada das imagens pelo sensor CMOS. O circuito foi projetado utilizando um microcontrolador Arduino Nano, que gerencia tanto o motor de passo quanto a câmera OV7670, garantindo a sincronização entre a movimentação mecânica e a captura de imagens. Esse controle é essencial para a extração das informações do gradiente de fase modulado pelo objeto.

4.3.1 Controle do Motor de Passo

O deslocamento da segunda grade interferométrica foi implementado por

meio de um motor de passo 28BYJ-48, acionado por um driver ULN2003A, responsável por amplificar os sinais enviados pelo Arduino Nano para excitar as bobinas do motor na sequência correta. Esse motor opera com uma redução interna de 1:64, exigindo 512 passos para completar uma rotação completa do eixo de saída.

No experimento, a extremidade do eixo do motor está acoplada a um parafuso de avanço de 0,5 mm por rotação, por meio de uma peça que foi projetada e modelada para posterior impressão 3D, de forma que cada revolução completa do motor desloca linearmente a segunda grade em 0,5 mm ao longo da direção transversal em relação à primeira grade. Dessa forma, considerando o número total de passos por revolução, o deslocamento mínimo possível da grade, correspondente a um único passo do motor, é de aproximadamente:

$$\frac{0,5mm}{512} \approx 0,000976 \text{ mm (0,976 } \mu\text{m por passo)}.$$

Na técnica do passo de fase, é necessário que a grade seja deslocada de maneira uniforme e previsível, assegurando que cada posição corresponda a um deslocamento bem definido. Dessa forma, o controle preciso da movimentação permite que a reconstrução do gradiente de fase do objeto seja realizada de maneira confiável e reproduzível.

Para garantir a precisão, a repetibilidade e a estabilidade do deslocamento do motor de passo no sistema, foram realizados testes para avaliar seu funcionamento. Primeiramente, verificou-se que o motor completava corretamente uma rotação completa ao executar o número esperado de passos, proporcionando a correspondência exata entre os comandos enviados e o deslocamento físico obtido, sendo possível corroborar que não houve perda de passos. Além disso, foi determinado o menor deslocamento possível que o motor conseguia realizar, identificando a resolução mínima do sistema ($\approx 0,976 \mu\text{m}$) e sua capacidade de executar movimentações incrementais com precisão.

Para avaliar a regularidade da operação, mediu-se o tempo necessário para completar uma volta completa, repetindo-se o procedimento para diversas execuções e constatando que a velocidade de rotação permaneceu constante ao

longo do tempo.

Adicionalmente, foi conduzido um teste de múltiplas voltas consecutivas, no qual se verificou que, mesmo após sucessivas rotações, o motor retornava precisamente à posição esperada, sem apresentar desvios cumulativos.

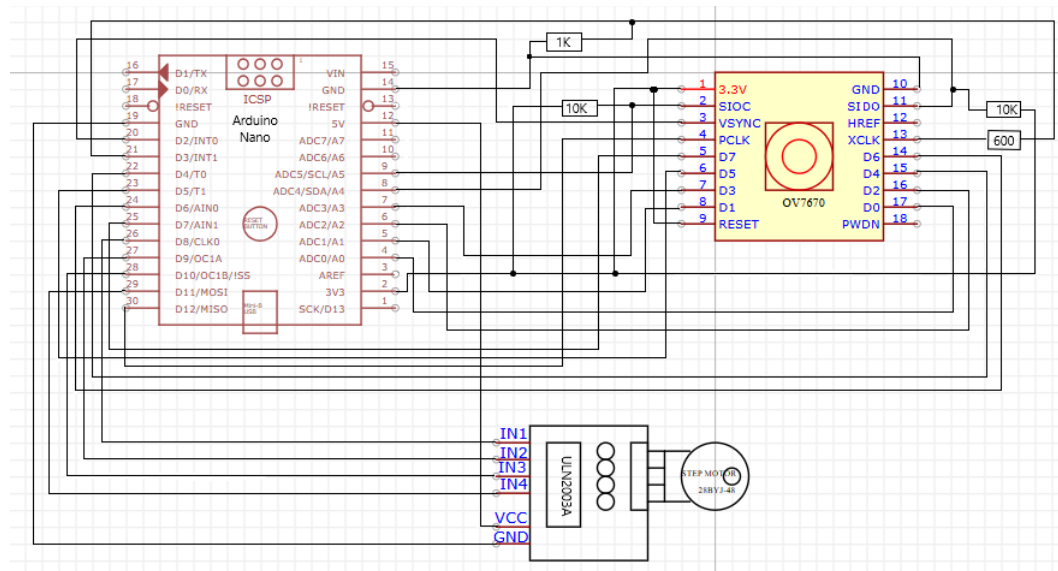
4.3.2 Prototipagem Eletrônica do Sistema de Aquisição de Imagens

A obtenção de imagens no sistema interferométrico foi realizada com o sensor de imagem OV7670, um dispositivo CMOS comercial com tecnologia BSI (*Backside Illumination*), projetado para captar luz visível, utilizado também como detector de conversão direta de raios X em imagem, com alta sensibilidade. Esse sensor oferece uma resolução máxima de 640×480 pixels (VGA) e suporta taxas de aquisição de até 30 frames por segundo (fps). Além disso, possui um tamanho óptico de aproximadamente 1/6" e um tamanho do pixel de $3,6 \mu\text{m}$ (ver especificações: OMNIVISION TECHNOLOGIES, OPENHACKS).

Para gerenciar a comunicação entre o sensor e o sistema de captura, foi utilizado um Arduino Nano, que integra o microcontrolador ATmega328P. O controle da aquisição de imagens e a transferência dos dados para o computador foram realizados por meio do *software* ArduImageCapture, que permite o ajuste de parâmetros e a comunicação eficiente com o sensor através da interface serial.

A sincronização entre a movimentação da grade e a captura das imagens foi um aspecto essencial do experimento. Para isso, o código de controle do sistema foi desenvolvido a partir de um exemplo disponível no Electric DIY Lab, sendo modificado para incluir o controle do motor e a parametrização do número de quadros adquiridos antes de cada deslocamento da grade. Dessa forma, garantiu-se que cada imagem fosse registrada em uma posição específica antes do próximo avanço.

Figura 4.5 – Esquemático elétrico do sistema experimental. Esquemático elétrico representando as conexões do sistema de controle e aquisição de imagens. O Arduino Nano coordena a captura de imagens pelo sensor CMOS OV7670 e controla o motor de passo 28BYJ-48 por meio do driver ULN2003A. A alimentação do sistema é feita via USB, garantindo a operação estável dos componentes eletrônicos durante os experimentos. Desenhado na plataforma online para design e simulação de circuitos eletrônicos, EASYEDA: <https://pro.easyeda.com/editor>.

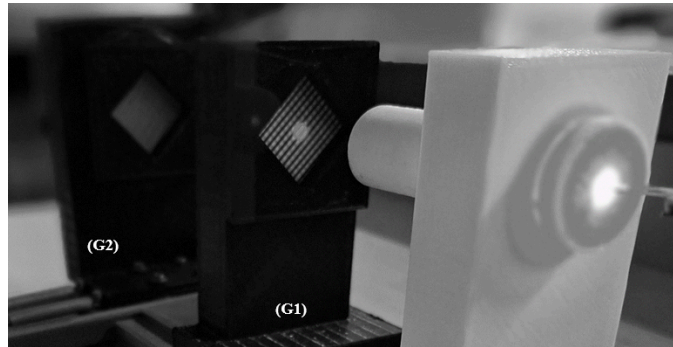


Além da programação, a construção mecânica do sistema também foi projetada para garantir a precisão da varredura interferométrica. A estrutura foi concebida para minimizar oscilações e desalinhamentos, proporcionando uma fixação firme do motor e do conjunto de translação da grade. Medidas adicionais foram adotadas para reduzir vibrações e assegurar um movimento uniforme, contribuindo para a obtenção de imagens mais nítidas e confiáveis.

4.4 GRADES

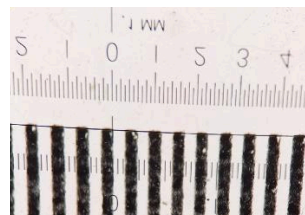
As grades utilizadas no sistema interferométrico foram inicialmente projetadas no *software Autodesk Inventor*, com um passo de 0,3 mm. Isso significa que cada franja escura e espaçamento claro adjacente, possui aproximadamente 0,3 mm de largura. Os arquivos foram posteriormente impressos em papel vegetal por meio de uma impressora a laser. No entanto, durante os testes experimentais, verificou-se que o feixe de luz incidente era completamente absorvido pela primeira grade (G1), impedindo a transmissão da luz para a segunda grade (G2), como pode ser observado na figura 4.6.

Figura 4.6 – Grades: Imagem mostrando a absorção do feixe de luz pela primeira grade (G1), impressa em papel vegetal, impedindo sua passagem para a segunda grade (G2).



Diante dessa limitação, optou-se pela substituição do substrato das grades por filmes de transparência, visando reduzir a absorção da radiação incidente e melhorar a eficiência óptica do sistema. Além disso, a fidelidade dimensional das grades foi avaliada por meio de microscopia óptica, utilizando um estereomicroscópio com ampliação de 20×. Para referência, foi posicionada uma régua milimétrica na imagem, permitindo a verificação direta do espaçamento das faixas impressas, conforme ilustrado na figura 4.7.

Figura 4.7 – Dimensões das grades: Imagem obtida com estereomicroscópio (aumento de 20×), usando uma régua milimétrica como referência para medir o espaçamento entre as faixas.



4.5 PROCESSAMENTO DAS IMAGENS E ANÁLISE

Após a aquisição das imagens em intervalos regulares de 0,225 mm, totalizando 10 imagens por varredura, foi desenvolvido um algoritmo de processamento digital em MATLAB (ver Anexo A) para extrair as informações do gradiente de fase do objeto. O experimento foi realizado tanto na presença quanto na ausência da amostra, permitindo avaliar as variações no padrão de interferência causadas pela interação do feixe com o objeto. O objeto analisado foi uma concha de plástico com relevos superficiais, frequentemente utilizada como enfeite (Figura

4.8 (b)).

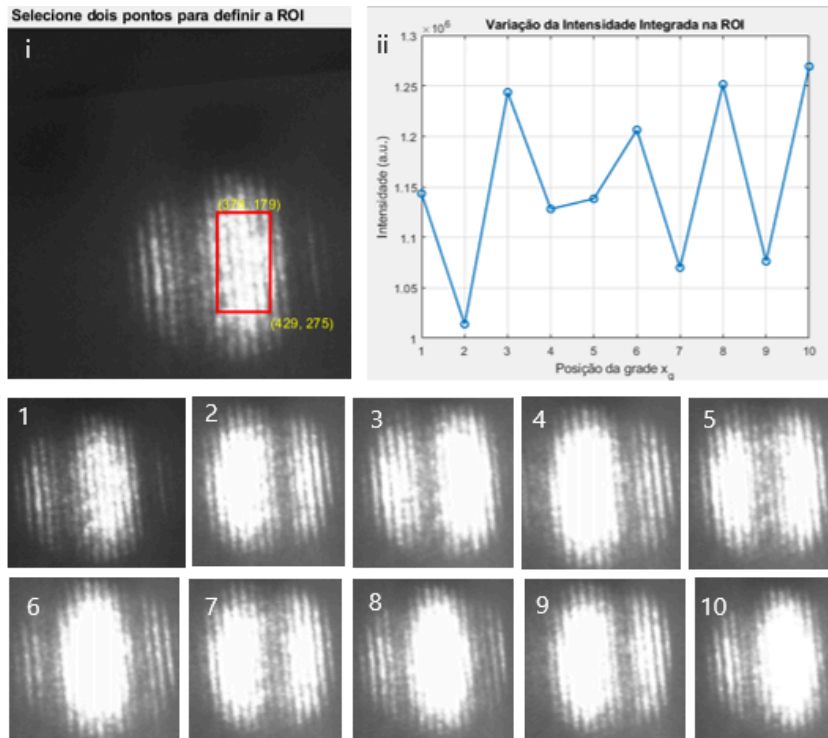
O processamento das imagens iniciou-se com a seleção da Região de Interesse (ROI) dentro da sequência adquirida. Esse procedimento foi realizado manualmente na primeira imagem utilizando a função *ginput(2)* do MATLAB, que permite selecionar dois pontos correspondentes aos cantos opostos de um retângulo delimitador. A mesma ROI foi mantida fixa ao longo da análise, garantindo consistência e permitindo a comparação direta entre os deslocamentos da segunda grade interferométrica. A escolha da região levou em consideração a modulação da intensidade pelo interferômetro, de forma que as variações fossem bem definidas e refletissem as deflexões angulares do feixe, assegurando a extração confiável do gradiente de fase do objeto.

Após a definição da ROI, foi realizada a extração da intensidade integrada dessa região ao longo da sequência de imagens adquiridas para diferentes deslocamentos da segunda grade interferométrica. As imagens foram inicialmente convertidas para escala de cinza, garantindo uniformidade na análise, e posteriormente recortadas de acordo com a ROI selecionada. A intensidade total dentro dessa região foi então calculada para cada imagem da sequência, e os valores foram armazenados em um vetor correspondente a cada deslocamento da grade. Esse procedimento permitiu uma análise quantitativa da variação da intensidade do feixe de luz modulada pelo interferômetro.

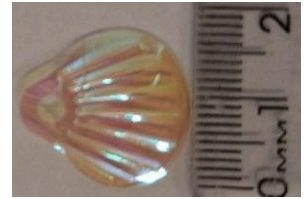
Os dados extraídos foram utilizados para construir gráficos da intensidade integrada em função do deslocamento transversal ao eixo óptico (x_g) da segunda grade interferométrica, tanto para o experimento sem amostra quanto para o experimento com amostra. Os gráficos apresentaram um padrão oscilatório característico da interferometria de grades, demonstrando a modulação do sinal em resposta ao deslocamento da grade (G2). Essa oscilação corresponde à variação periódica da intensidade luminosa, diretamente relacionada ao gradiente de fase do objeto. A comparação entre os gráficos obtidos nos dois casos evidenciou que, na ausência da amostra, a oscilação reflete o padrão interferométrico de referência, enquanto na presença da amostra foram observadas modificações na fase e amplitude do sinal, demonstrando as variações locais na frente de onda causadas pela interação do feixe com a estrutura do objeto.

Figura 4.8 – Imagens obtidas com o sistema interferométrico e processamento das imagens para obter o gradiente de fase do objeto. (a) Aquisição sem a amostra: (i) Seleção da região de interesse (ROI) na primeira imagem, garantindo que a mesma área seja processada nas demais imagens. O retângulo vermelho representa a região analisada para a extração da variação de intensidade. (ii) Curva de intensidade correspondente à ROI sem a presença da amostra. (1-10) Conjunto de 10 imagens obtidas por varredura com o sensor CMOS OV7670 na ausência da amostra. (b) Amostra. (c) Aquisição com a amostra: (i) Seleção da ROI na primeira imagem, seguindo o mesmo critério adotado em (b). (ii) Curva de intensidade extraída da ROI nas imagens adquiridas na presença da amostra. (1-10) Conjunto de 10 imagens adquiridas com o sensor CMOS OV7670, agora com a amostra presente no sistema.

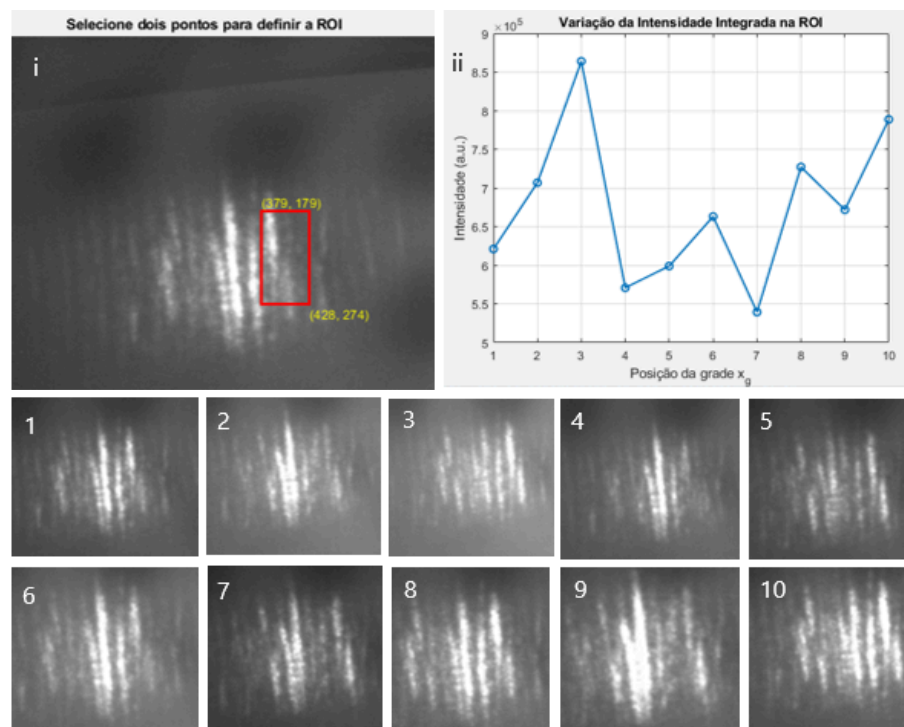
(a)



(b)



(c)



CAPÍTULO 5: CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho demonstrou a possibilidade de montagem de um dispositivo baseado em grades para obtenção de imagens por contraste de fase utilizando luz visível. A configuração experimental empregou a interferometria de Talbot-Lau em conjunto com a técnica de passo de fase para extrair o gradiente do perfil de fase da amostra. Embora a obtenção direta de imagens de contraste de fase não tenha sido realizada nesta etapa, os resultados obtidos indicaram a viabilidade da abordagem proposta.

A prototipagem mecânica, viabilizada por impressão 3D, possibilitou um alinhamento adequado das grades interferométricas, enquanto a integração eletrônica com a plataforma Arduino proporcionou um controle eficiente e repetível do deslocamento das grades. A análise dos dados coletados confirmou a presença de padrões de interferência consistentes com as previsões teóricas, evidenciando a eficiência da modulação de fase para detectar variações sutis na amostra.

Apesar dos avanços alcançados, alguns desafios foram identificados durante o desenvolvimento do sistema. Entre eles, destaca-se a necessidade de cuidados rigorosos no alinhamento das grades, uma vez que, ao se trabalhar com elementos de dimensões na ordem de frações de milímetro, pequenos desvios angulares ou de posicionamento podem gerar a formação de franjas de Moiré. Embora essas franjas não inviabilizem a extração das informações de fase, elas podem dificultar e retardar o processo de análise, reforçando a importância de uma verificação cuidadosa antes e durante a coleta das imagens.

Como os princípios físicos que regem o sistema interferométrico desenvolvido neste trabalho são universais e aplicáveis a diferentes faixas do espectro eletromagnético, a estrutura montada pode, futuramente, ser adaptada para operação com radiação de raios X. Tal adaptação pode ampliar significativamente as aplicações do sistema, especialmente em contextos que exigem a análise de materiais com baixo contraste de absorção.

REFERÊNCIAS

PFEIFFER, Franz et al. Phase retrieval and differential phase-contrast imaging with low-brilliance X-ray sources. **Nature Physics**, [S.l.], v. 2, n. 4, p. 258-261, 2006.

OLIVO, Alessandro; SPELLER, Robert. A coded-aperture technique allowing x-ray phase contrast imaging with conventional sources. **Applied Physics Letters**, Melville, v. 91, n. 7, p. 074106, ago. 2007.

OLIVO, Alessandro et al. An innovative digital imaging set-up allowing a low-dose approach to phase contrast applications in the medical field. **Medical Physics**, [S.l.], v. 28, n. 8, p. 1610-1619, ago. 2001.

WEITKAMP, Timm et al. Hard X-ray phase imaging and tomography with a grating interferometer. In: BONSE, Ulrich (Ed.). **Developments in X-Ray Tomography IV**. Bellingham: SPIE, 2004. p. 239-247.

WEITKAMP, Timm et al. X-ray phase imaging with a grating interferometer. **Optics Express**, Washington, v. 13, n. 16, p. 6296-6304, ago. 2005.

THÜRRING, T. et al. X-ray phase-contrast imaging at 100 keV on a conventional source. **Scientific Reports**, Londres, v. 4, n. 5198, 2014.

LAU, Ton E. Beugungerscheinungen an Doppelrastern. **Zeitschrift für Physik**, Berlim, v. 125, n. 1, p. 1-14, 1948.

WILKINS, S. W. et al. Phase-contrast imaging using polychromatic hard X-rays. **Nature**, Londres, v. 384, n. 6607, p. 335-338, nov. 1996.

CHABIOR, Michael et al. Beam hardening effects in grating-based x-ray phase-contrast imaging. **Medical Physics**, [S.l.], v. 38, n. 3, p. 1189-1195, mar. 2011.

DAVIS, T. J. et al. Phase-contrast imaging of weakly absorbing materials using hard X-rays. **Nature**, Londres, v. 373, n. 6515, p. 595-598, fev. 1995.

CREATH, Katherine. V. Phase-Measurement Interferometry Techniques. In: WOLF, Emil (Ed.). **Progress in Optics**. Amsterdam: Elsevier, 1988. v. 26, p. 349-393.

MOMOSE, Atsushi. Recent Advances in X-ray Phase Imaging. **Japanese Journal of Applied Physics**, Tóquio, v. 44, n. 9A, p. 6355-6367, set. 2005.

MOMOSE, Atsushi et al. Demonstration of X-Ray Talbot Interferometry. **Japanese Journal of Applied Physics**, Tóquio, v. 42, n. 7B, p. L866-L868, jul. 2003.

VITTORIA, Fabio A.; ENDRIZZI, Marco; OLIVO, Alessandro. Retrieving the Ultrasmall-Angle X-Ray Scattering Signal with Polychromatic Radiation in Speckle-Tracking and Beam-Tracking Phase-Contrast Imaging. **Physical Review Applied**, College Park, v. 7, n. 3, p. 034024, mar. 2017.

ALS-NIELSEN, Jens; MCMORROW, Des. **Elements of Modern X-ray Physics**. 2. ed. Chichester: Wiley, 2011.

MOMOSE, Atsushi; YASHIRO, Wataru; KIDO, Kazuhiro; KIYOHARA, Junko; MAKIFUCHI, Chiho; ITO, Tsukasa; NAGATSUKA, Sumiya; HONDA, Chika; NODA, Daiji; HATTORI, Tadashi; ENDO, Tokiko; NAGASHIMA, Masabumi; TANAKA, Junji. X-ray phase imaging: from synchrotron to hospital. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Londres, v. 372, n. 2010, p. 20130023, mar. 2014.

GRÜNZE, Martin et al. **Simmetric Talbot-Lau neutron grating interferometry and incoherent imaging**. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-019-55420-3>. Acesso em: 22 fev. 2025.

MOMOSE, Atsushi. **Differential X-ray phase-contrast imaging using a Talbot-Lau interferometer**. Disponível em: <https://pubs.aip.org/aip/apl/article-abstract/81/17/3287/115118/Differential-x-ray-phase-contrast-imaging-using-a?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 22 fev. 2025.

TERVO, Jani; SETÄLÄ, Tero; FRIBERG, Ari T. Phase correlations and optical coherence. *Optics Letters*, Washington, v. 37, n. 2, p. 151-153, jan. 2012.

OMNIVISION TECHNOLOGIES, INC. OV7670 - CMOS image sensor. Disponível em: https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/312420/OMNIVISION/OV7670.html?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 19 fev. 2025.

OPENHACKS. OV7670 CMOS camera module datasheet. Disponível em: https://www.openhacks.com/uploadsproductos/ov7670_cmos_camera_module_rev_c_ds.pdf?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 19 fev. 2025.

EASYEDA. Online PCB design tool and schematic editor. Disponível em: <https://pro.easyeda.com/editor>. Acesso em: 19 fev. 2025.

ELECTRIC DIY LAB. How to use OV7670 camera module with Arduino: Taking live pictures. Disponível em: <https://electricdiy.com/how-to-use-ov7670-camera-module-with-arduino-taking-live-pictures/>. Acesso em: 19 fev. 2025.

ANEXOS

ANEXO A – ROTINA PARA SELEÇÃO DA REGIÃO DE INTERESSE (ROI) E EXTRAÇÃO DO GRADIENTE DO PERFIL DE FASE UTILIZANDO MATLAB

```

% Leitura da primeira imagem para determinar o tamanho.
tam_img = imread(sprintf('%03d.png', 1)); % Carrega a primeira imagem.
[m, n, c] = size(tam_img); % Obtém as dimensões da imagem.

% Inicializa a matriz para armazenar as 10 imagens.
imagens_matriz = zeros(m, n, c, 10, 'uint8');

% Carrega as 10 imagens.
for i = 1:10
    filename = sprintf('%03d.png', i); % Nome do arquivo.
    img = imread(filename); % Lê a imagem.
    imagens_matriz(:, :, :, i) = img; % Armazena.
end

% Seleciona a primeira imagem como referência.
sample_img = imagens_matriz(:, :, :, 1);
if size(sample_img, 3) == 3
    sample_img = rgb2gray(sample_img); % Converte para escala de cinza.
end

% Exibe a imagem e permite a seleção da ROI.
figure, imshow(sample_img);
title('Selecione dois pontos para definir a ROI');
[x, y] = ginput(2); % Seleção interativa

% Ajuste e arredondamento das coordenadas.
x = round(x); y = round(y);
col_ini = min(x); col_end = max(x);
row_ini = min(y); row_end = max(y);

% Desenha a ROI com retângulo e exibe coordenadas.
hold on;
rectangle('Position', [col_ini, row_ini, col_end - col_ini, row_end - row_ini],

```

```

... 'EdgeColor', 'r', 'LineWidth', 2);
text(col_ini, row_ini - 10, sprintf('%d, %d', col_ini, row_ini), 'Color', 'yellow',
'FontSize', 10);
text(col_end, row_end + 10, sprintf('%d, %d', col_end, row_end), 'Color', 'yellow',
'FontSize', 10);
hold off;

% Inicializa vetor para intensidades.
intensity_values = zeros(numImages, 1);

% Calcula a intensidade integrada na ROI para cada imagem.
for i = 1:numImages
    img = imagens_matriz(:, :, i);
    if size(img, 3) == 3
        img = rgb2gray(img); % Converte se necessário
    end
    cropped_img = img(row_ini:row_end, col_ini:col_end); % Recorta a ROI.
    intensity_values(i) = sum(cropped_img(:)); % Soma dos valores de pixel.
end

% Plota a curva de intensidade.
figure;
plot(1:numImages, intensity_values, '-o', 'LineWidth', 1.5);
xlabel('Posição da grade x_g');
ylabel('Intensidade (a.u.)');
title('Variação da Intensidade Integrada na ROI');
grid on;

```