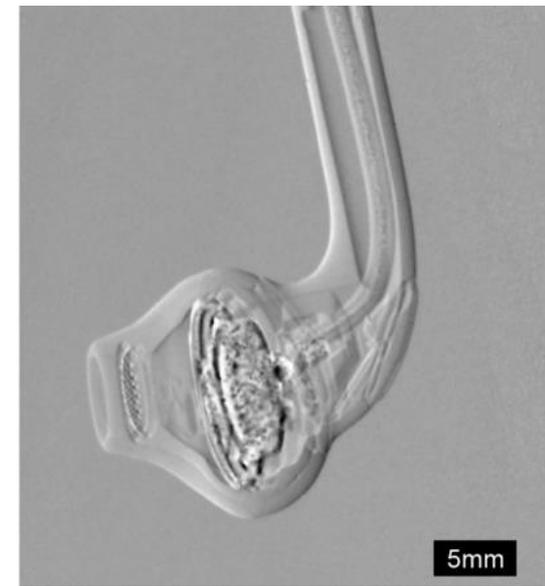
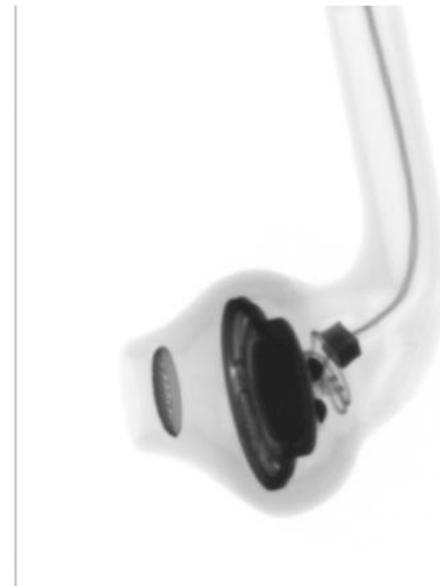
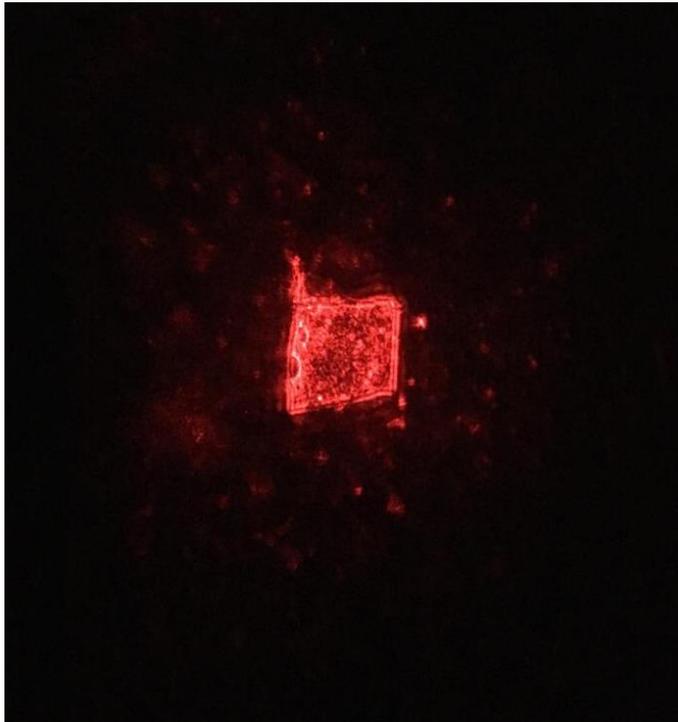


Experimento II - Óptica ondulatória - Análise de imagens



Atividade 3 – Observação da Imagem de Pequenas Amostras pelo Método de Contraste de Fase

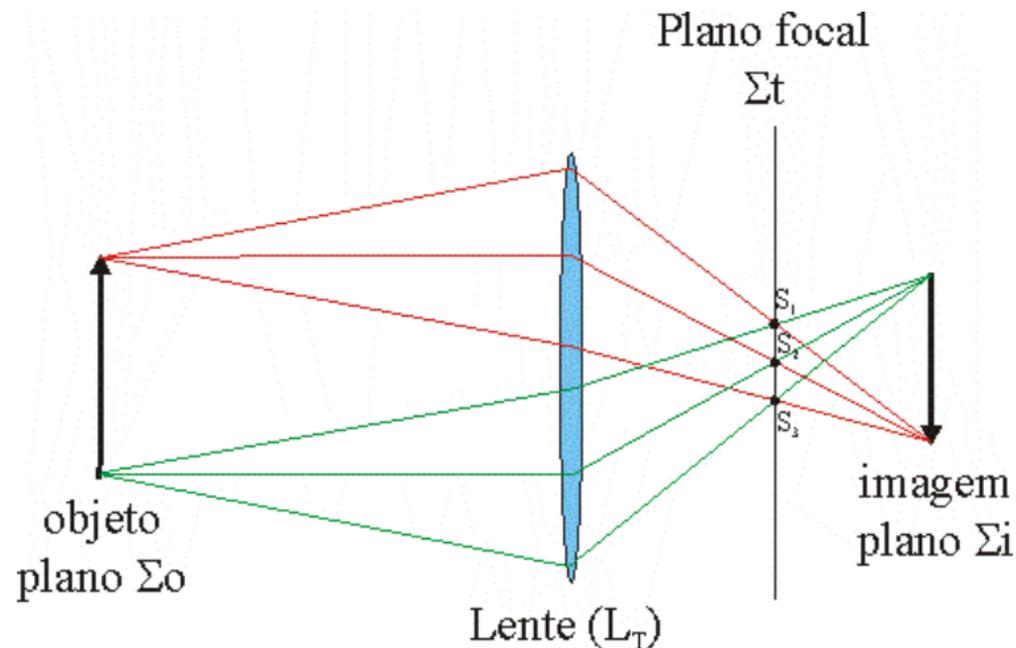


Objetivos do Experimento

- Investigar a natureza ondulatória da luz através do estudo da difração e da interferência.
- Estudar a difração de objetos bi-dimensionais.
- Estudar a difração como uma transformada de Fourier
- Construir um computador óptico.

Computador Óptico

- Como visto na atividade 2, o computador óptico consiste na manipulação de uma imagem de um objeto sem a necessidade de cálculos complexos, de maneira “analógica”.
- Uma das maneiras de manipular a imagem é utilizando um filtro no plano de Fourier que remove regiões específicas da transformada de Fourier do objeto.



Computador Óptico – Contraste de Fase

- Também é possível manipular a imagem do objeto através do método de **contraste de fase**.
- Um objeto acaba por alterar a fase e/ou a amplitude da onda incidente.
- Ao alterar a fase da onda após passar pelo objeto, é possível gerar uma interferência construtiva ou destrutiva da onda alterada pelo objeto com a onda que passou sem sofrer interferência.

Computador Óptico – Contraste de Fase

- Objetos podem ser vistos a olho nu devido as suas propriedades como cor, tonalidade, ou ausência de cor serem diferentes do ambiente ao seu redor.
- A onda de luz refletida ou transmitida pelo objeto terá então sua amplitude modulada no processo.
- O olho humano é capaz de observar apenas diferenças na intensidade da onda de luz, a qual é dependente do quadrado de sua amplitude.

Computador Óptico – Contraste de Fase

- Há outros tipos de objetos que são transparentes e não podem ser vistos claramente a olho nu, pois não geram uma modulação apreciável na intensidade.

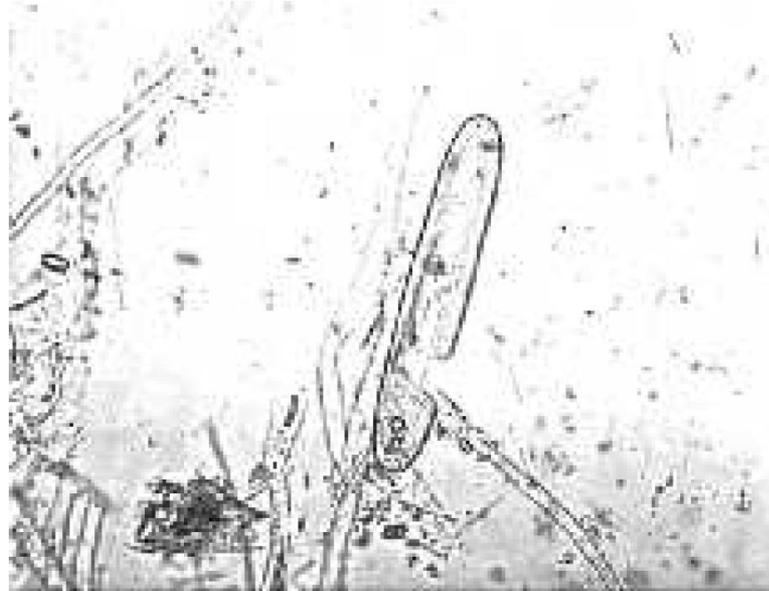
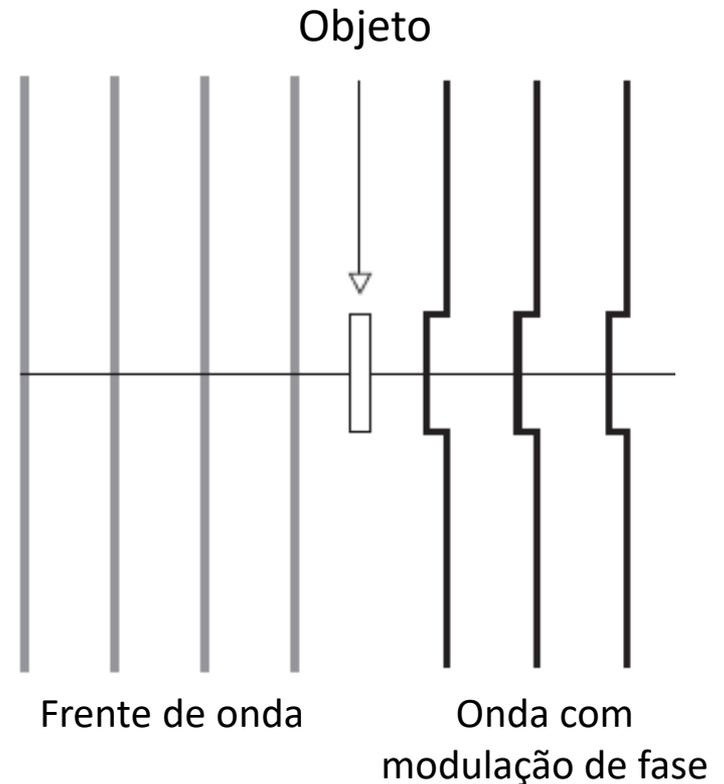


Imagem de uma bactéria no microscópio. Note que não é possível observá-la com muitos detalhes.

- Estes objetos, porém, podem gerar uma modulação na fase da onda de luz, a qual não é perceptível ao olho humano.

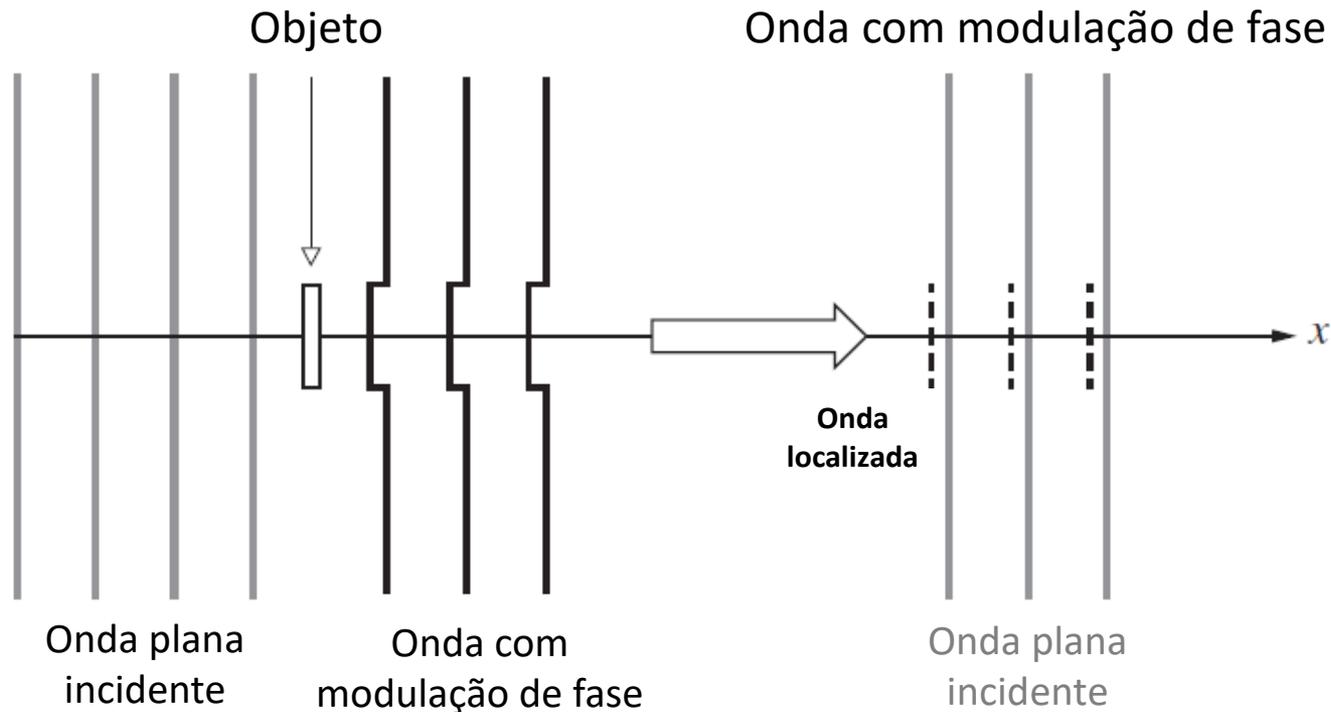
Computador Óptico – Contraste de Fase

- Vamos supor que um feixe monocromático paralelo incida perpendicularmente a um slide contendo um objeto que se deseja estudar.
- Podemos descrever a onda de luz do feixe monocromático paralelo incidente como uma onda plana (frente de onda).
- O objeto irá distorcer a frente de onda, adicionando uma variação na fase da onda.



Computador Óptico – Contraste de Fase

- A onda com modulação de fase pode ser descrita como a onda plana incidente somada a uma onda com pequena amplitude (onda localizada).



Computador Óptico – Contraste de Fase

- É possível descrever o fenômeno analiticamente.
- Podemos descrever a frente de onda plana ($E_i(t)$) na posição em que atinge o objeto (e assumindo que esta se propaga no eixo x) como:

$$E_i(x, t)|_{x=0} = E_0 \sin \omega t$$

- A onda com modulação de fase, supondo que o objeto não altere significativamente a amplitude da onda incidente, pode ser descrita como:

$$E_{PM}(\vec{r}, t)|_{x=0} = E_0 \sin [\omega t + \phi(y, z)]$$

Onde $\phi(y, z)$ é a fase adicionada à onda incidente pelo objeto.

Computador Óptico – Contraste de Fase

- Rearranjando os termos:

$$E_{PM}(y, z, t) = E_0 \sin \omega t \cos \phi + E_0 \cos \omega t \sin \phi$$

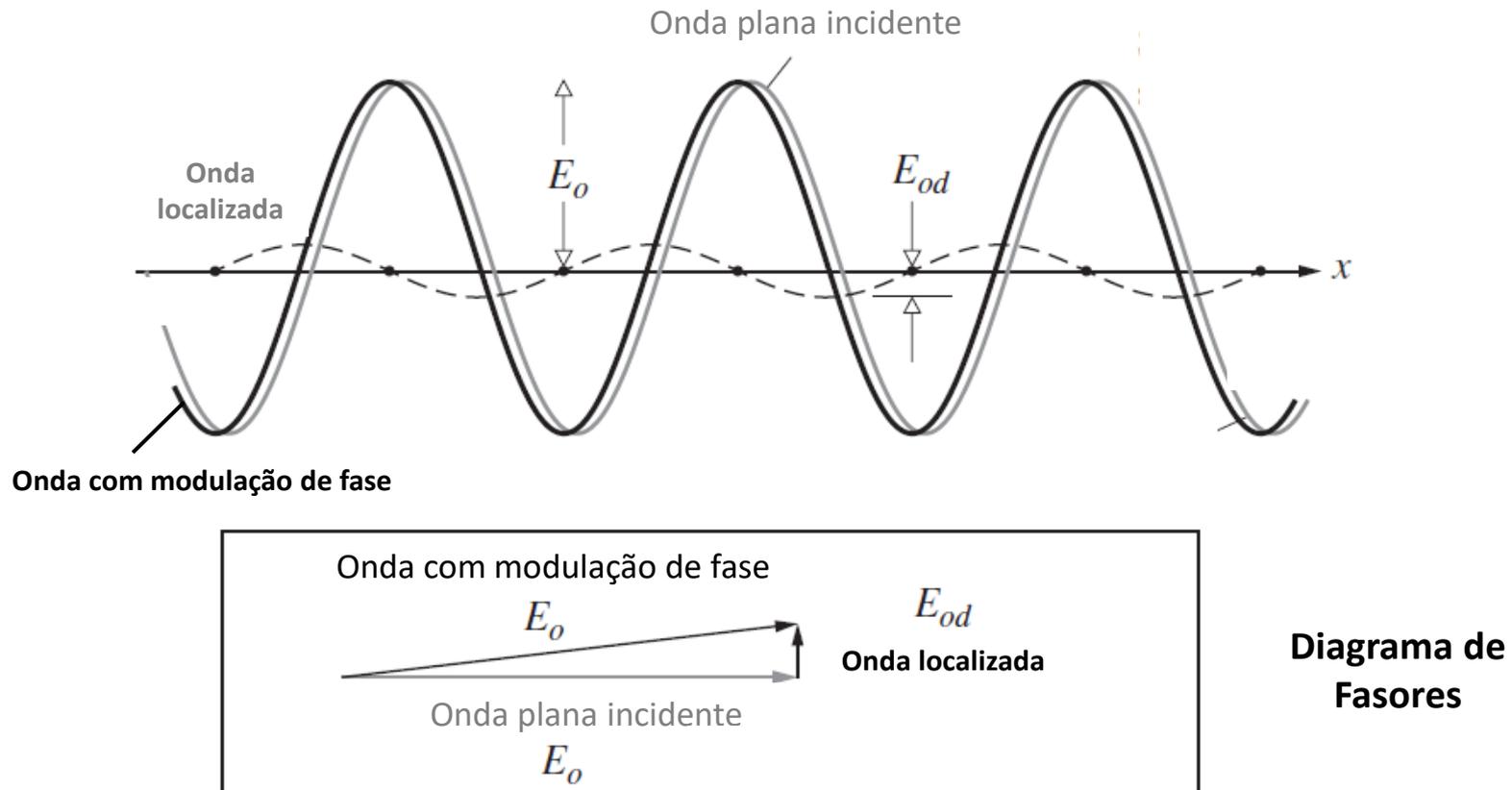
- Se o objeto é fino e pequeno, podemos considerar que $\phi(y, z)$ é próximo de 0. Assim:

$$E_{PM}(y, z, t) = \underbrace{E_0 \sin \omega t}_{\text{Onda plana incidente}} + \underbrace{E_0 \phi(y, z) \cos \omega t}_{\text{Onda localizada}}$$

- Note que a amplitude da onda localizada depende de $\phi(y, z)$, o qual é diretamente influenciado pelas características do objeto.

Computador Óptico – Contraste de Fase

- Esta descrição pode ser observada em um gráfico de amplitude por tempo das ondas, ou ainda em um diagrama de fasores.



$$\sin\left(x + \frac{\pi}{2}\right) = \cos x$$



Há uma diferença de 90° na fase da onda localizada e da onda incidente

Computador Óptico – Contraste de Fase

- A principal técnica utilizada no método de contraste de fase consiste em introduzir uma fase de $\pi/2$ à onda plana ou à onda localizada, de forma que ambas interfiram construtivamente ou destrutivamente antes de formar a imagem.
- Caso uma fase de $\pi/2$ seja aplicada a alguma das duas ondas, podemos escrever:

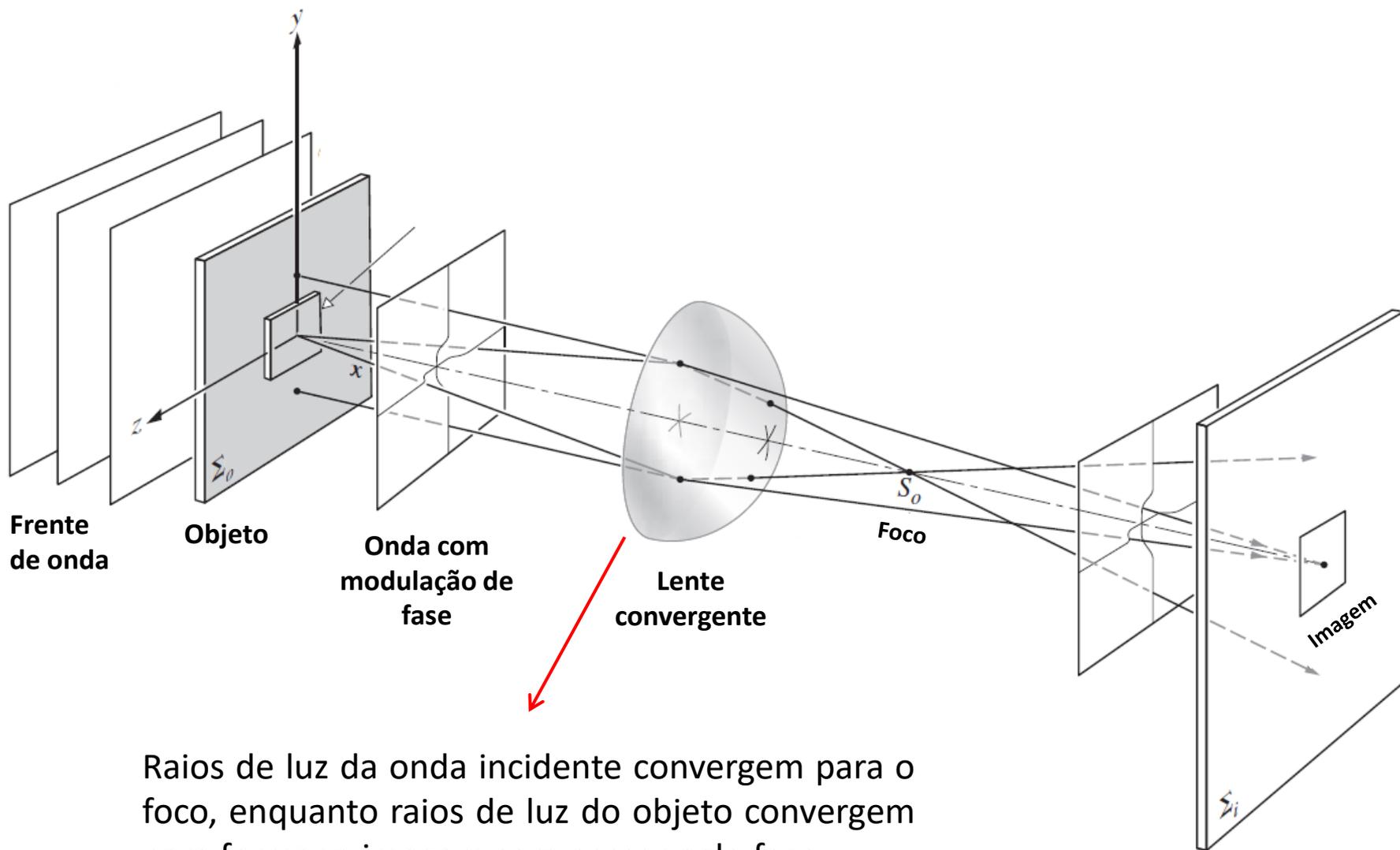
$$E_{AM}(y, z, t) = E_0[1 + \phi(y, z)] \sin \omega t$$

- Esta é uma onda com amplitude diferente da onda incidente, e portanto, com a amplitude modulada.
- Esta pode ser diferenciada da onda incidente pelo olho humano.

Computador Óptico – Contraste de Fase

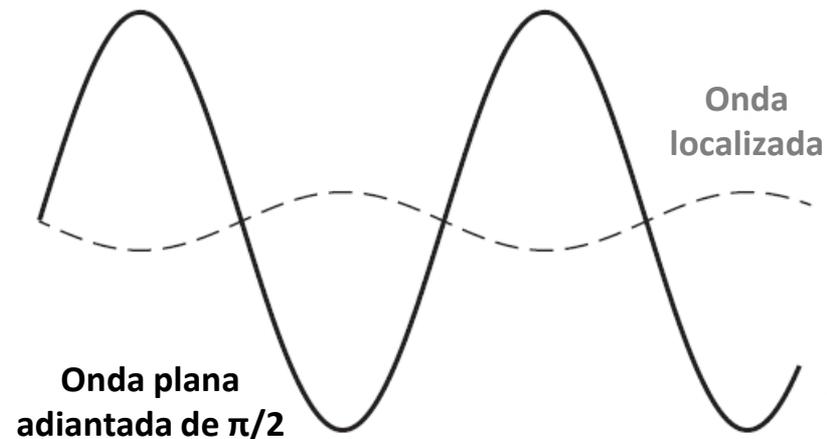
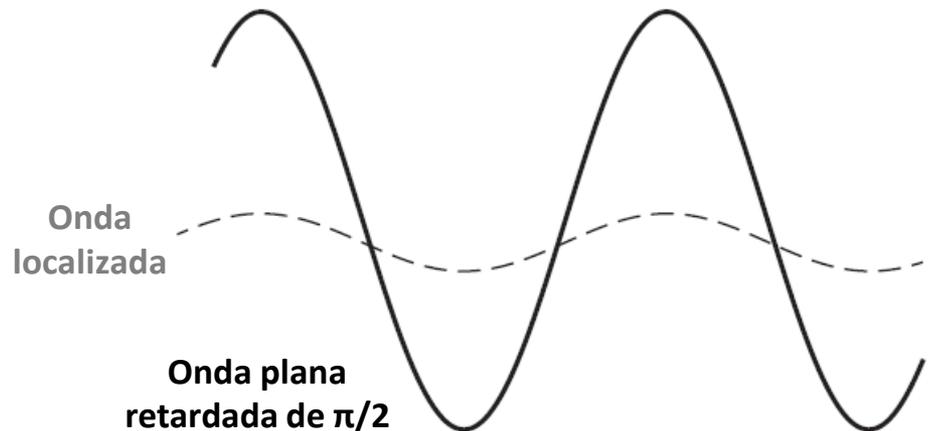
- O objeto deve difratar a onda plana incidente, de forma que a onda localizada não se propague paralelamente ao eixo x .
- A onda plana, no entanto, continua se propagando paralelamente ao eixo x .
- Se colocarmos uma lente convergente após o objeto, a onda plana deve convergir para o foco (já que incide perpendicularmente à lente).
- A maior parte da onda localizada, entretanto, irá convergir para a formar a imagem no anteparo, sem passar pelo foco.

Computador Óptico – Contraste de Fase



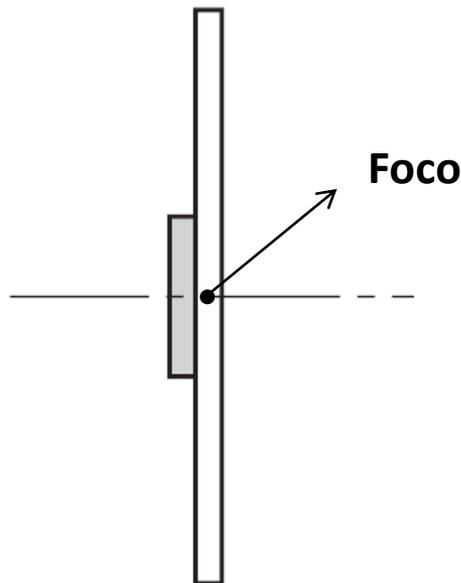
Computador Óptico – Contraste de Fase

- Se retardarmos a onda plana incidente de $\pi/2$, ela irá interferir construtivamente com a onda localizada, fazendo com que a onda de luz que gera a imagem possua uma modulação na amplitude. Assim, é possível observar a imagem do objeto no anteparo.
- Se adiantarmos a onda plana incidente de $\pi/2$, a interferência será destrutiva, e apenas a onda incidente poderá ser observada no anteparo.

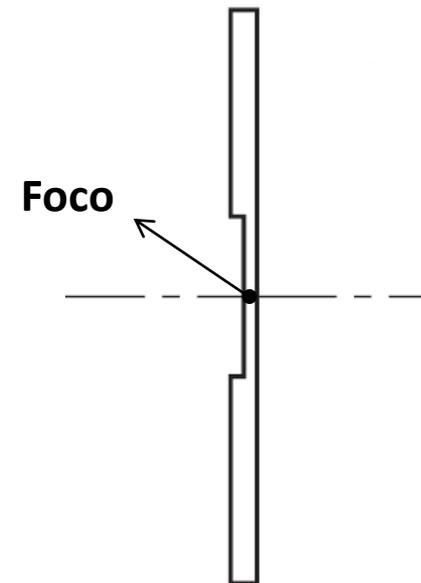


Computador Óptico – Contraste de Fase

- Uma **placa de fase** com a espessura adequada deve ser posicionado no foco da lente a fim de retardar ou atrasar a onda plana incidente de $\pi/2$.
- A placa irá gerar uma diferença de **caminho óptico** entre a onda plana e a onda localizada.



Onda plana
retardada de $\pi/2$



Onda plana
adiantada de $\pi/2$

Computador Óptico – Contraste de Fase

- Na prática, pode-se retardar ou adiantar a onda de $\pi/2$ mais um múltiplo inteiro de 2π .
- Podemos determinar a espessura da placa para gerar a diferença de caminho ótico desejada.
- Como descrito anteriormente, a onda com modulação de fase é descrita como:

$$E_{PM}(y, z, t) = \underbrace{E_0 \sin \omega t}_{\text{Onda plana incidente}} + \underbrace{E_0 \phi(y, z) \cos \omega t}_{\text{Onda localizada}}$$

Computador Óptico – Contraste de Fase

- Caso atrasemos a onda plana de uma fase $\pi/2$ mais um múltiplo inteiro de 2π , fazemos com que a diferença de caminho óptico seja:

$$\Delta = \frac{\lambda}{4} + m \lambda = \lambda \left(\frac{1}{4} + m \right)$$

onde $\Delta = d(n - 1)$ é a diferença de caminho óptico entre a luz que passa pela placa de fase e a luz do objeto, e m é um número inteiro.

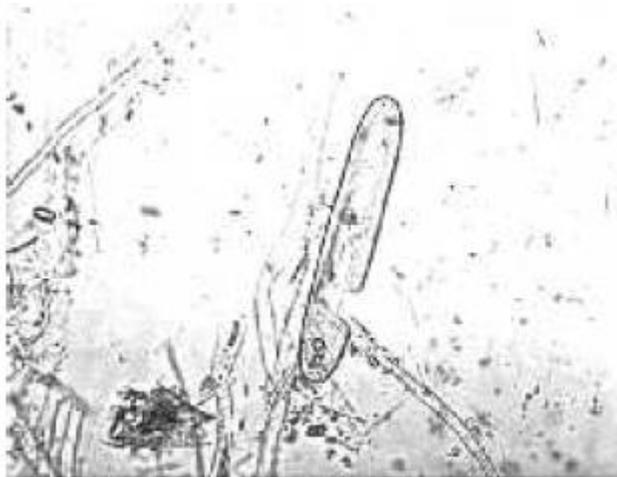
- A espessura desejada da placa de fase usada para retardar a onda plana deve ser então:

$$d = \frac{\lambda}{4} \frac{1}{n - 1} (4m + 1)$$

sendo n o índice de refração do material da placa de fase.

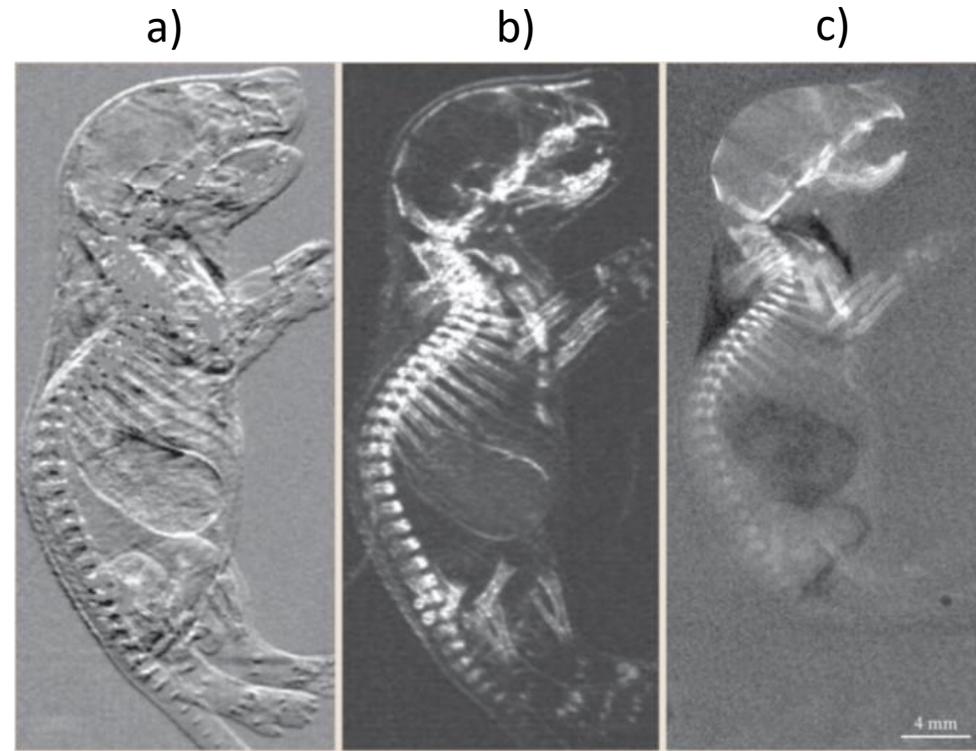
Microscopia por Contraste de Fase

- O físico holandês Fritz Zernike inventou este método, e construiu o microscópio de contraste de fase.
- Foi laureado com o Premio Nobel em 1953 pela invenção deste microscópio.
- Este tipo de microscópio é muito utilizado especialmente na biologia, no estudo de seres vivos microscópicos.



Microscopia por Contraste de Fase na Biologia

- É comum que pequenas amostras na biologia sejam praticamente transparentes, tornando sua observação muito difícil com microscópios comuns.
- Uma opção é o uso de corantes, porém, muitas vezes, o estudo de processos vitais se torna inviável com o uso de corantes, ou ainda, este acaba por matar o espécime.
- A microscopia por contraste de fase é muito útil nessas situações.

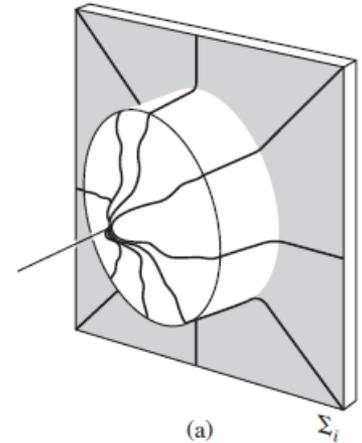


- a) *Imagem realizada por raio-x com contraste de fase.*
- b) *Imagem realizada por tomografia.*
- c) *Imagem realizada por radiografia.*

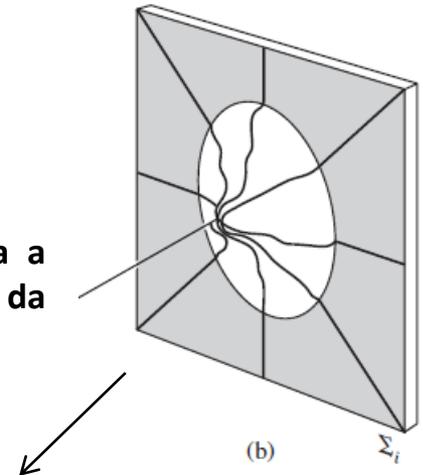
Computador Óptico - Remoção do Fundo

- Utilizando os conceitos do método de contraste de fase, também é possível reduzir a luz de fundo, de forma que o contraste entre a luz do objeto de estudo e a luz incidente seja aumentado.
- Se bloqueamos totalmente a luz no foco da lente convergente (onda incidente) ao invés de adiantarmos ou retardarmos sua fase, apenas a luz difratada pelo objeto (onda localizada) deve atingir o anteparo.

Onda de luz que gera a imagem sem bloqueio da luz incidente



Onda de luz que gera a imagem com bloqueio da luz incidente



Note que apenas a luz difratada pelo objeto gera uma imagem no anteparo

Computador Óptico - Remoção do Fundo

- Este método de remoção do fundo é útil especialmente para analisar objetos que possuem variações de pressão, comuns em dinâmica dos fluidos, estudos de aerodinâmica e balística, por exemplo.



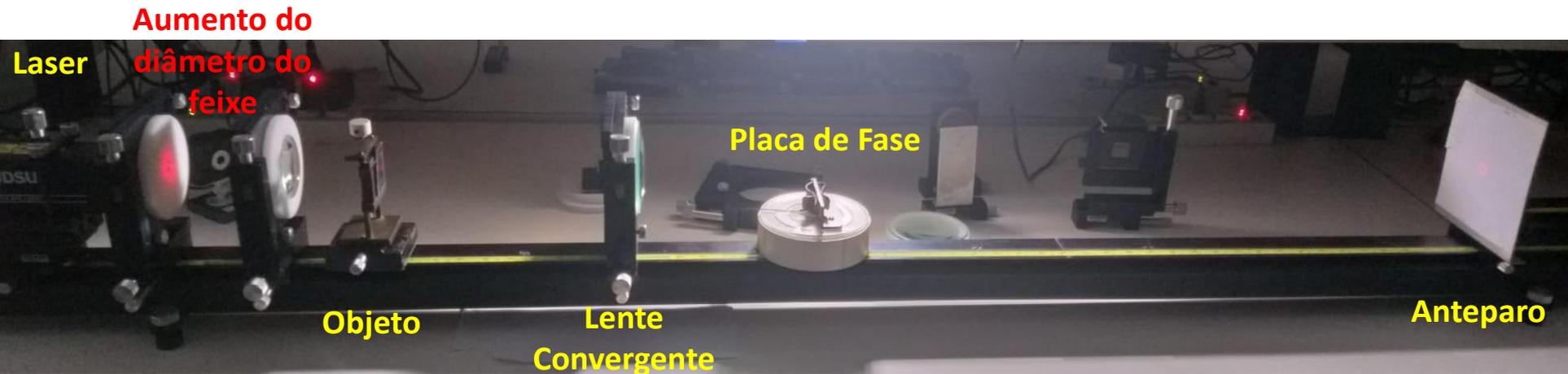
Imagem de uma colher em uma fumaça de vela (objeto) com o método de remoção do fundo (fundo removido da região preta da imagem).

Objetivos da Atividade

- Estudar o funcionamento do método de contraste de fase.
- Observar a imagem de uma pequena amostra transparente utilizando o contraste de fase.
- Analisar como a amostra altera a onda do feixe de luz incidente.
- Verificar se a espessura da placa que retarda a onda do feixe de luz incidente corresponde à esperada.

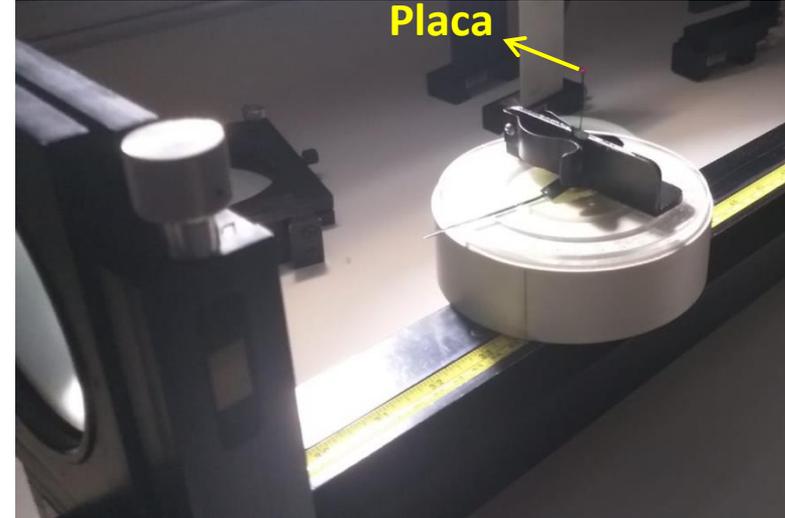
Arranjo Experimental

- Primeiramente, é necessário ajustar no trilho os equipamentos que serão utilizados na atividade.
- O diâmetro do feixe será aumentado 10X.
- A lente convergente deve possuir distância focal de 20 cm. A placa de fase deve ser posicionada no foco da lente.



Arranjo Experimental

- Dois anteparos opacos e uma placa de fase serão utilizadas:
 - ✓ Quadrado opaco de lado 5 cm.
 - ✓ Material opaco de pequena área.
 - ✓ Material de pequena área que serve de placa de fase.



- Note que para a observação da imagem do objeto através de interferência construtiva, é necessário atenuar parte do feixe da onda plana (fundo), já que sua amplitude é muito maior que a amplitude da onda localizada (gerada pela amostra).
- Se o fundo não fosse atenuado, a amplitude da onda após a interferência seria muito próxima da amplitude do fundo, e não seria possível observar o contraste entre a onda após a interferência e o fundo, necessário para formar a imagem do objeto.

Análise

- Sem que a amostra esteja como objeto, posicione o material opaco de pequena área no foco da lente convergente. Analise a imagem do feixe do laser no anteparo com e sem o material opaco no foco. O que ocorre com a luz do fundo nas duas situações?
- Coloque então a amostra no suporte. Analise sua imagem no anteparo com o primeiro material opaco (quadrado de 5 cm). O que ocorre com a luz do fundo? E com a luz do objeto?
- Analise a imagem da amostra com o material opaco de pequena área.
- Analise a imagem da amostra com a placa de fase. O que ocorre nestes dois últimos casos?
- Fotografe e discuta todas as imagens observadas.
- Meça a espessura da placa de fase. Esta espessura é condizente com o esperado baseado na imagem observada? Determine o múltiplo do comprimento de onda (“**m**”) associado a essa espessura.