

*Electronic Speckle Pattern
Interferometry (ESPI)*

*Interferometria de
Padrões de granulação de luz*

*Interferometria
Holográfica Digital*

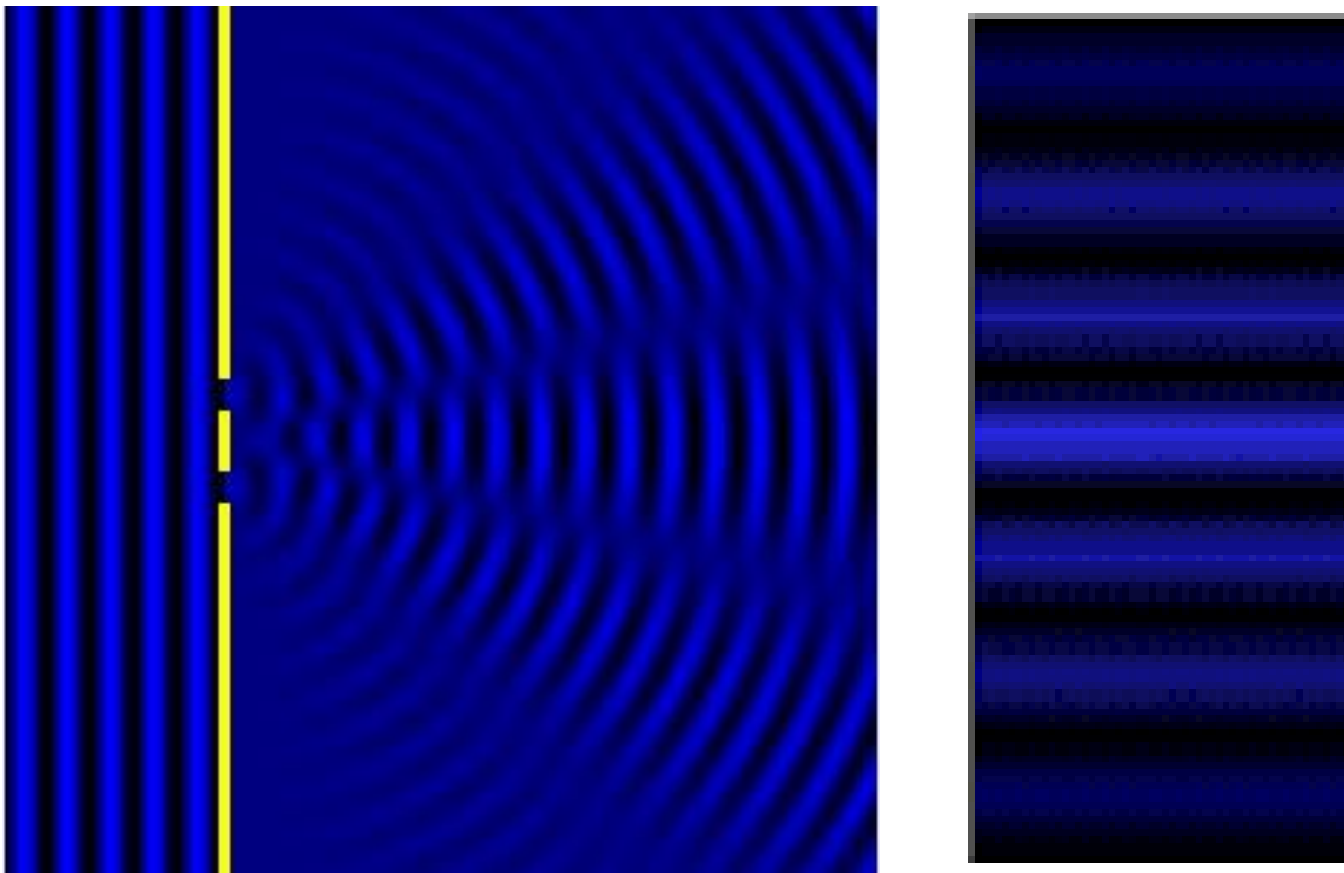
Interferometria Holográfica?

Um interferômetro é um sistema para observar a interferência entre duas ou mais ondas. Um sistema óptico de medição interferométrica, necessita de uma fonte de luz, um sistema óptico de interferência e um detector que converte variações de intensidade luminosa num sinal mensurável.

A holografia é uma técnica que grava uma frente de onda e subsequentemente reconstrói em ausência da frente de onda original, porque, conforme o significado de *holo*, toda informação (amplitude e fase da onda) é gravada pela técnica.

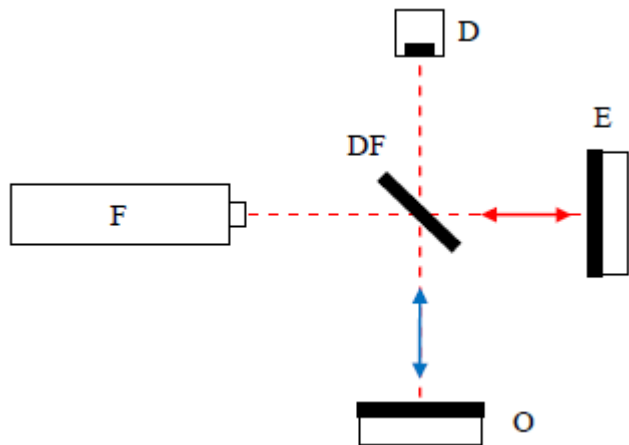
A Interferometria Holográfica é o nome que designa a técnica que usa uma forma de registro interferométrico para obter informação sobre a superfície de um objeto.

Difração, Interferência e Coerência

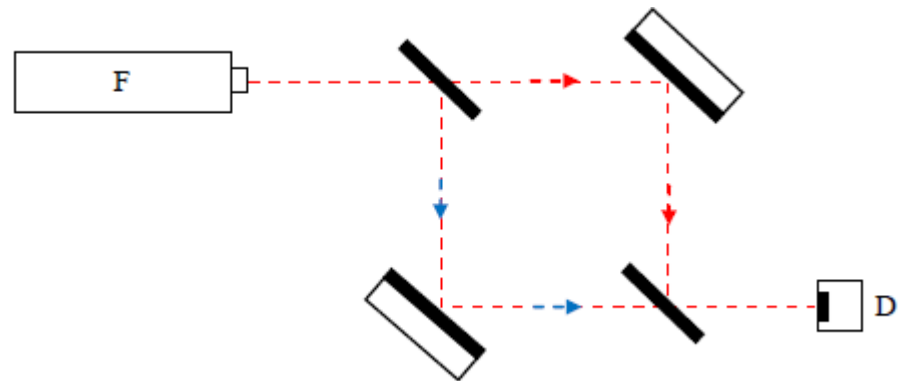


Experimento de Young.

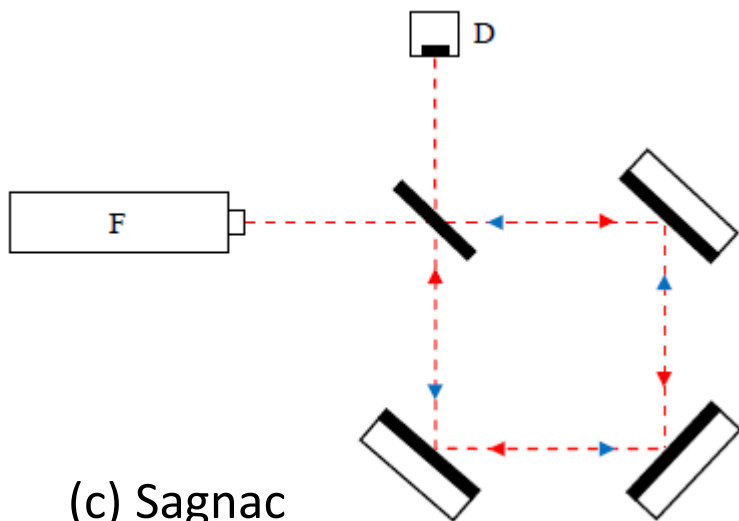
Configurações Interferométricas básicas



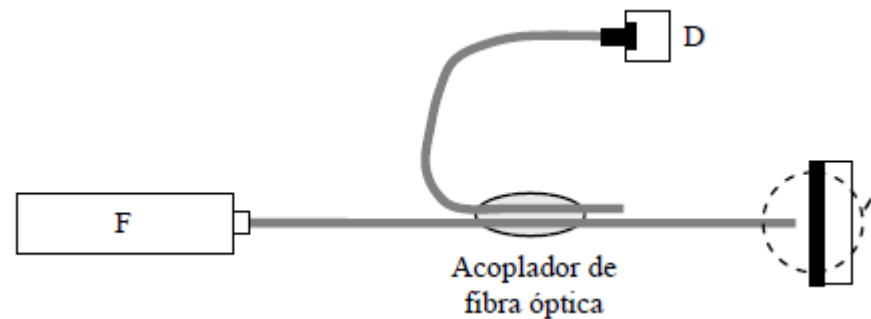
(a) Michelson



(b) Mach-Zender

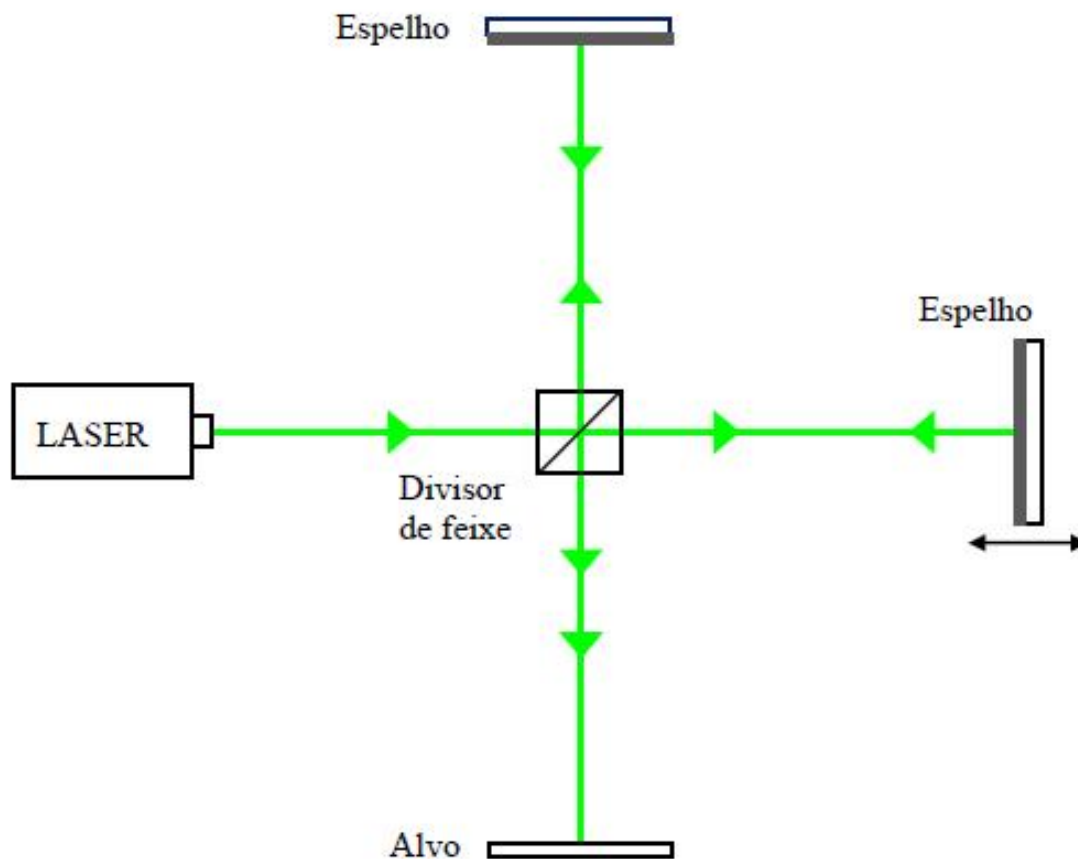


(c) Sagnac

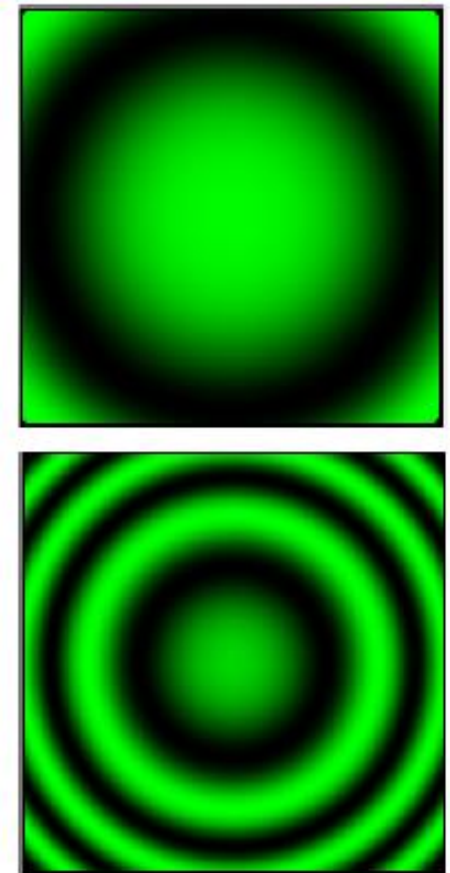


(d) Fizeau

Configurações Interferométricas básicas

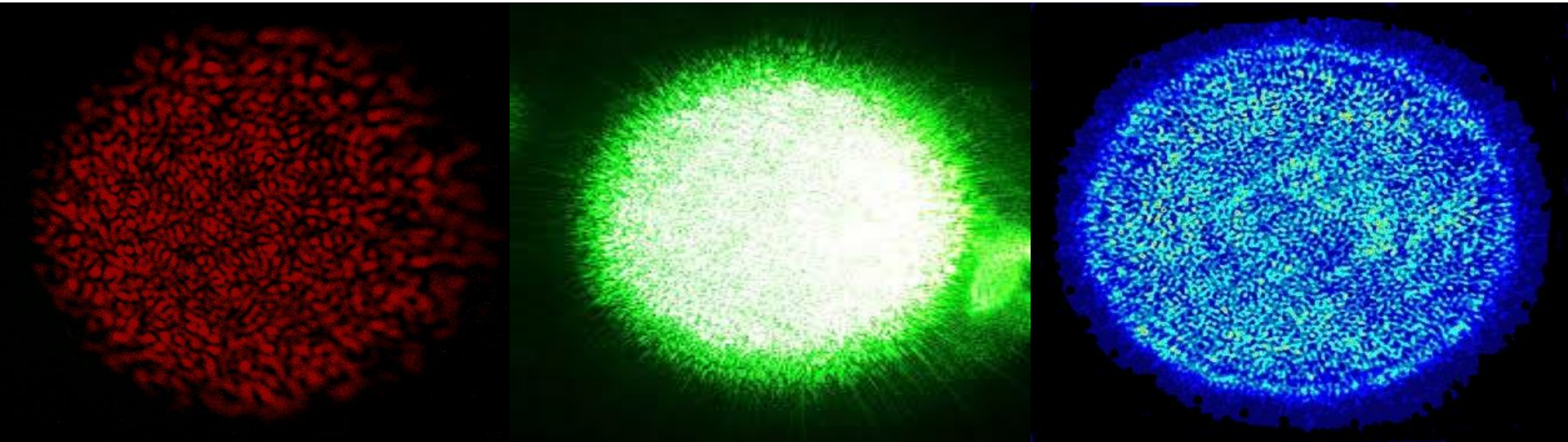


Interferômetro de Michelson.



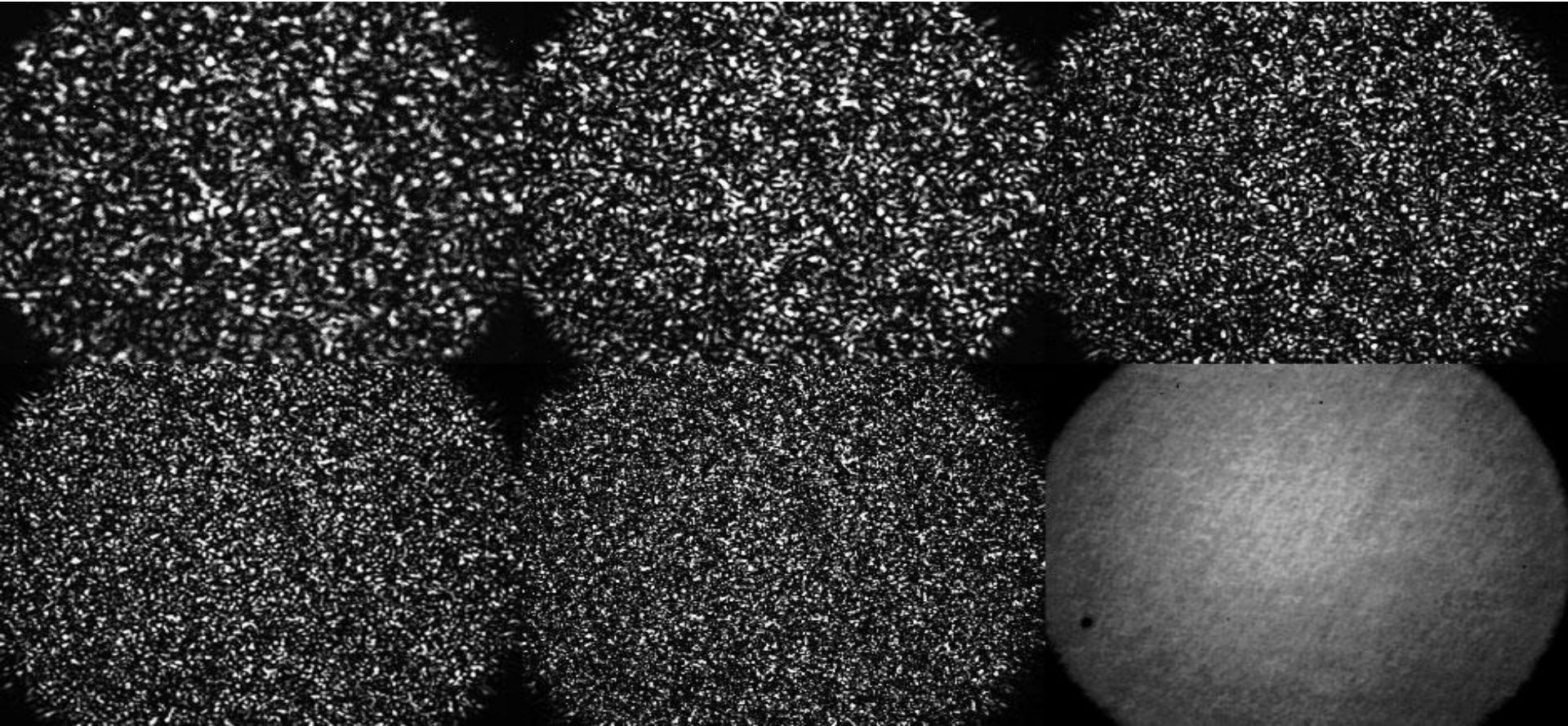
Figuras de interferência para duas posições do espelho.

O fenômeno speckle



É a uma estrutura granular formada pelo espalhamento de um feixe de luz coerente numa superfície com rugosidades da ordem do comprimento de onda incidente.

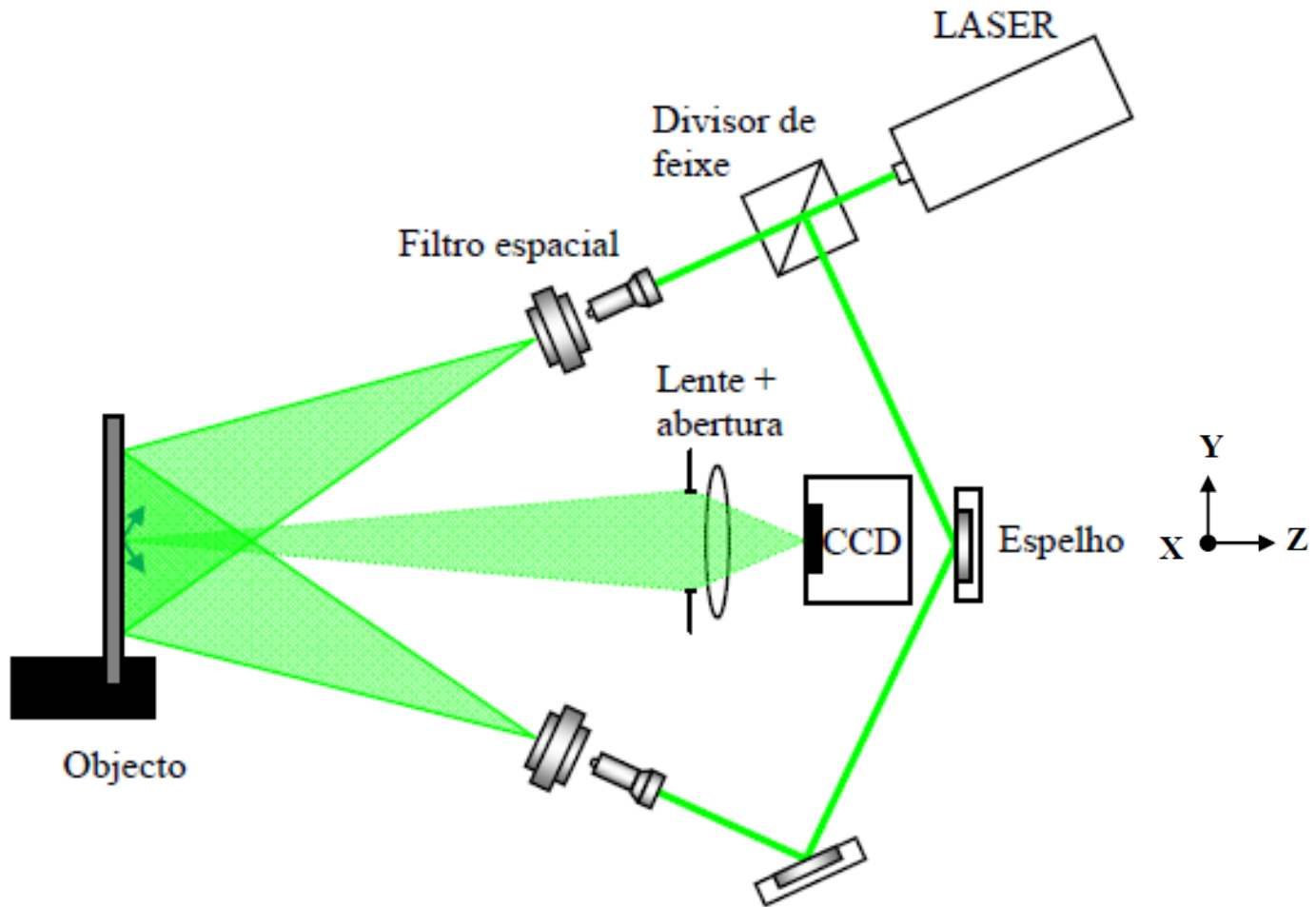
O fenômeno speckle



A escala de granulosidade aumenta com a distância de observação e com abertura numérica do sistema de observação.

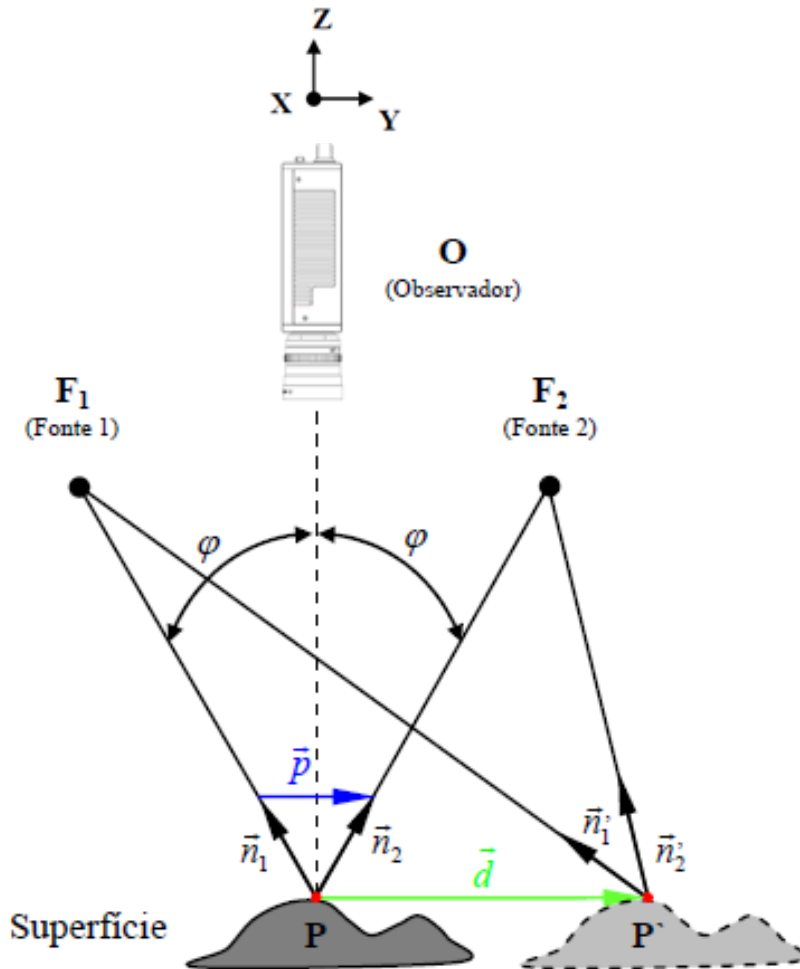
Configuração com iluminação dupla

- sensibilidade no plano, para deslocamentos paralelos à superfície do objeto



Configuração com iluminação dupla

- sensibilidade no plano, para deslocamentos paralelos à superfície do objeto



$\vec{n}_1 \rightarrow$ versor ao longo da iluminação F_1 ;
 $\vec{n}_2 \rightarrow$ versor ao longo da iluminação F_2 ;

$\vec{p} = (\vec{n}_1 - \vec{n}_2) \rightarrow$ **vetor sensibilidade**;

$\vec{d} = u\hat{i} + v\hat{j} + w\hat{k} \rightarrow$ vetor deslocamento

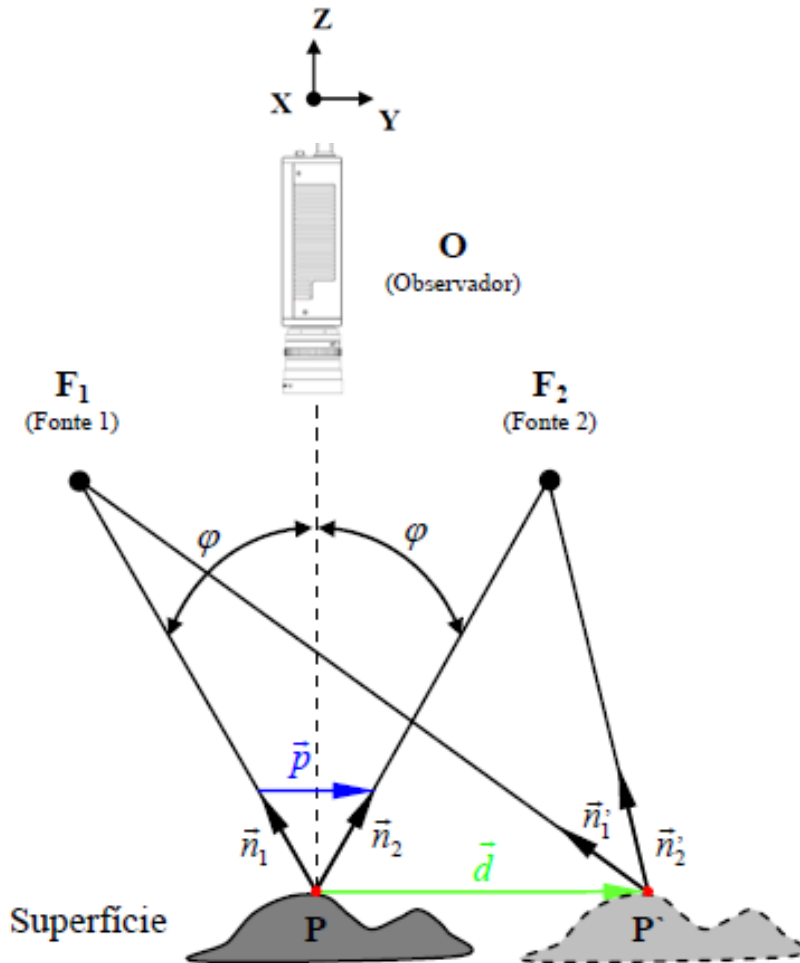
$\hat{i}, \hat{j}, \hat{k}$ são versores ao longo dos eixos,
 u e v são componentes do \vec{d} no plano
 w é o componente do \vec{d} fora do plano

$\Delta \rightarrow$ Alteração no caminho óptico.

$$\Delta = Estado_{final} - Estado_{inicial} = \vec{d} \cdot \vec{p}$$

Configuração com iluminação dupla

- sensibilidade no plano, para deslocamentos paralelos à superfície do objeto



A relação entre a variação da fase no ponto P e a deformação é dada por :

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}[\vec{p} \cdot \vec{d}]$$

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} [v(\sin\varphi_1 + \sin\varphi'_1) + w(\cos\varphi_2 + \cos\varphi'_2)]$$

Se $\varphi_1 = \varphi'_1 = \varphi$, temos

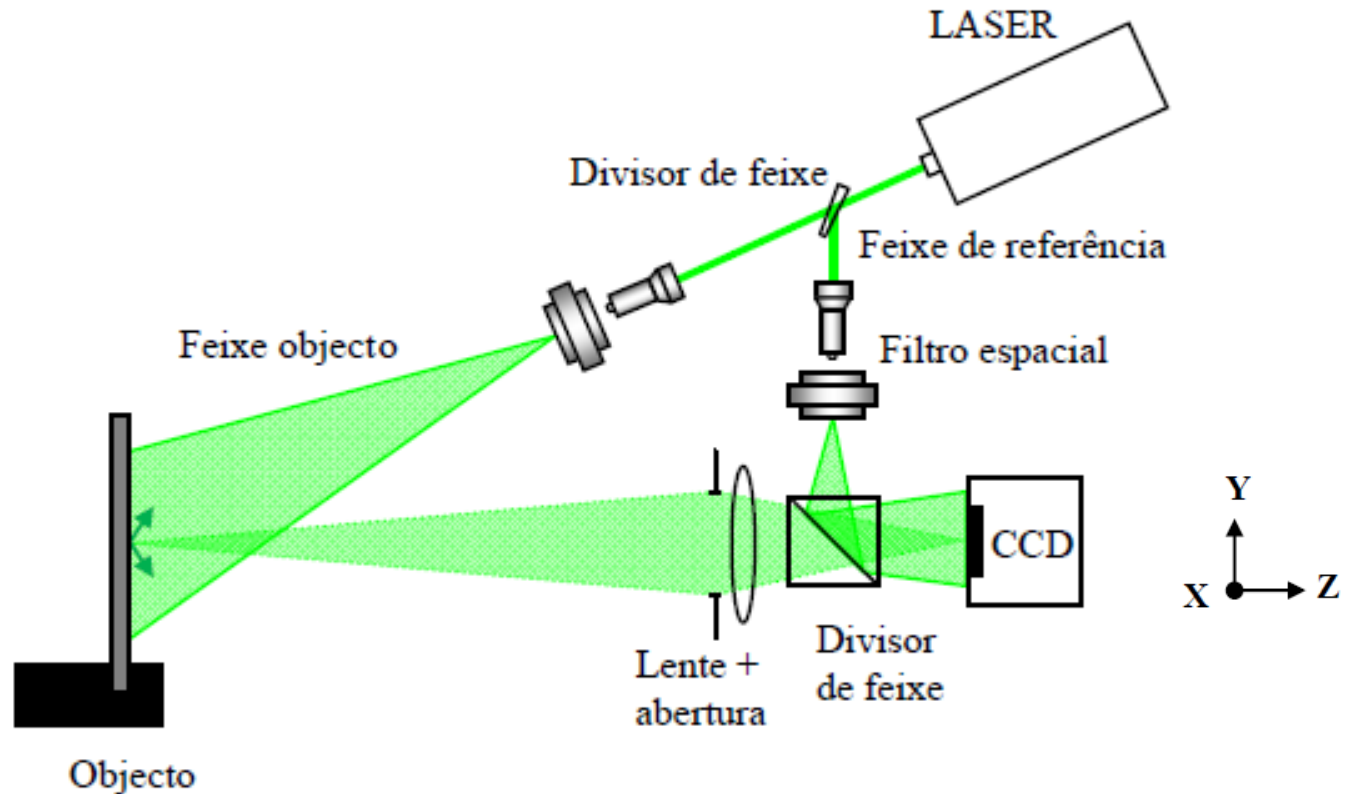
$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} v \sin \varphi$$

Sendo a Ordem da Franja $OF = \frac{\Delta\phi}{2\pi}$

$$v = \frac{1}{2} \frac{\lambda}{\sin(\varphi)} \cdot OF$$

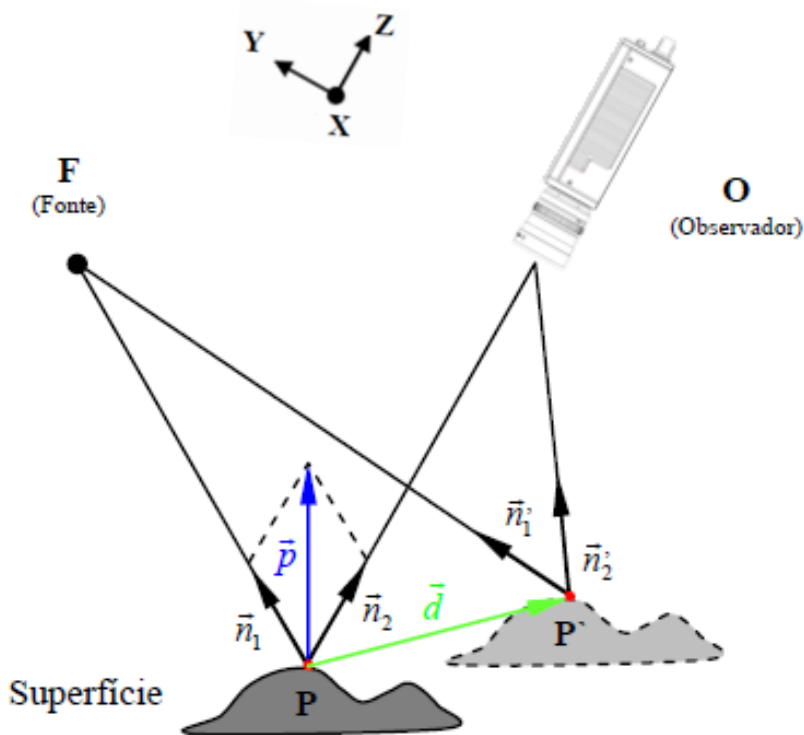
Configuração com iluminação simples

- sensibilidade fora do plano, para deslocamentos normais à superfície do objeto



Configuração com iluminação simples

- sensibilidade fora do plano, para deslocamentos normais à superfície do objeto



$\vec{n}_1 \rightarrow$ versor ao longo da iluminação F ;
 $\vec{n}_2 \rightarrow$ versor ao longo da observação O ;

$\vec{p} = (\vec{n}_2 - \vec{n}_1) \rightarrow$ **vetor sensibilidade**;

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} [\vec{p} \cdot \vec{d}]$$

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} [v(\sin \varphi_1 + \sin \varphi_2) + w(\cos \varphi_1 + \cos \varphi_2)]$$

Se $\varphi_1 = \varphi$ e $\varphi_2 = 0$, temos

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} w(1 + \cos \varphi)$$

$$w = \frac{\lambda}{[1 + \cos(\varphi)]} \cdot OF$$

Quando as direções de iluminação e observação estão ao longo da superfície normal, temos:

$$\longrightarrow w = \frac{1}{2} \lambda \cdot OF$$

Princípio da Interferometria de *Speckle*

$$\begin{cases} A_o = a_o e^{i\varphi_o} & \text{(Feixe Objeto)} \\ A_r = a_r e^{i\varphi_r} & \text{(Feixe Referência)} \end{cases}$$

Da combinação de ambos os feixes no plano de observação obtêm-se uma distribuição de intensidade:

$$I_{(x,y)} = |A_o + A_r|^2 = \boxed{a_o^2 + a_r^2} + \boxed{A_o A_r^* + A_o^* A_r}$$

Autocorrelação
de ambos os feixes

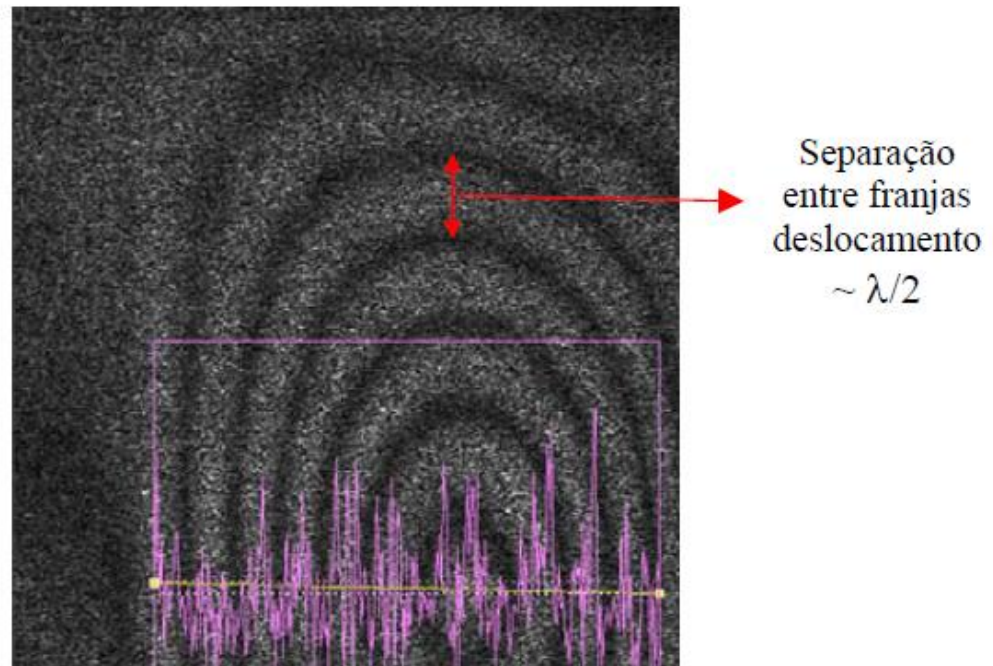
Correlação cruzada,
Informação sobre a
Superfície do objeto

Para obter franjas de interferência é necessário capturar o campo de intensidade entre dois instantes de deformação da superfície do objeto (estado referência e estado de deformação).

O valor absoluto da subtração da imagem no estado de deformação pela imagem do estado de referência origina uma imagem com franjas de interferência.

A correlação dos padrões interferométricos pode ser realizada com uma das seguintes técnicas:

- **Tempo Real;**
- **Tempo médio ou media temporal** (*time average*);
- **Dupla exposição;**



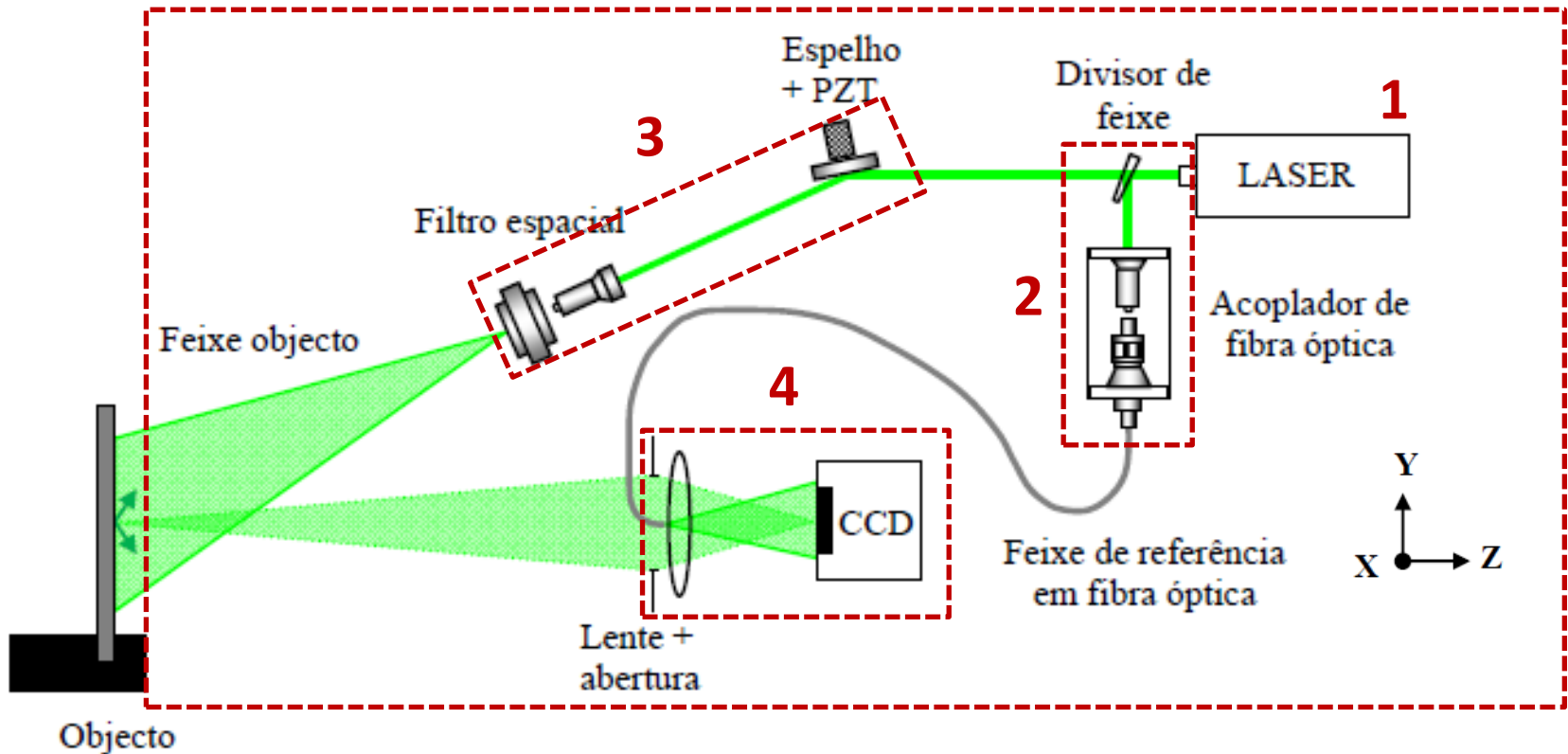
Construção da técnica ESPI

Prof. Nilson E. Souza Filho

Pós Doutorado PGF-UEM-2015

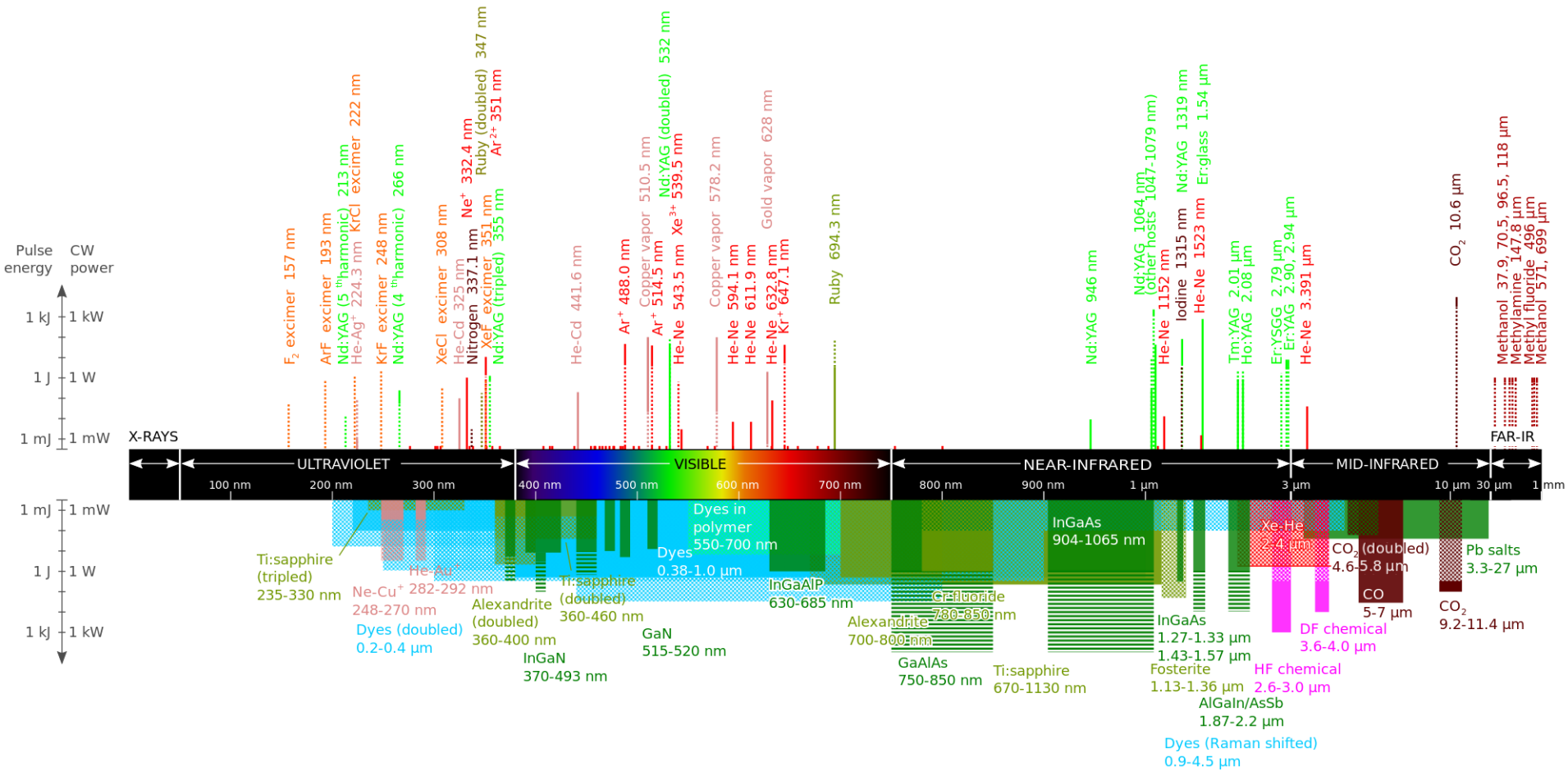


ESPI “portátil” com sensibilidade fora do plano



- 1 – Fonte de luz coerente
- 2 – Sistema divisor de feixe (FO, FR) e acoplamento
- 3 – Sistema de variação do caminho óptico do FO
- 4 – Sistema de formação de imagem (controle da dimensão do *speckle*)
- 5 – ESPI “portátil” com sensibilidade fora do plano
- 6 – Técnicas ESPI

1 – Fonte de Luz Coerente



1 – Fonte de Luz Coerente

Testes com

$\lambda = 532\text{nm}$

Potência máx 45mW

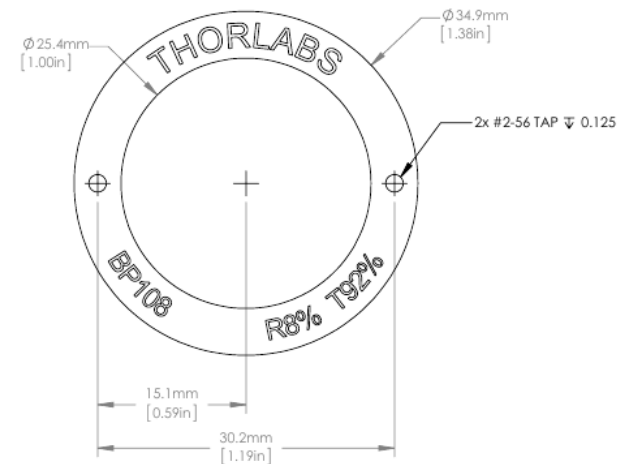
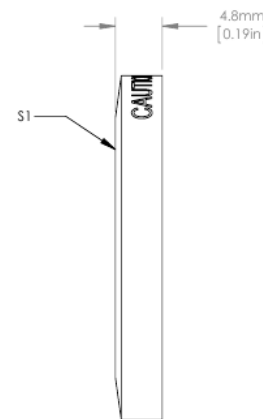
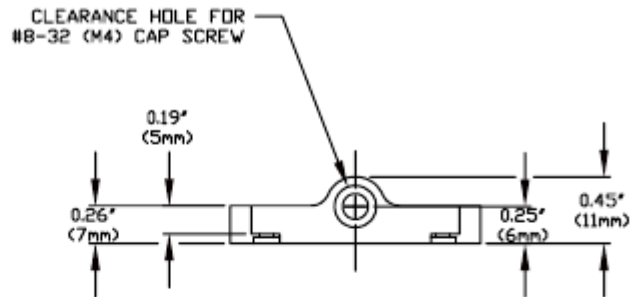
Testes com

$\lambda = 450\text{ nm}$

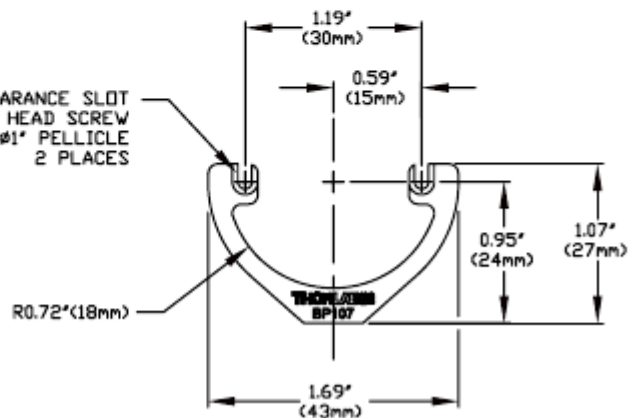
Potência máx 0.8 W

2 – Sistema divisor de feixe e acoplamento

2.1 - Componentes



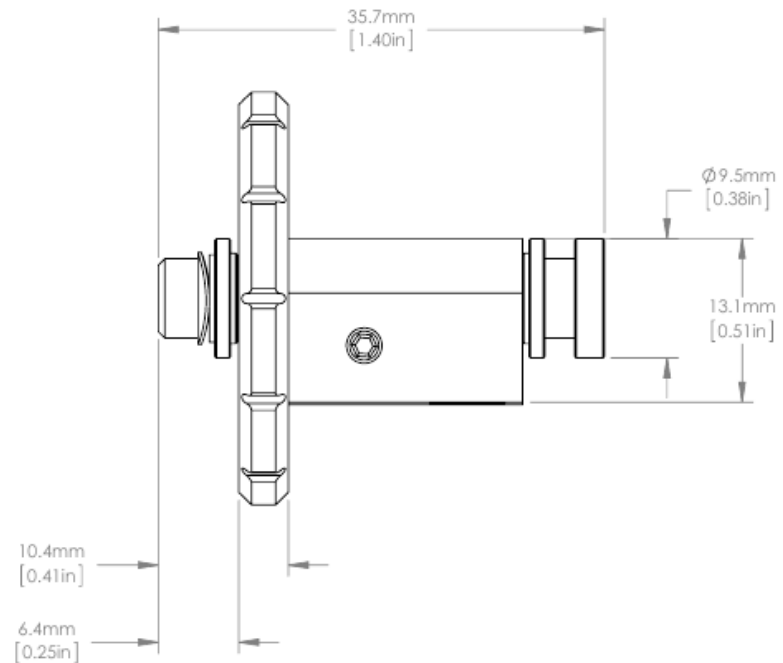
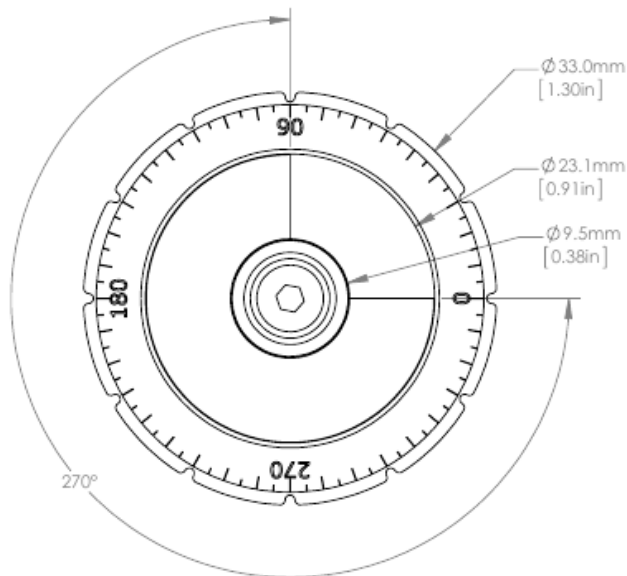
CLEARANCE SLOT FOR #2-56 BUTTON HEAD SCREW TO ATTACH BP100 SERIES Ø1" PELLICLE 2 PLACES



2 – Sistema divisor de feixe e acoplamento

2.1 - Componentes

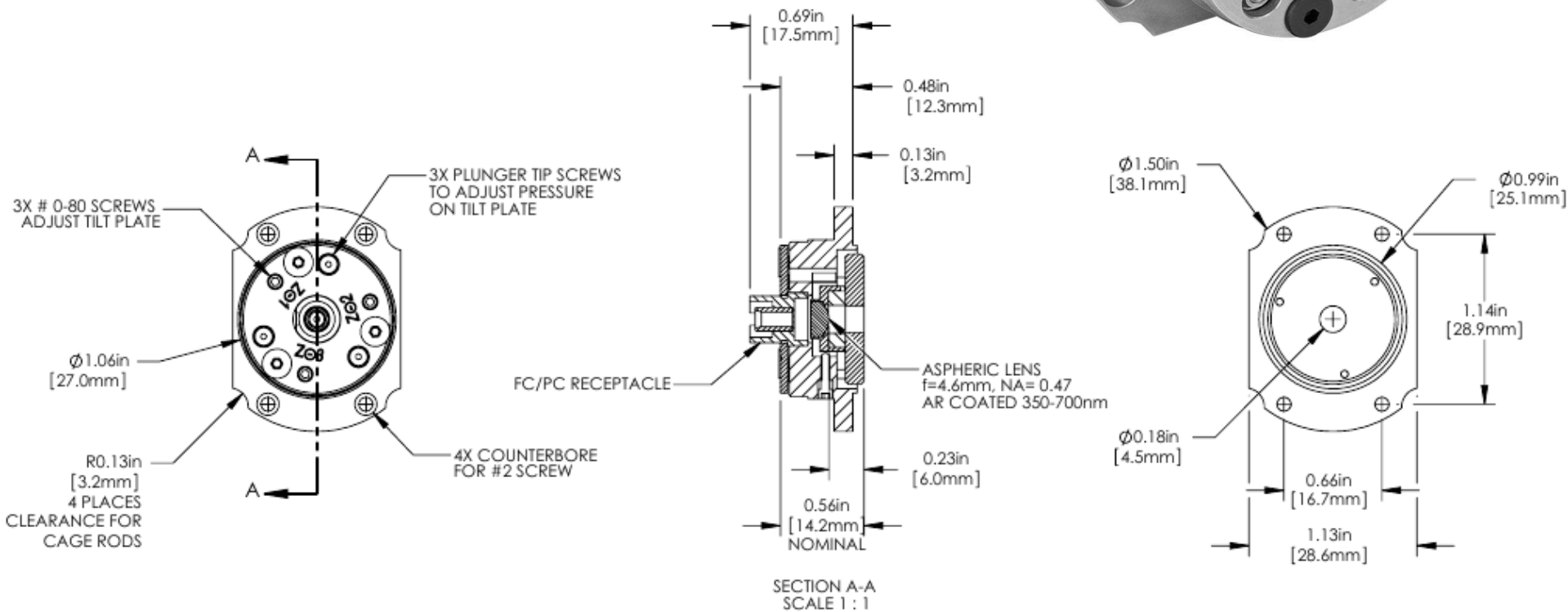
- Filtro de densidade neutra (Thorlabs NDC-25C-2M)

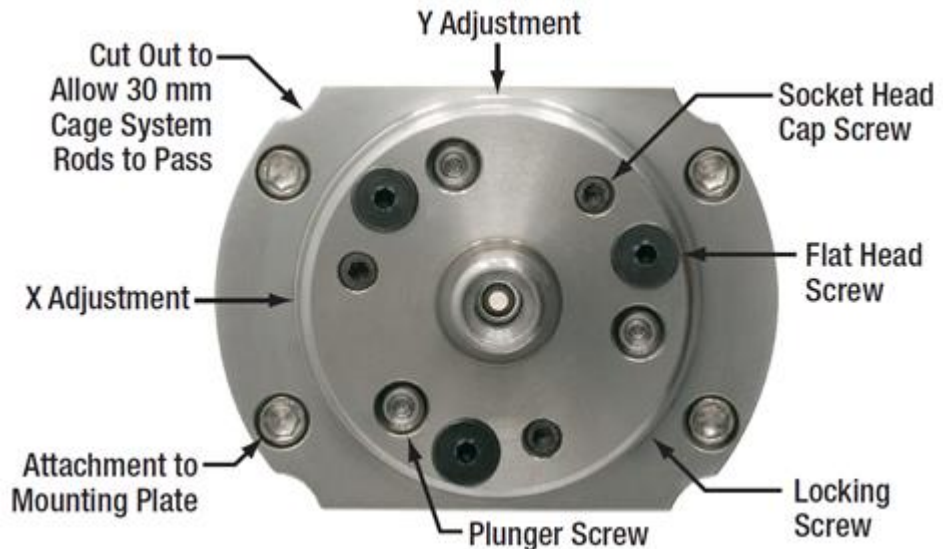
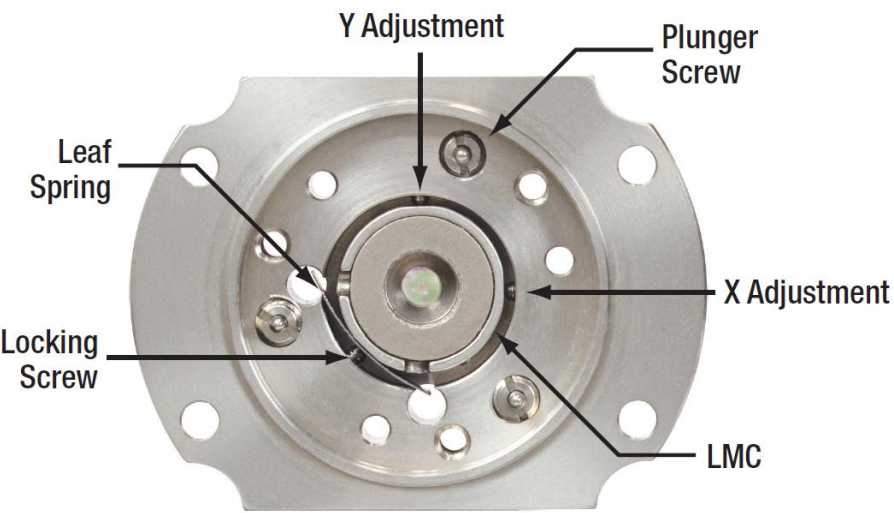
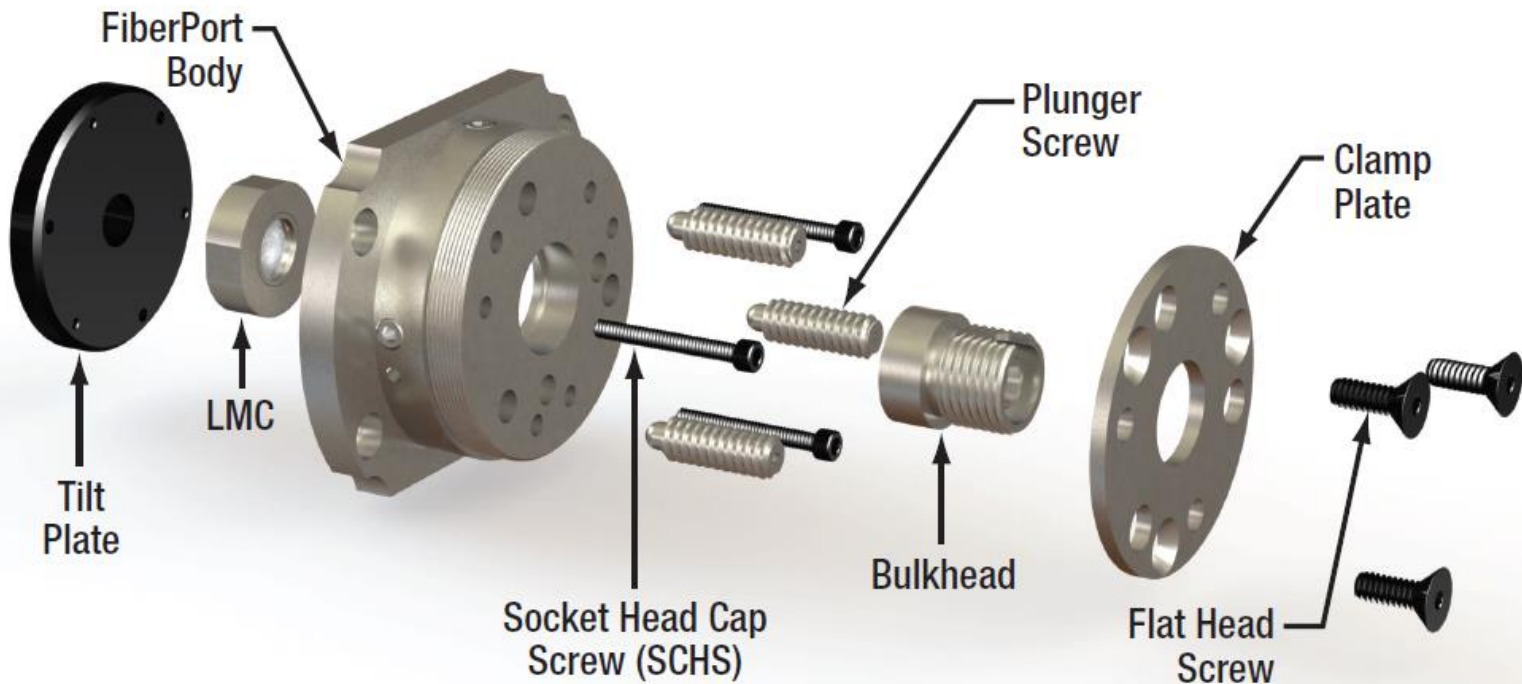


2 – Sistema divisor de feixe e acoplamento

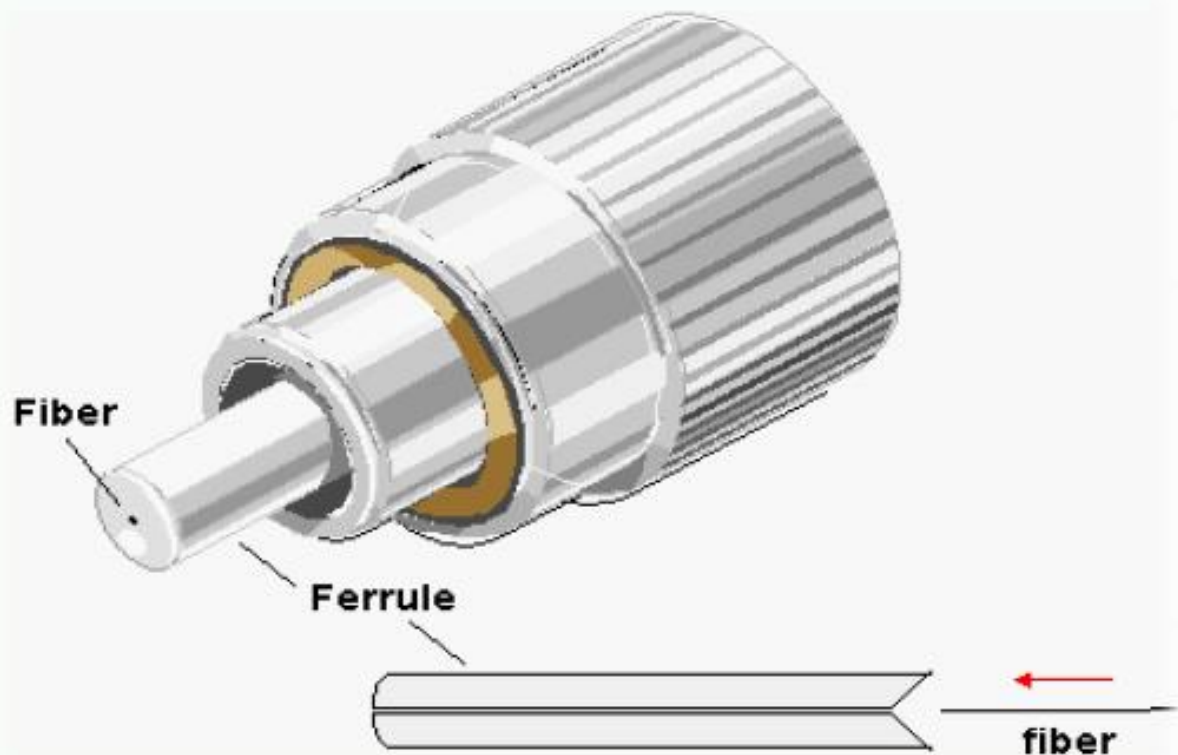
2.1 - Componentes

- Acoplador de fibra óptica (Thorlabs PAF-X-5-A)





Anatomy of a fiber connector



- DIN (LSA)
- FSMA
- ST
- SC
- FC
- LSH (E2000)
- LC
- MU
- MT-RJ
- MPO
- LIGHTRAY MPX
- SMC

2 – Sistema divisor de feixe e acoplamento

2.1 - Componentes

- Cabos de Fibra óptica

Fibra SM, Thorlabs 460HP

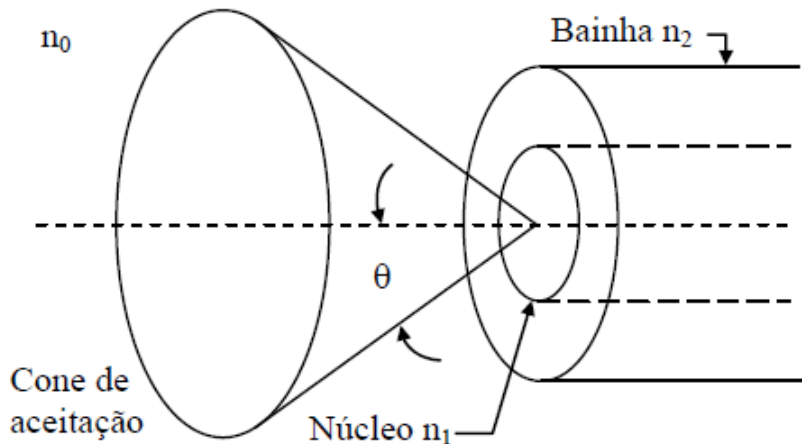
Conectores:

FC/PC – Ceramic Ferrule, 1.25 mm (FR)

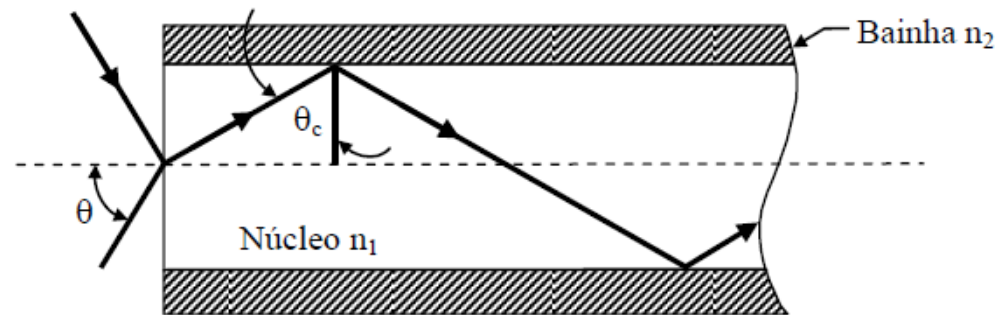
FC/PC – FC/PC (FO)



$$\text{sen } \theta = \frac{1}{n_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

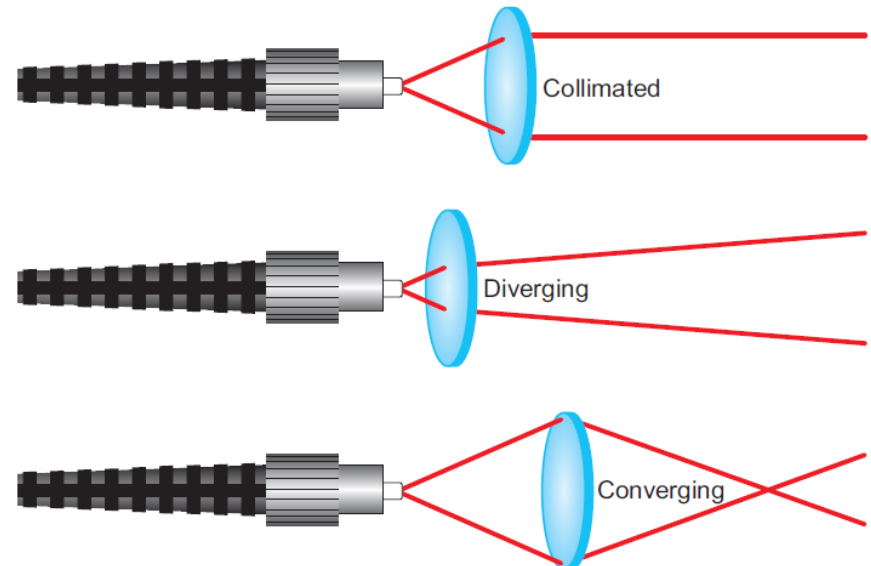
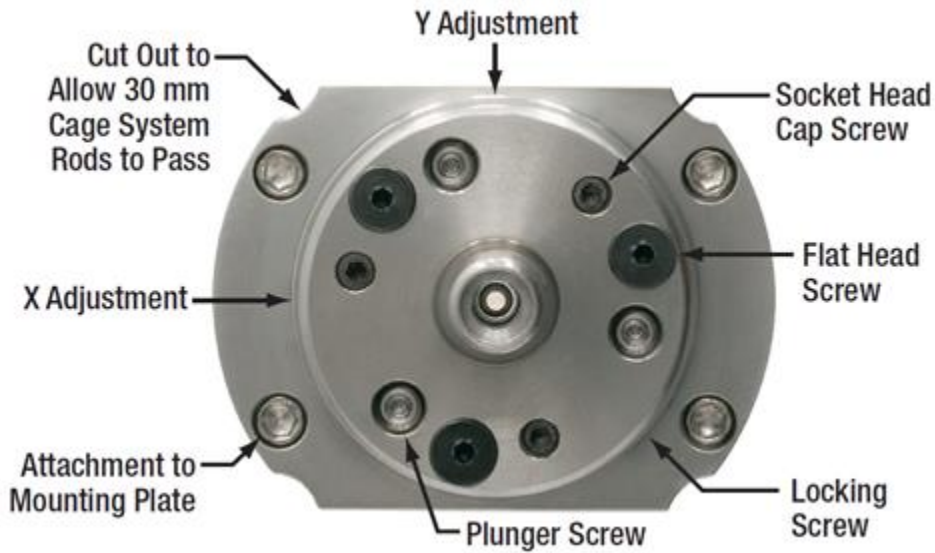
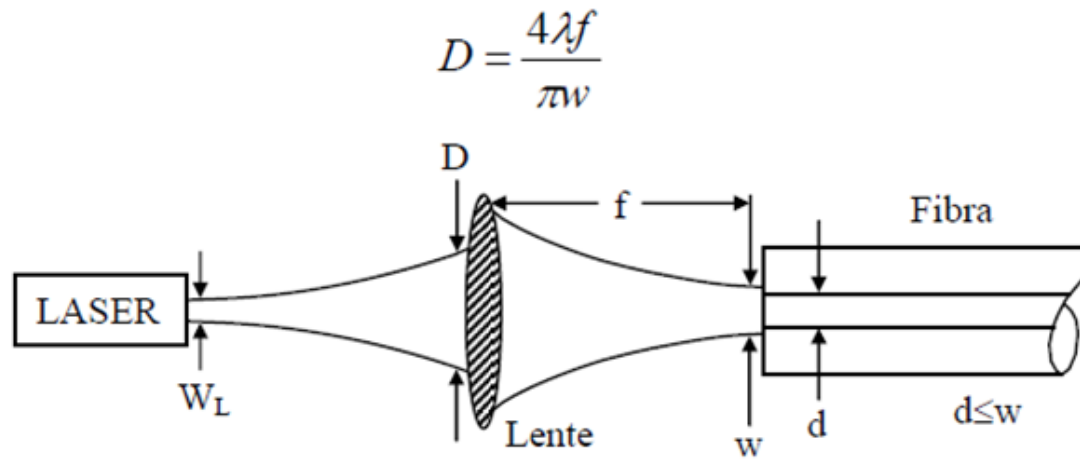


$$\theta_c = \arcsen \frac{n_2}{n_1}$$



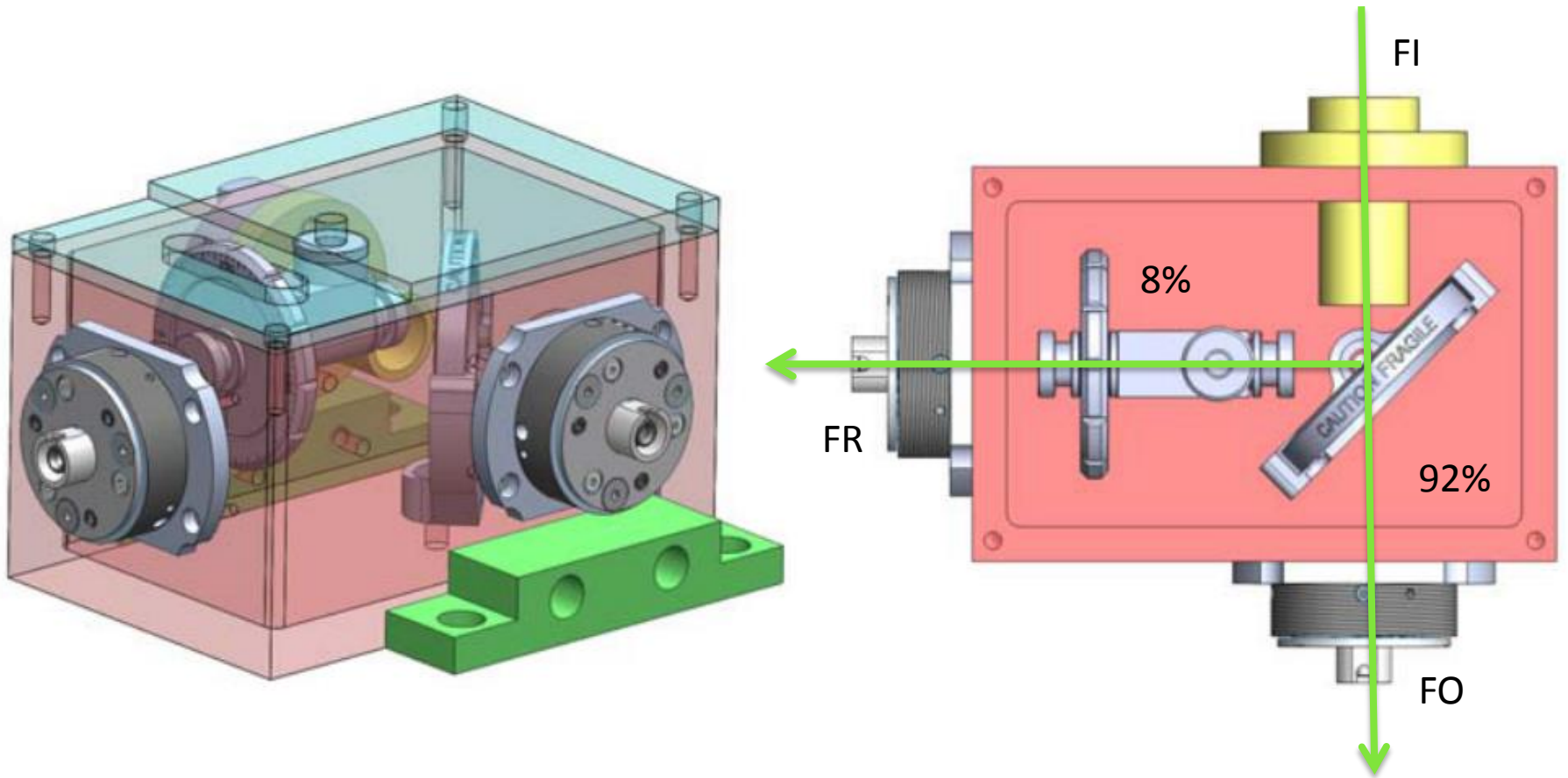
2 – Sistema divisor de feixe e acoplamento

2.2 – Alinhamento com a fibra óptica



2 – Sistema divisor de feixe e acoplamento

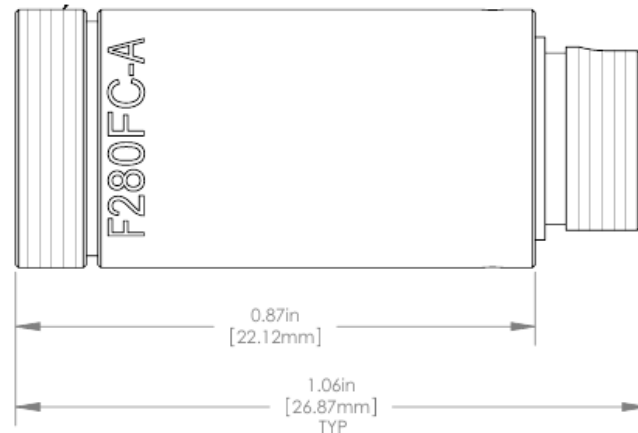
2.3 – Desenho técnico final



3 – Sistema de variação do caminho óptico do FO

3.1 - Componentes

- Colimador para fibra óptica
(Thorlabs F280FC-A)



Lente Asférica

Conector FC/PC



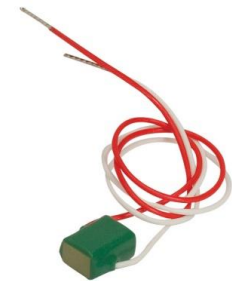
3 – Sistema de variação do caminho óptico do FO

3.1 - Componentes

I. SPECIFICATIONS

Displacement at Maximum Drive Voltage:	4.6um +/- 1.5
Maximum Drive Voltage (short term):	150volts (apply positive voltage to red lead, reverse bias will destroy this device)
Displacement at Recommended Drive Voltage:	3.0um +/- 1.5
Recommended Drive Voltage:	100 volts
Operating Temperature Range:	-25 to + 85°C
Capacitance:	0.09µF +/- 20%
Clamping Force:	200 N
Tensile Strength:	20 N
Resonant Frequency:	261 KHz (no mechanical load)
Young's Modulus:	4.4 x 10 ¹⁰ N/m ²
Recommended Preload:	<100 N

AC or Pulsed operation causes the device the generate heat



- **Assemblagem: Suporte+PZT+Espelho**
(Thorlabs AE0203D04F)
(Thorlabs PF05-03-F01)



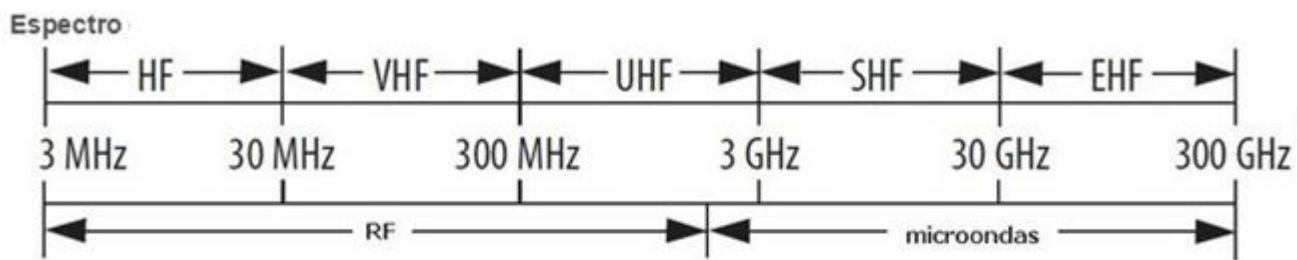


Gráfico de conectores

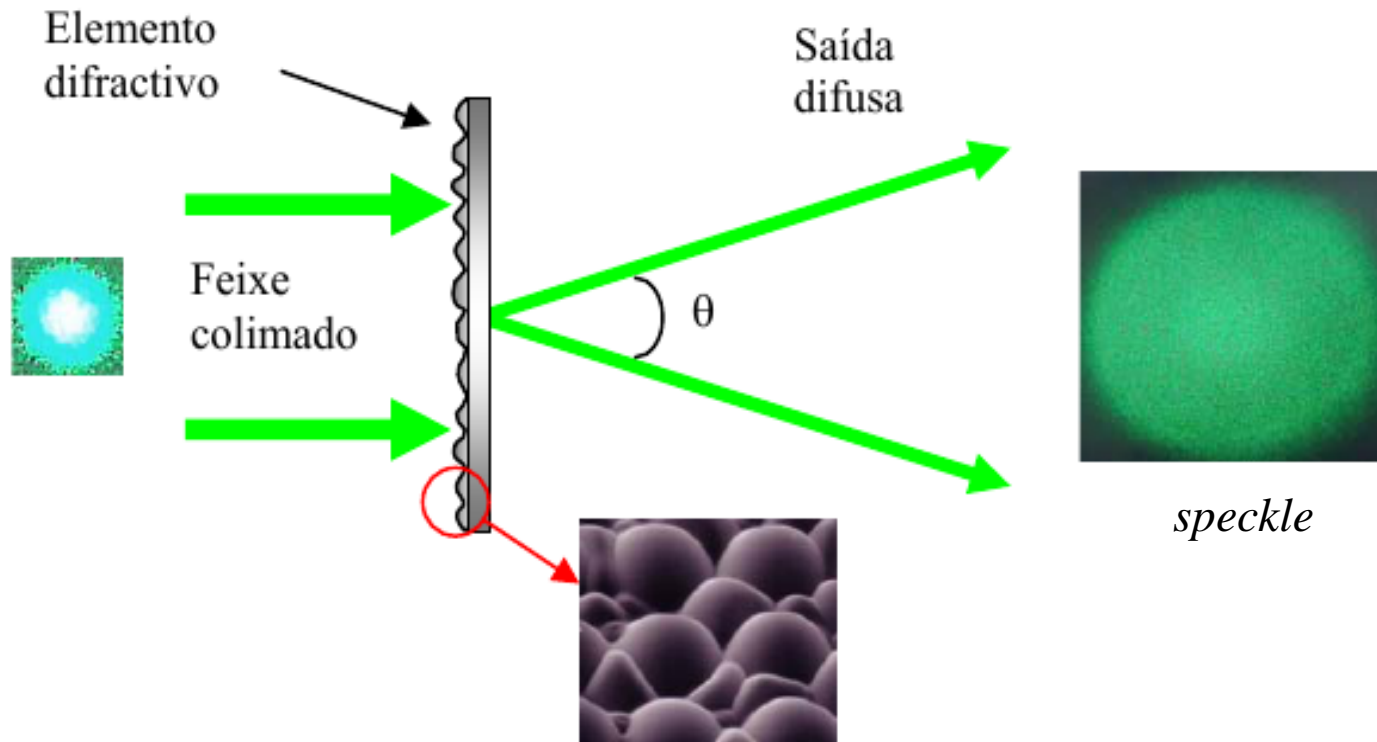


- Cabo, SMA-BNC (Thorlabs CA2848)
- Gerador de Funções

3 – Sistema de variação do caminho óptico do FO

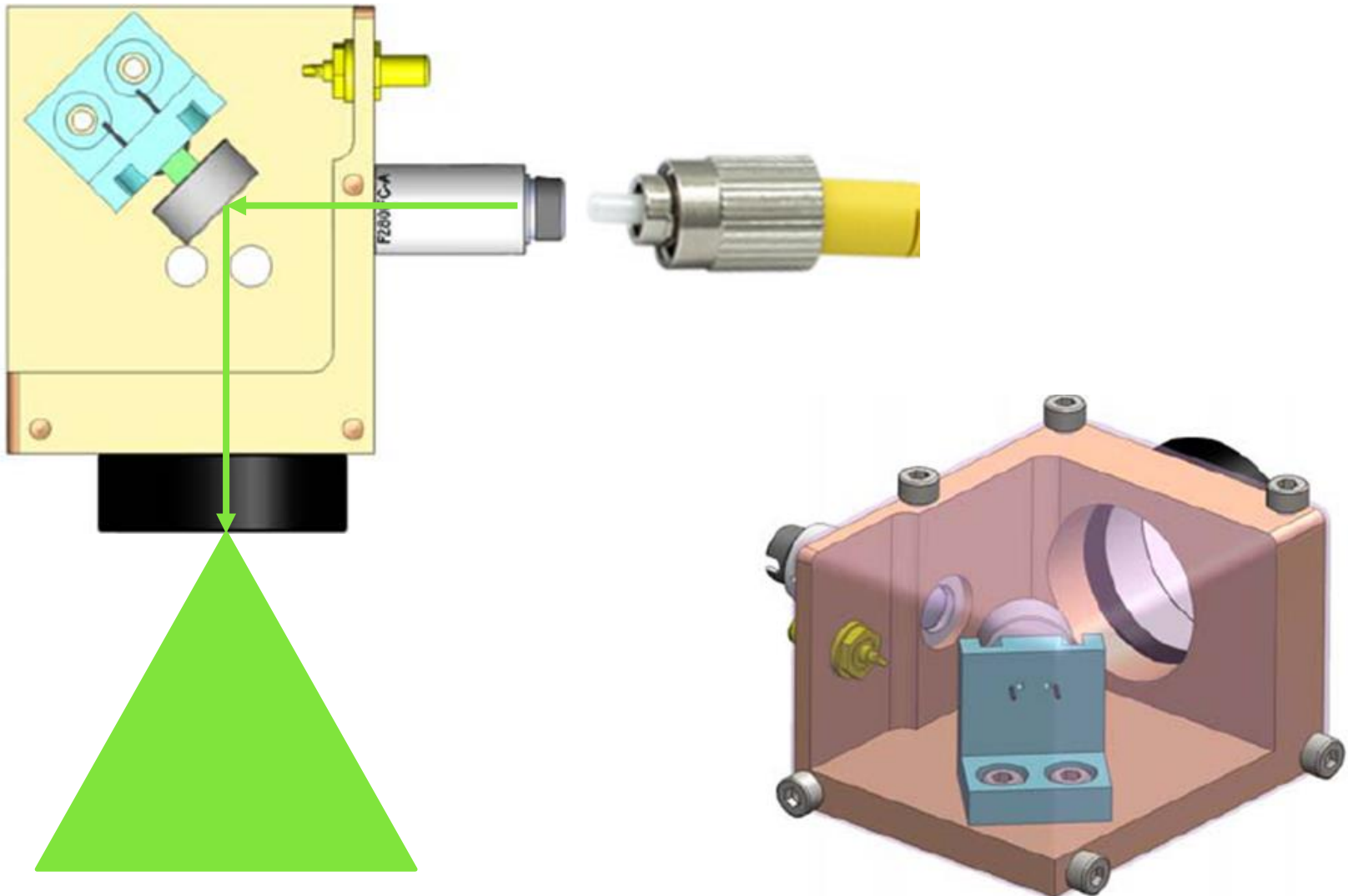
3.1 - Componentes

- Difusor tipo *top-hat*
(Thorlabs ED1-C20-MD)



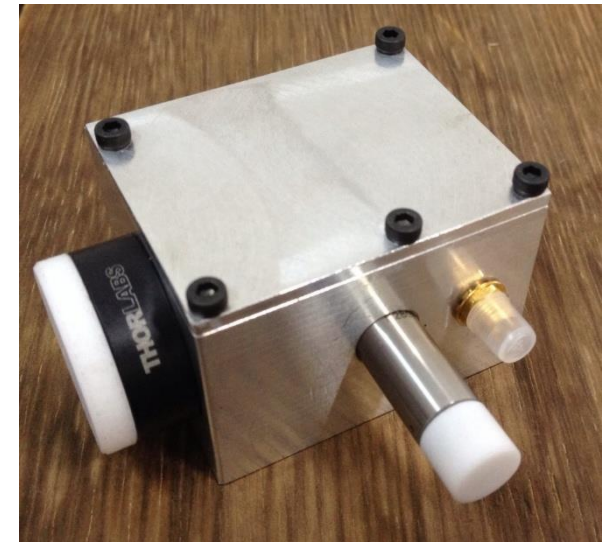
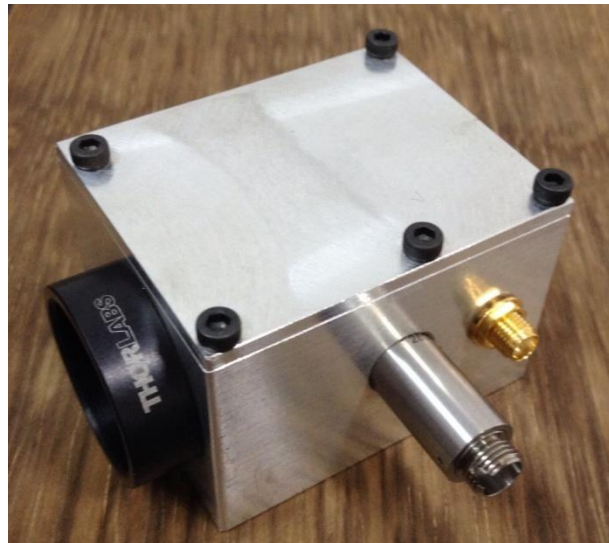
3 – Sistema de variação do caminho óptico do FO

3.2 – Desenho técnico final



3 – Sistema de variação do caminho óptico do FO

3.3 – Fotos do sistema montado



4 – Sistema de formação de imagem

4.1 - Componentes

Semicondutor de óxido metálico complementar (CMOS)



Touptec – L3CMOS14000KPA

Sensor size:

6.451 x 4.503 mm

Resolutions:

(Ultra-High definition)

4096 x 3286 → 6.2 fps

2048 x 1644 → 20.8 fps

1024 x 822 → 53.3 fps

Pixel size:

1.4 x 1.4 μm

Spectral range: 380 – 650 nm
(com filtro IR)

Mode Scan: Progressive

Capture/Control:

Native C/C++ & LabView

Microelectronics Journal 37 (2006) 433–451

Review of CMOS image sensors

M. Bigas^a, E. Cabruja^{a,*}, J. Forest^b, J. Salvi^b

Optics & Laser Technology 35 (2003) 587–595

CMOS vs. CCD sensors in speckle interferometry

ICEM12- 12th International Conference on Experimental Mechanics
29 August - 2 September, 2004 Politecnico di Bari, Italy

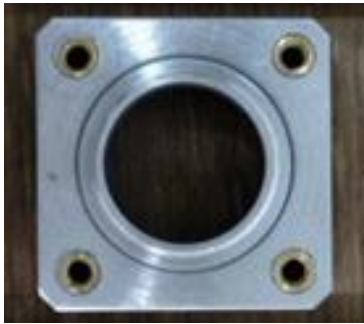
Speckle interferometry using a CMOS-DSP camera for static and dynamic deformation measurements

M.V. Aguanno^{a,b}, F. Lakestani^b, M.P. Whelan^b, M.J. Connelly^a

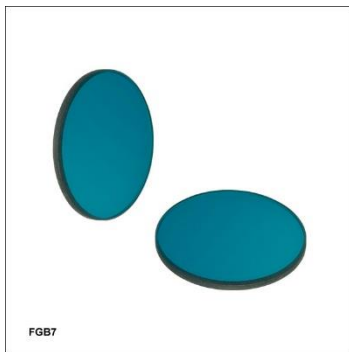
4 – Sistema de formação de imagem

4.1 - Componentes

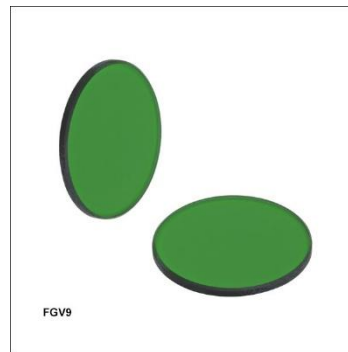
- Peça com rosca C-Mount e “prisioneiros”



- Filtros de banda passante:



FGB7 → 435-500 nm



FGV9 → 485-565 nm

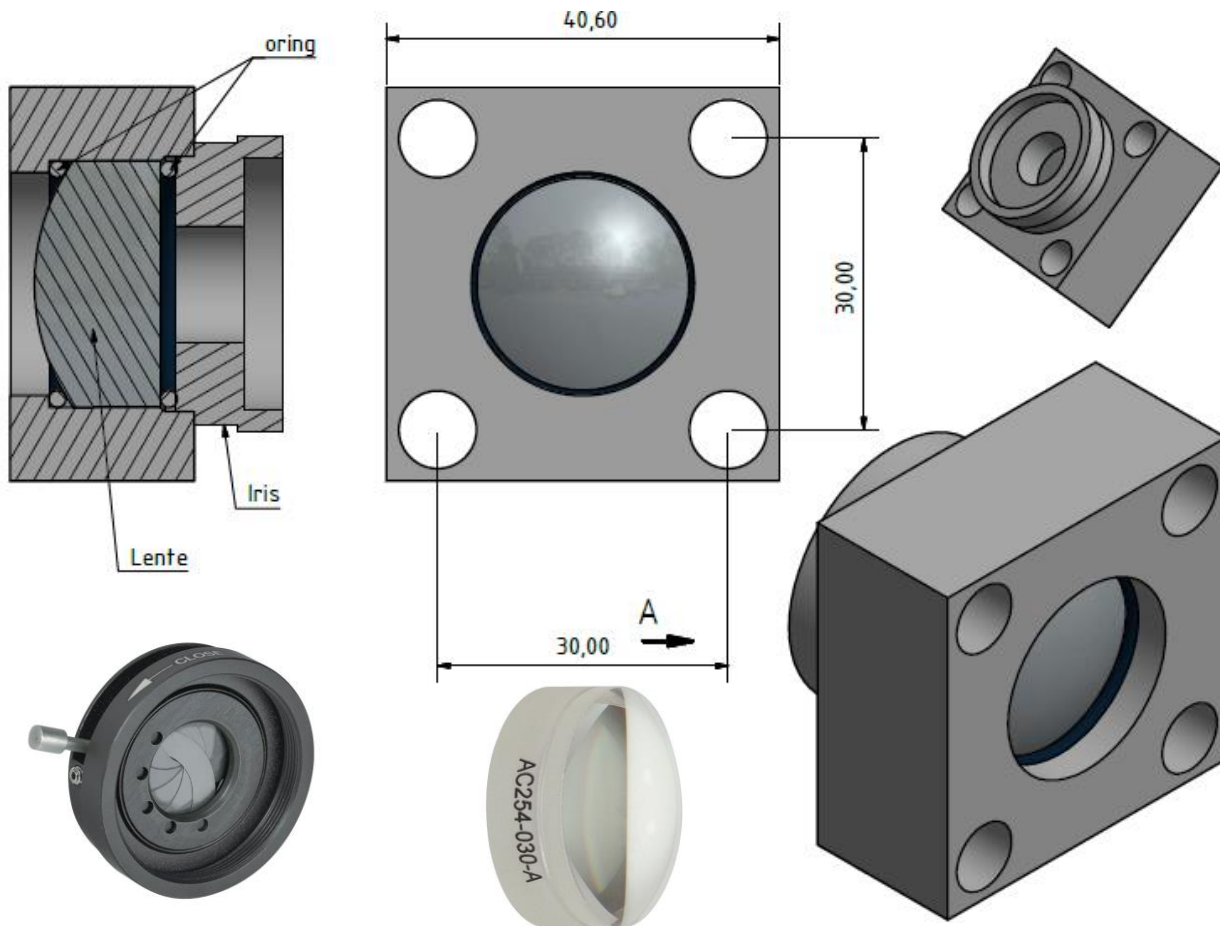


FGS600 → 330-665 nm

4 – Sistema de formação de imagem

4.1 - Componentes

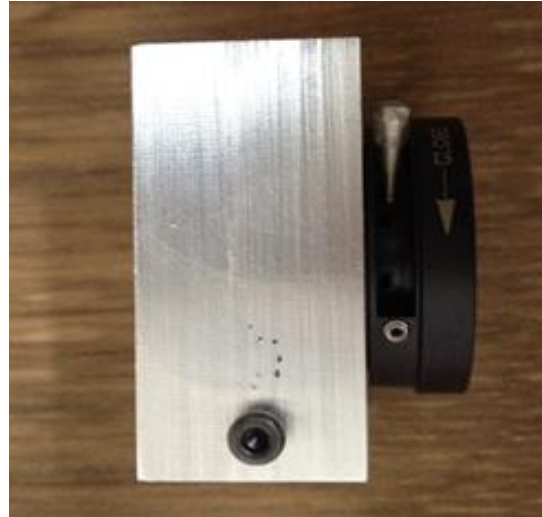
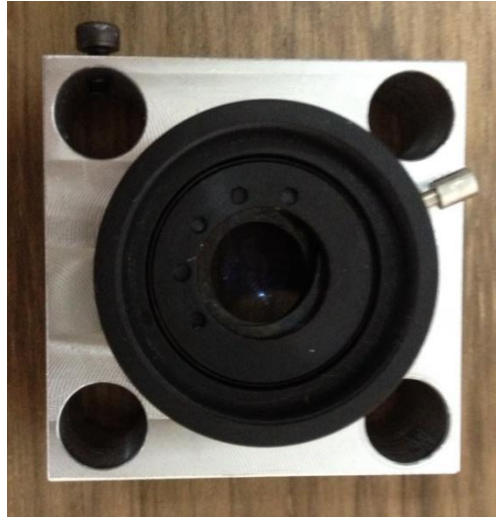
- Peça para controle da dimensão do *speckle* no CMOS
- Lente acromática da Thorlabs AC254-030-A
- Íris diafragma da Thorlabs SM1D12SZ



4 – Sistema de formação de imagem

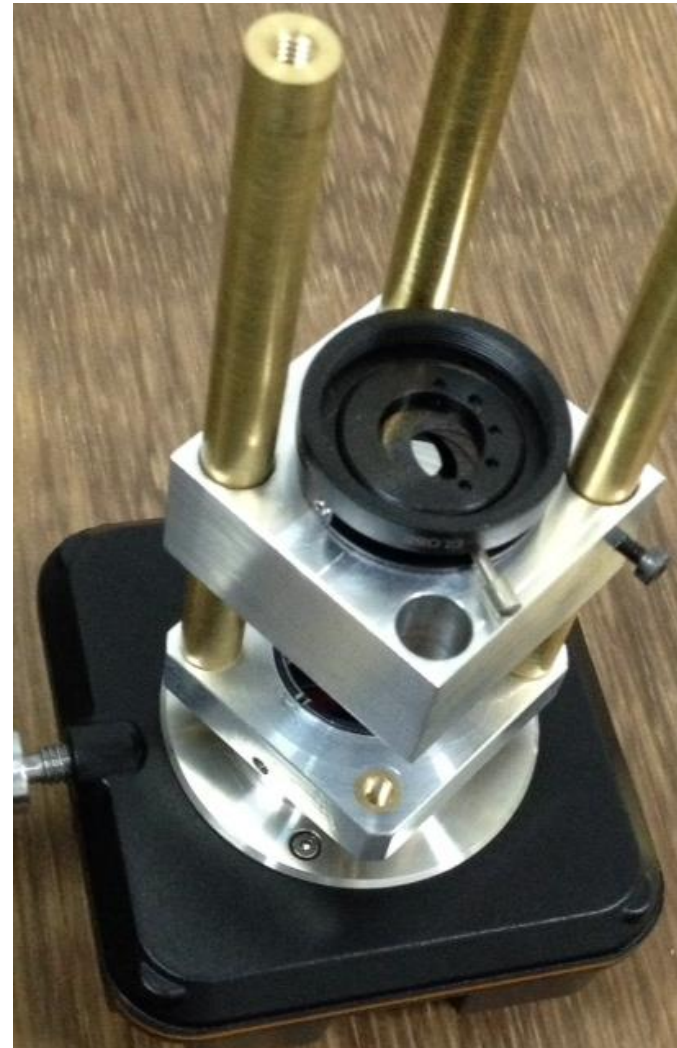
4.1 - Componentes

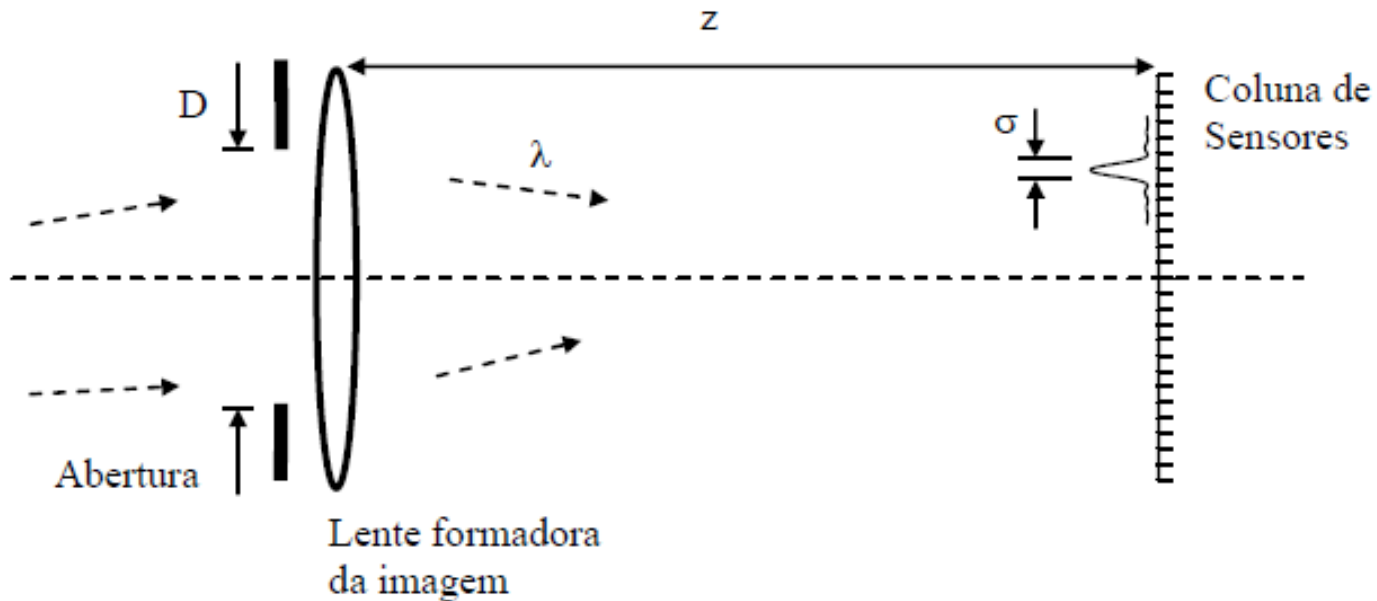
- Peça para controle da dimensão do *speckle* no CMOS



4 – Sistema de formação de imagem

4.3 – Fotos do Sistema montado





Tamanho médio dos *speckles* na imagem é controlado pela abertura D de raio ρ

$$\delta x = \delta y = 0.61 \frac{\lambda f}{\rho}$$

PIXEL SIZE:
1.4 x 1.4 μm

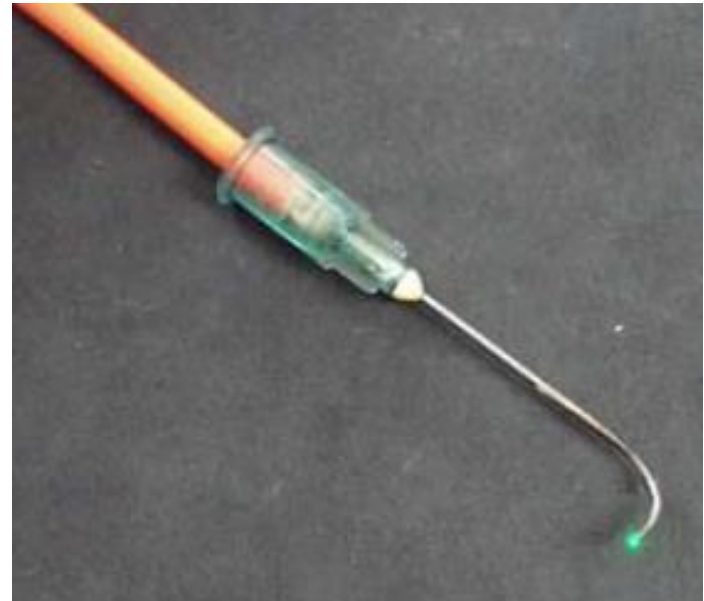
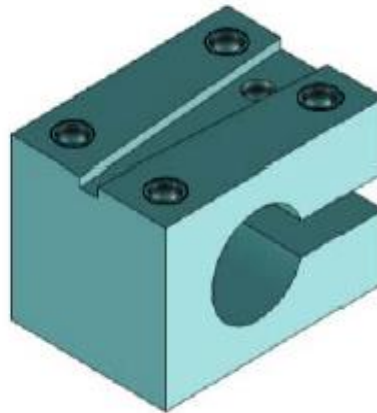
FOCAL LENGTH:
30.0 mm \pm 1%

$$R_I(r) = \langle I \rangle^2 \left[1 + 2 \left| \frac{J_1\left(\frac{\pi D r}{\lambda z}\right)}{\frac{\pi D r}{\lambda z}} \right|^2 \right],$$

4 – Sistema de formação de imagem

4.1 - Componentes

- “Cachimbo” para direcionar a saída da fibra na Cam.





Single Mode Fiber

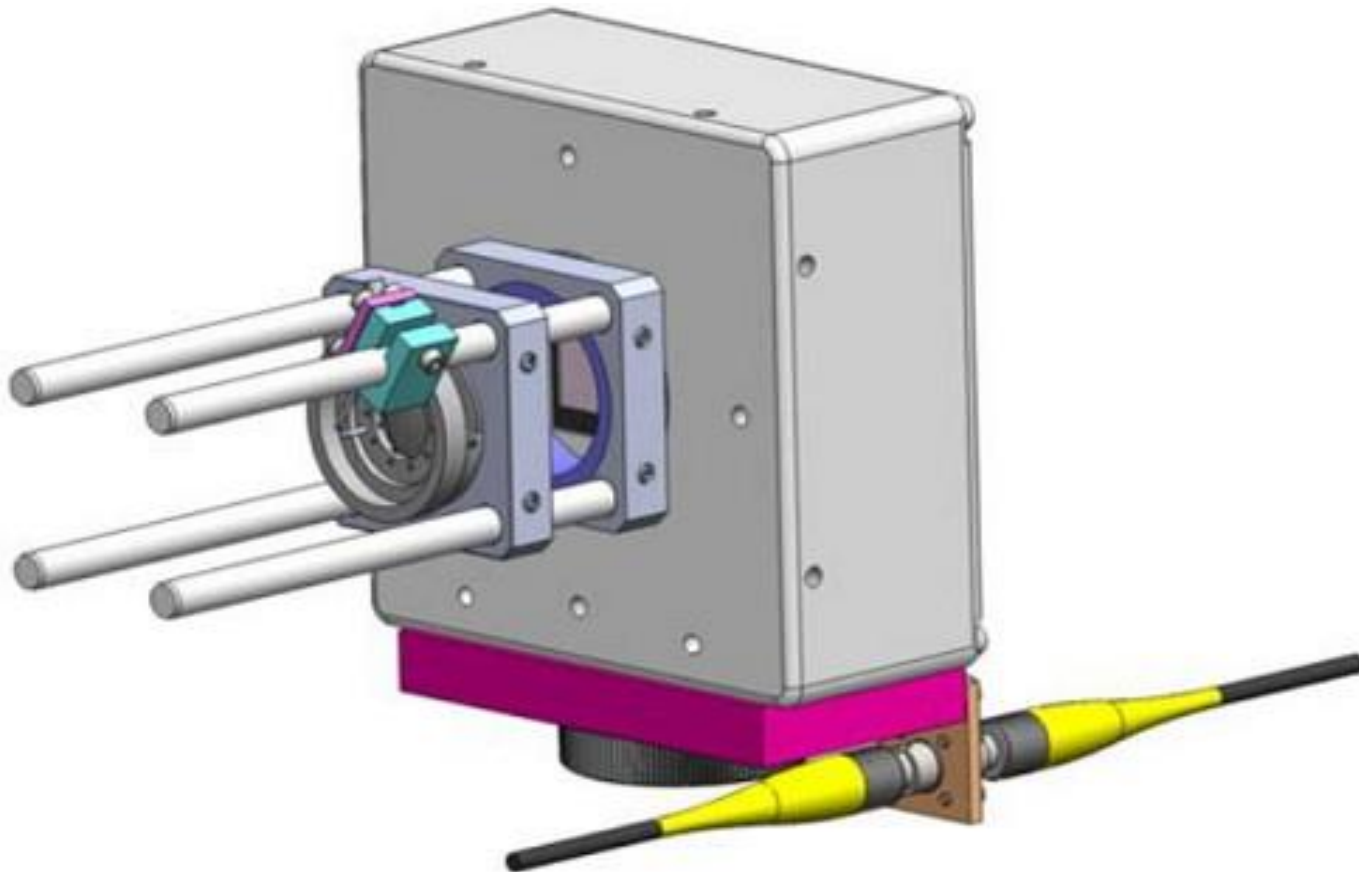
CF126-10
Ceramic Ferrule

ADAF1 Mating Sleeve

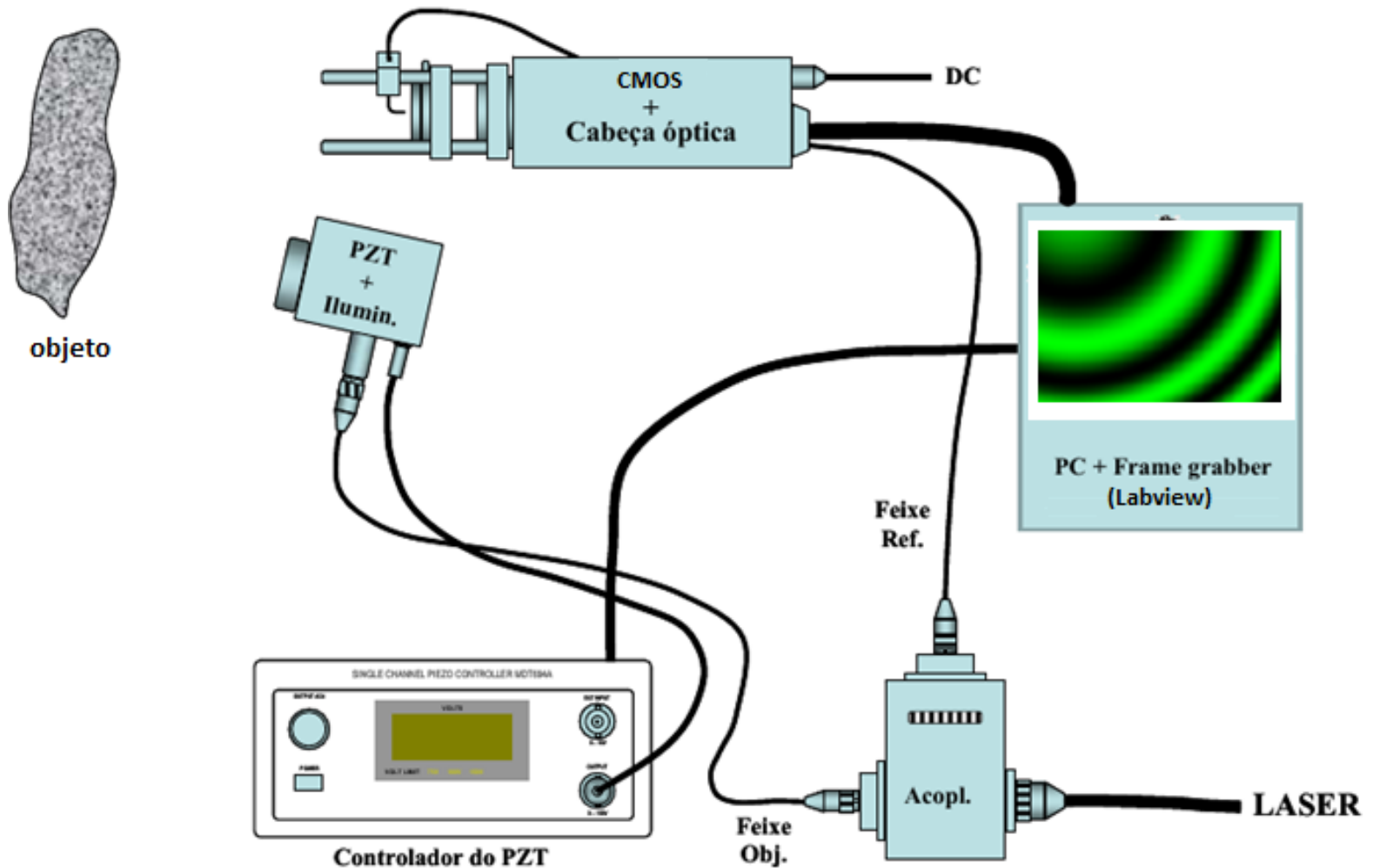
Custom Ceramic Cannula

4 – Sistema de formação de imagem

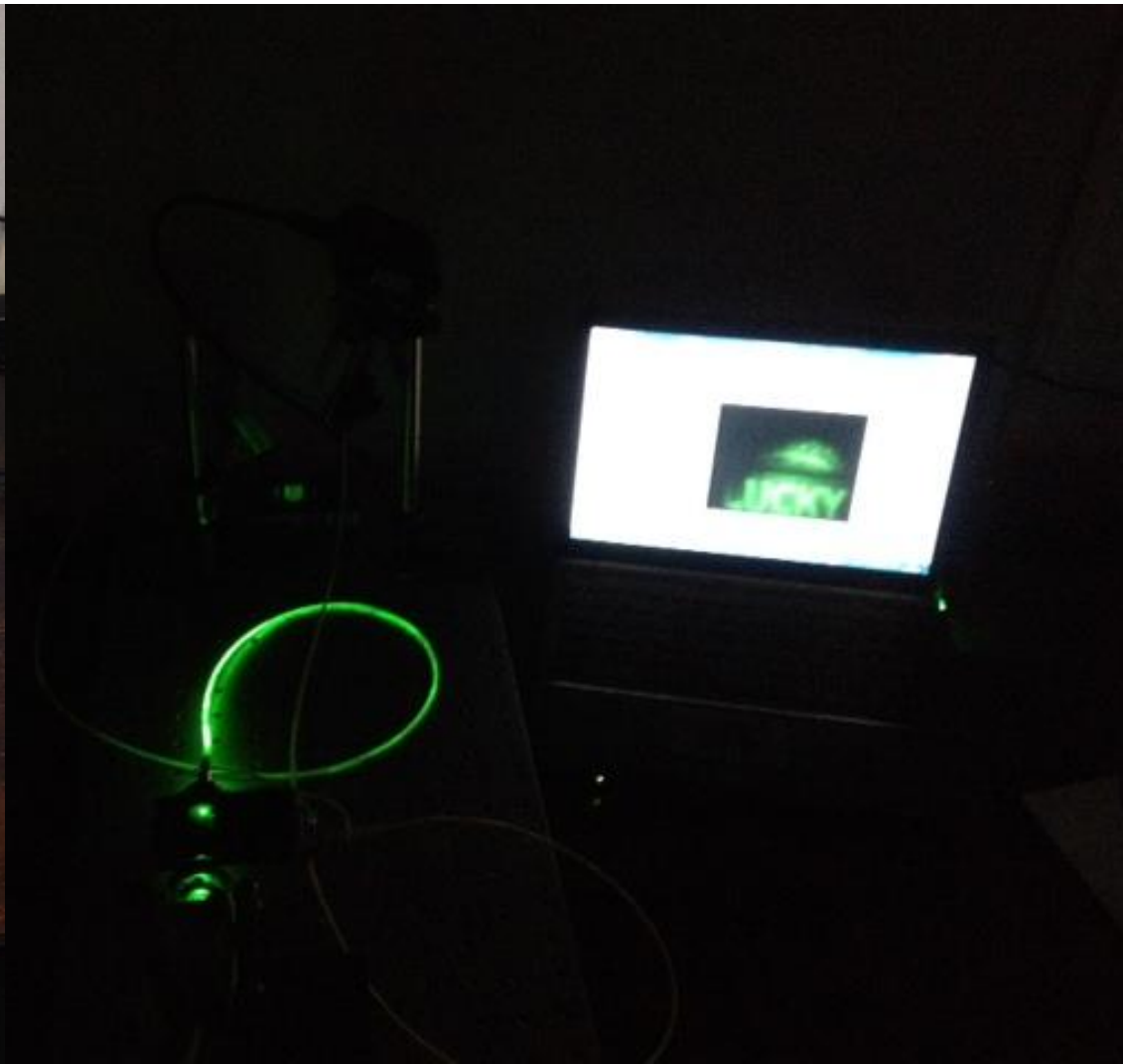
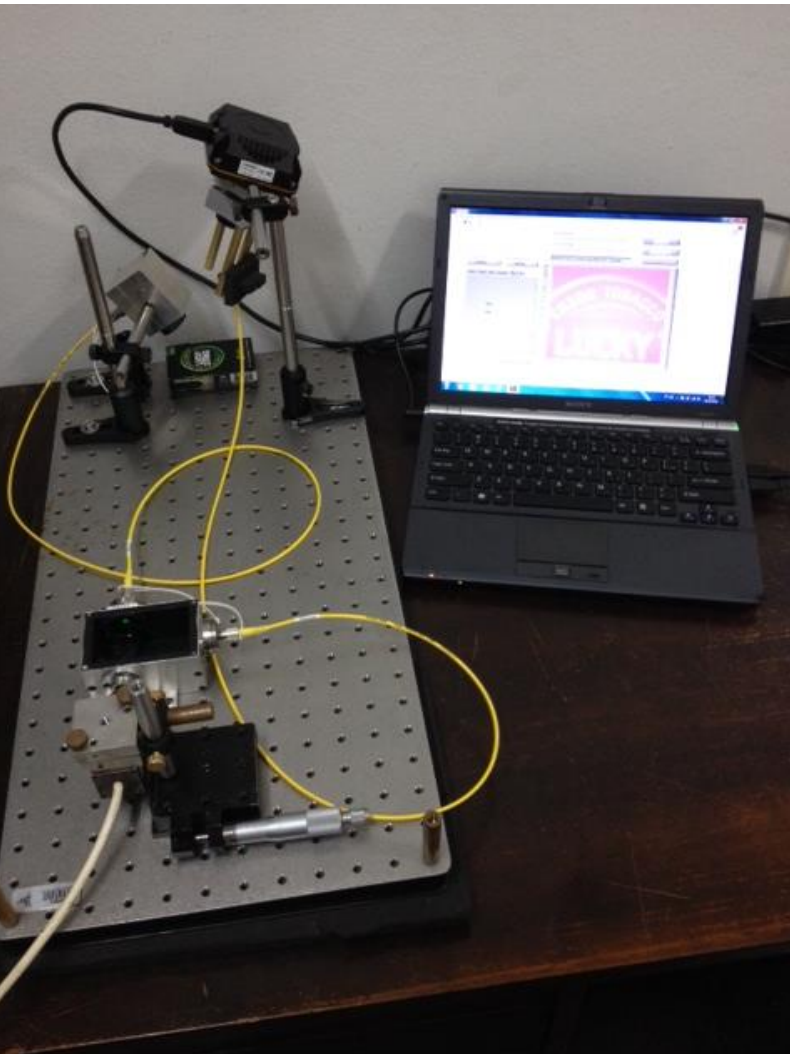
4.2 – Desenho técnico final



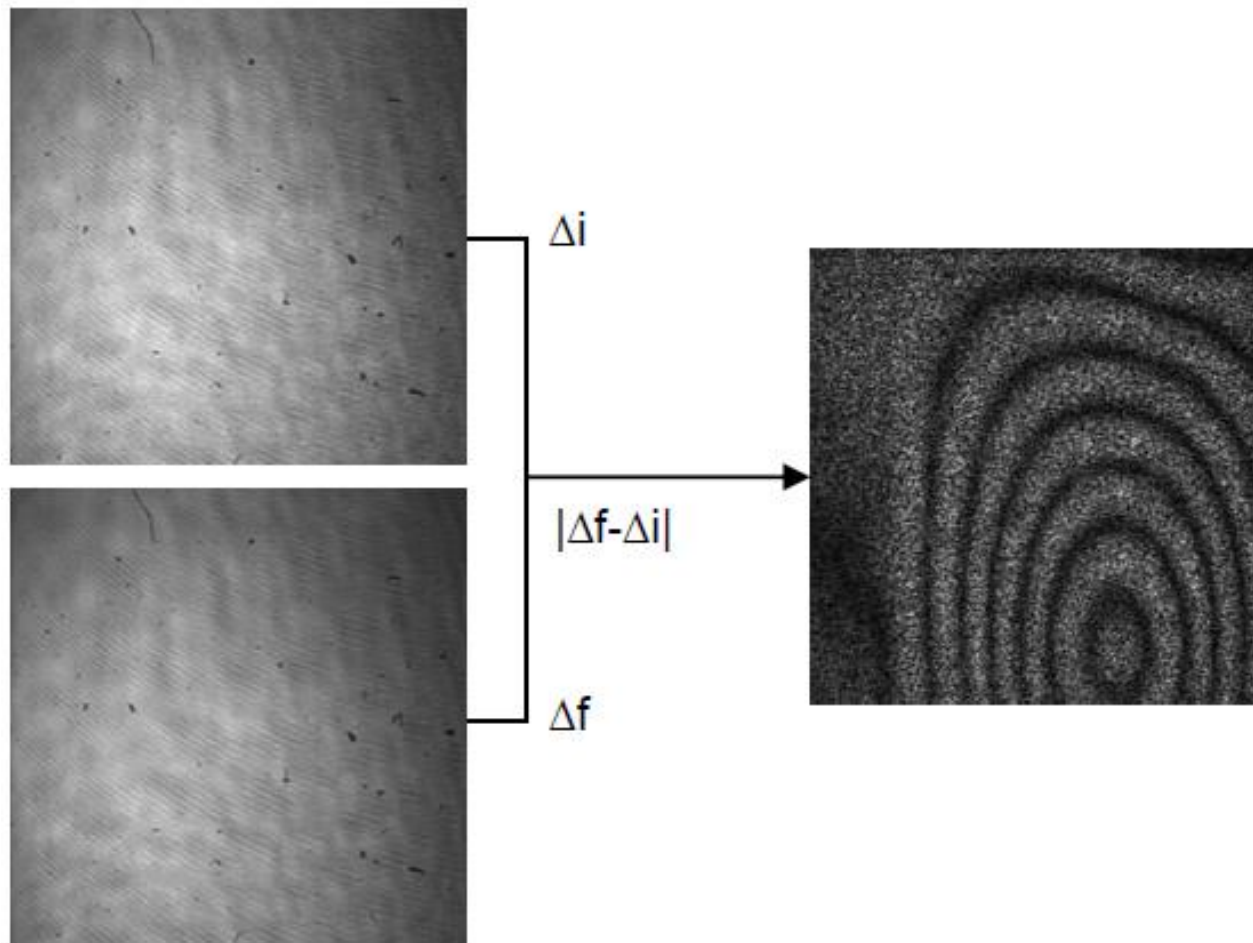
5 – Arranjo Experimental do ESPI



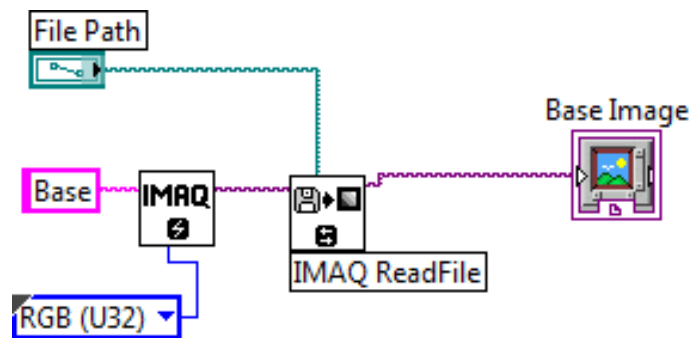
5 – Arranjo Experimental do ESPI



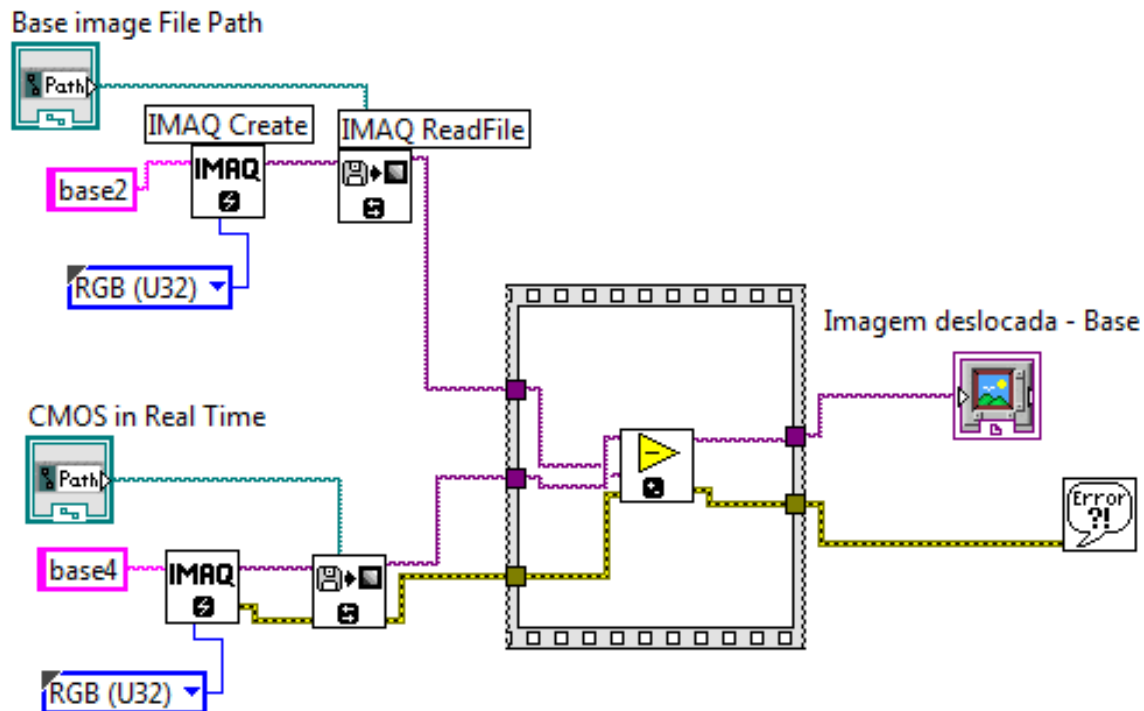
6 – Técnicas ESPI



01_ler_imag_diretorio.vi



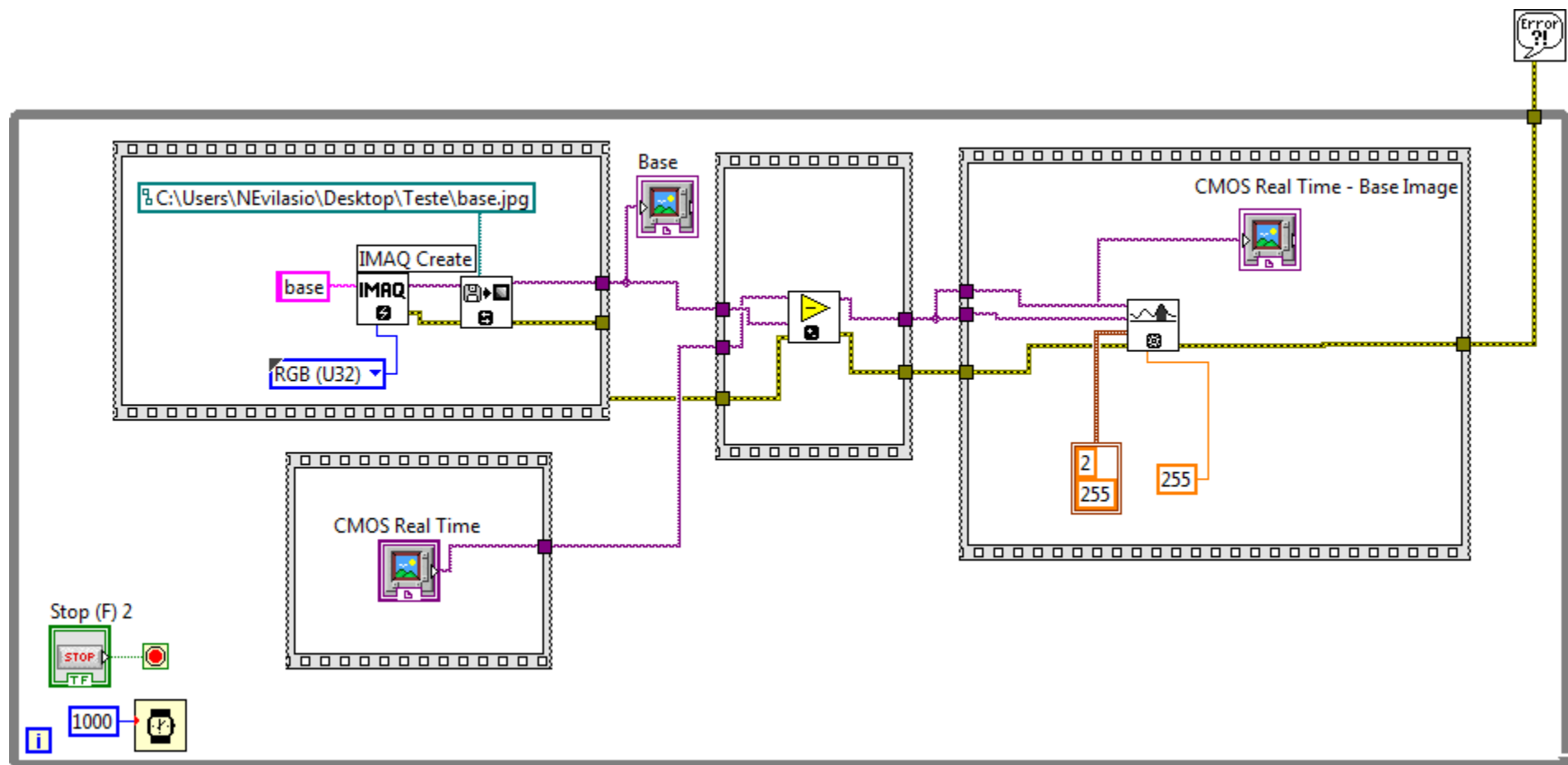
02_subtração_duas_imagens.vi



6 – Técnicas ESPI

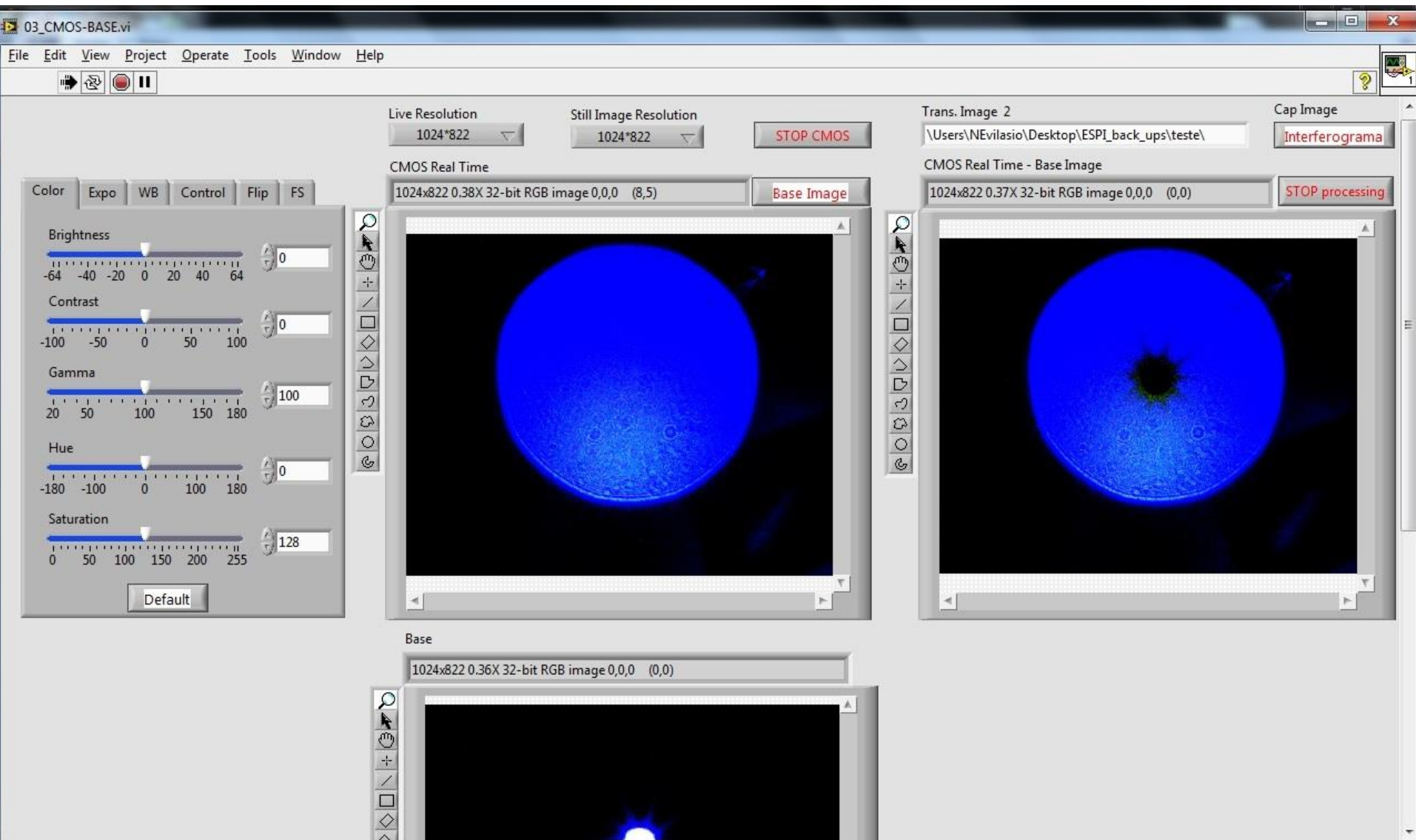
6.1 – ESPI em tempo real com o Labview

03_CMOS-BASE.vi



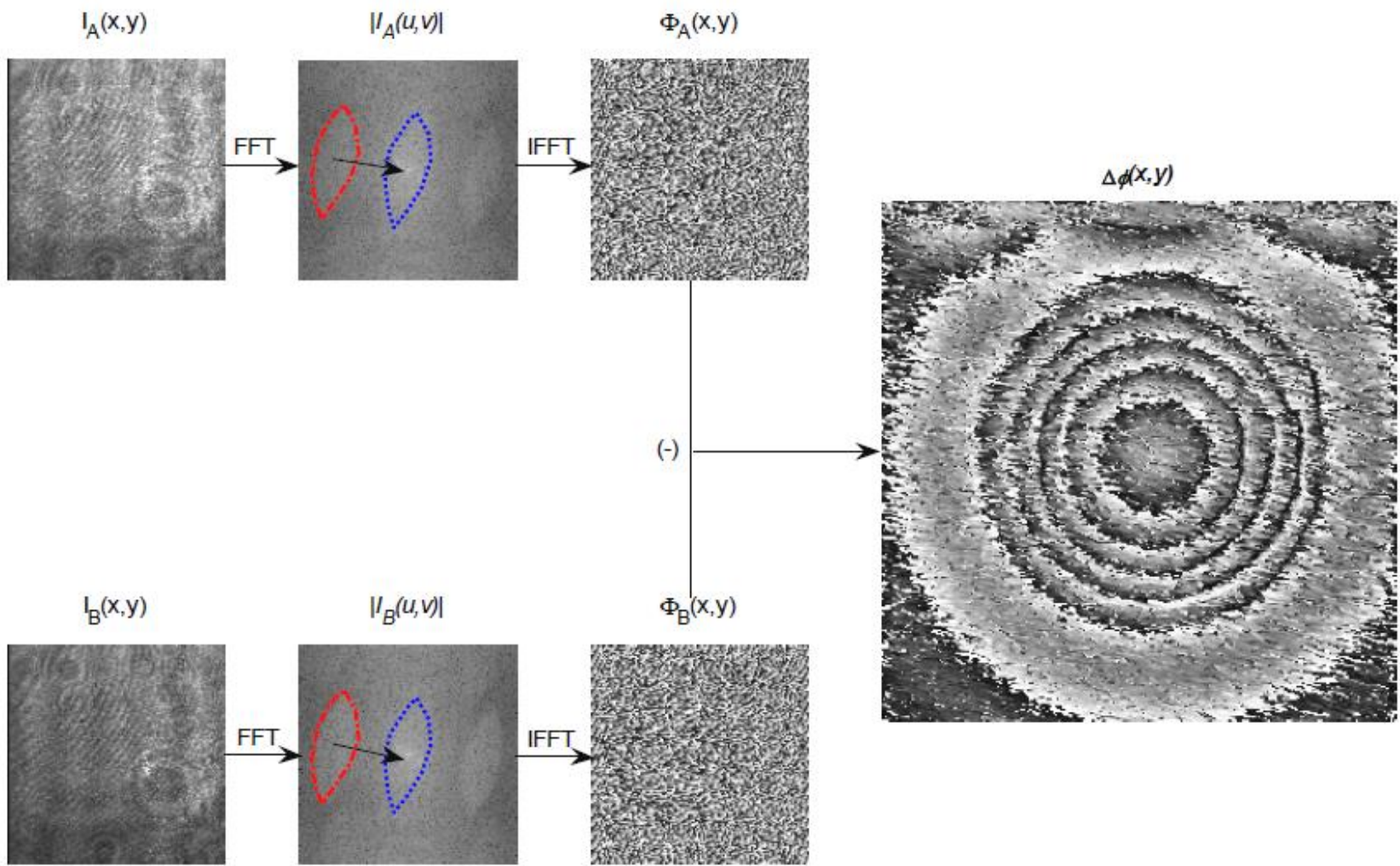
6 – Técnicas ESPI

6.1 – ESPI em tempo real com o Labview

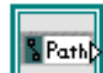


6 – Técnicas ESPI

6.2 – Mapa de Fase (medição dinâmica de deslocamentos)



Base image File Path



IMAQ Create

base2



Grayscale (U8)

IMAQ ReadFile



Other Image file Path



base4



Grayscale (U8)



Soma

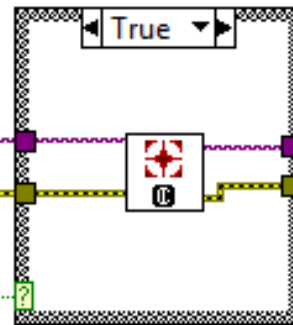


Complex FFT



Complex (CSG)

T

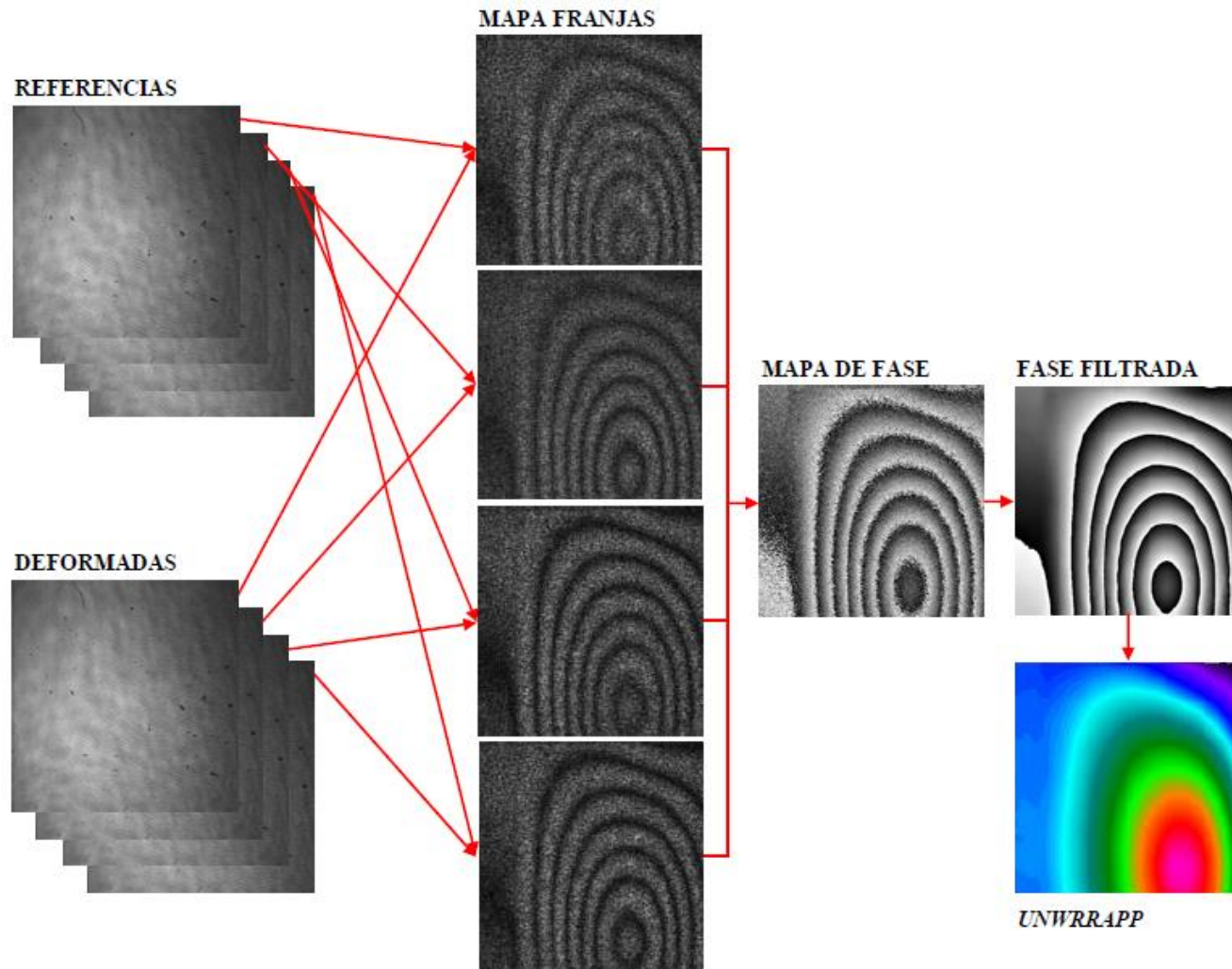


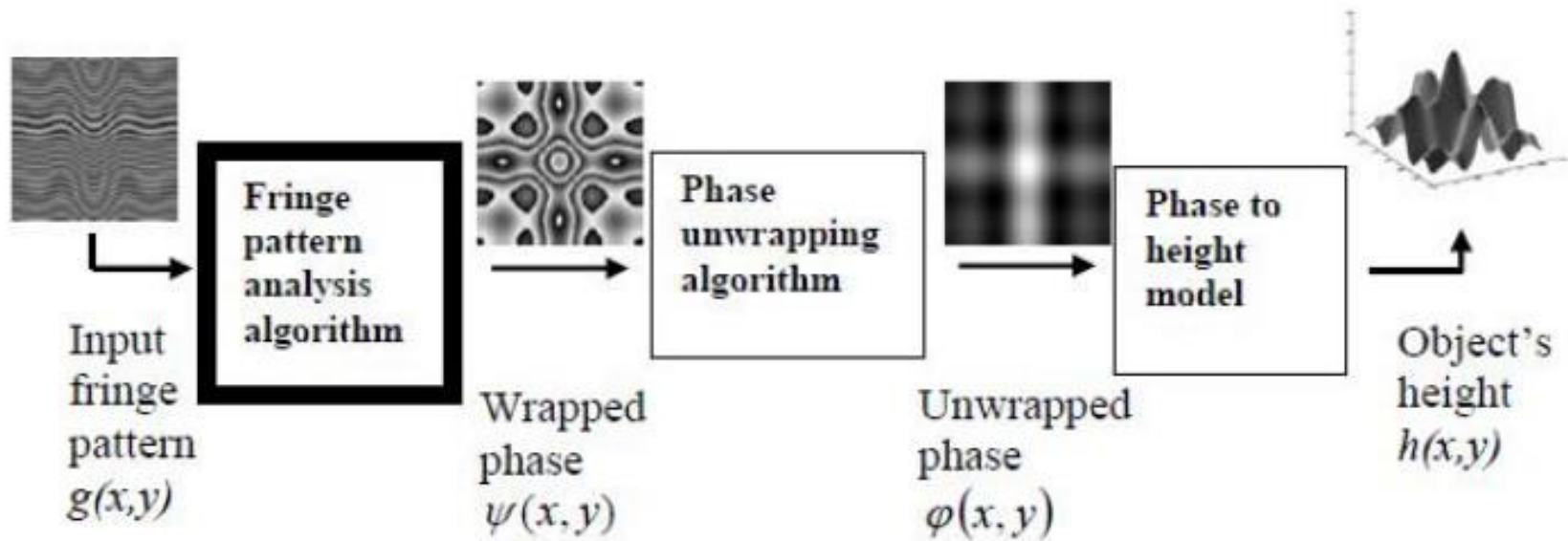
FFT da Soma



6 – Sistema de formação de imagem

6.1 - Labview





PERSPECTIVAS





O fenômeno do *speckle* como introdução à metrologia óptica no laboratório didático

Emerson Rodrigo da Silva e Mikiya Muramatsu

Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 29, n. 2, p. 283-286, (2007)

**Determinação experimental do Módulo de Young
(Holographic Interferometry of a Stressed Pop Can)**

Henry Timmers, *Physics Department, The College of Wooster, Wooster, Ohio 44691, USA* May 7, 2008.

Measure of roughness of paper using speckle

Abdiel Pinoa and Josep Pladellorensa

Proc. of SPIE Vol. 7432 74320E-1

CONSTRUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE UM ATUADOR PIEZOCERÂMICO

Paulo Roberto Bueno de Carvalho e Paulo Jorge Brazão Marcos

Boletim Técnico da FATEC-SP - BT/ 28 – pág. 10 a 14 – Abril / 2010

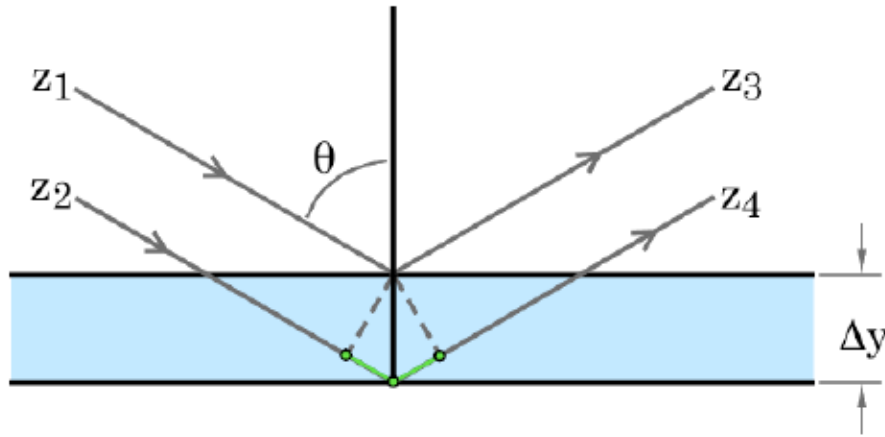
Resonating with Students in the Undergraduate Physics Laboratory: Comprehending Acoustic Vibrations

Keith R. Stein*, Richard W. Peterson, Jack Houlton, Justin Knapp, Brandon Peplinski,

Christopher Scheevel, and David Swenson

Excerpt from the Proceedings of the COMOL Conference Boston 2008

Determinação experimental do Módulo de Young



The optical path difference between the stressed and unstressed path is given by

$$\Delta P = (z_1 + z_3) - (z_2 + z_4)$$

(green line segments)

If the difference between the surfaces is Δy , we can geometrically determine the optical path difference to be

$$\Delta P = 2\Delta y \cos(\theta)$$

For the two deflected light rays to total destructive or constructive interference, the optical path difference must fulfill the requirement

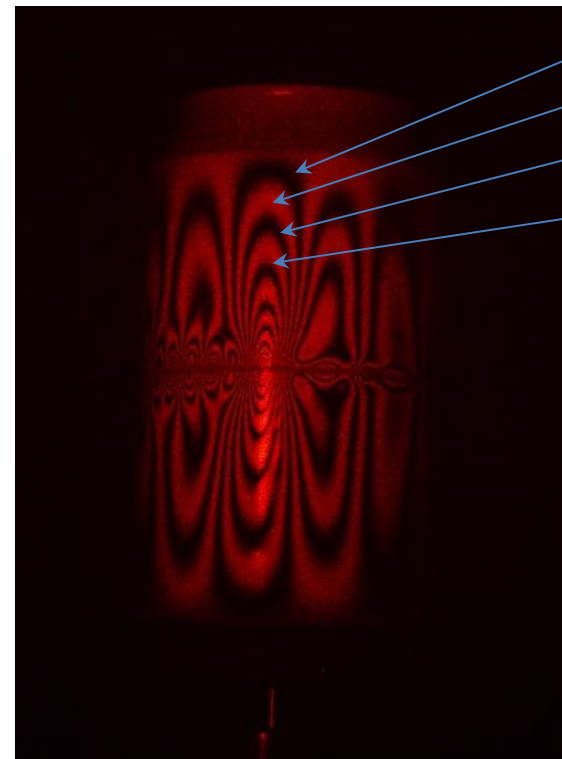
$$\Delta P = \frac{n\lambda}{2}$$

n is the total number of fringes,
odd n represent destructive interference (or dark fringes),
and even n represent constructive interference, (or bright fringes).

$$\Delta P = \frac{n\lambda}{4\cos(\theta)}$$

measures the total affect
of the applied stress.

- **Determinação experimental do Módulo de Young (ensino)**



$\lambda/4$

$2\lambda/4$

$3\lambda/4$

$4\lambda/4$



EAC
ENGENHARIA ACÚSTICA | UFSM



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA

Av. Roraima, 1000 - Prédio 13, sala 1123

CEP 97105-900 - Santa Maria, RS

Tel: (55) 3220-8305 e-mail: pgfisica.ufsm@gmail.com



- **Estudo de materiais cerâmicos, compósitos e filmes finos com característica magnetoestrictiva ou piezoelétrica;**
- **Aplicação de novos materiais em dispositivos eletroacústicos;**
- **Aplicação de novos materiais em biosensores.**

Colaboradores:

Prof. Lúcio S. Dorneles (LMMM-UFSM)

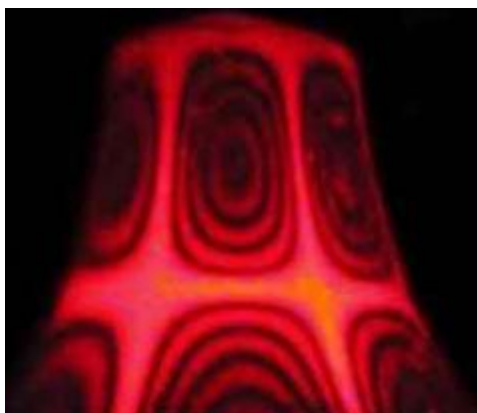
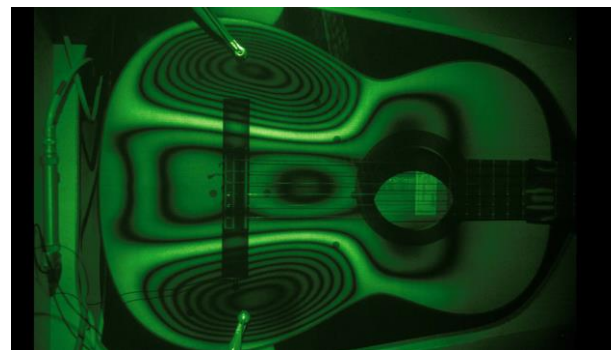
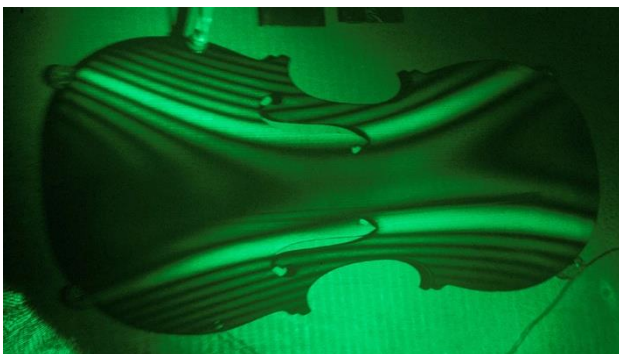
Prof. N.G.C. Astrath (CILMI-UEM)

Prof. L.F. Cótica (GDDM-UEM)

Prof. G.S. Dias (GDDM-UEM)



- **Modos vibracionais em instrumentos musicais**



Grupo de pesquisa

Luteria



Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

Referência:
Thomas D. Rossing

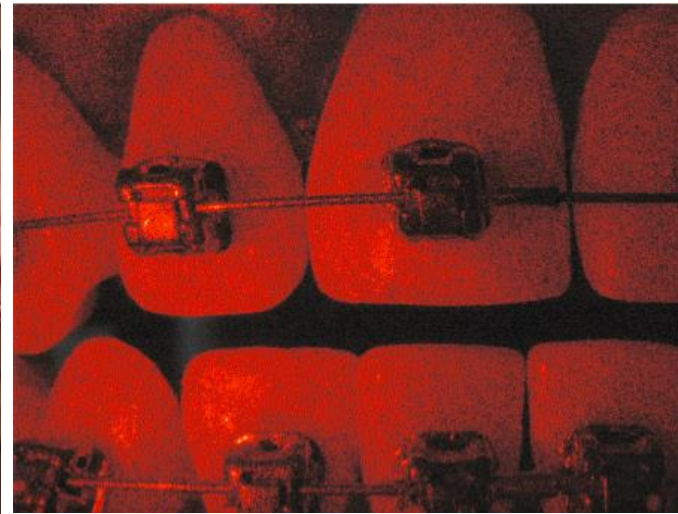
Colaboradores:

Prof. Thiago (Luteria-UFPR)
Msc. Bogodan Skorupa (Utfpr)



Pós-Graduação em Ciências Odontológicas
Níveis Mestrado e Doutorado - UFSM

- **Estudo de esforços mastigatórios;**
- **Medição indireta da contração das resinas para restauração;**
- **Diagnostics of Stresses and Strains of Hard Bio-tissues *in vivo*;**



AGRADECIMENTOS



Prof. Dr. M.A. Pinheiro (DEAC-CT-UFSM)
Prof. Dr. L.S. Dorneles (DF-CCNE-UFSM)



Prof. Dr. N.G.C. Astrath (DFI-UEM)
Prof. Dr. L.F. Cótica (DFI-UEM)
Prof. Dr. R.A. Souza (DEC-UEM)
Daniel Matos (e seu Pedro)
Guilherme Maia Santos
Anuar J. Mincache11



Vanessa Calil

Tech suport THORLABS Ltda.

Rua Riachuelo 171,
São Carlos, SP, Brazil,

ZIP Code 13560-110

Tel: [+55 \(16\) 3413 7062](tel:+551634137062)



A MARCA DA ENGRENAGEM
RUA PIONEIRO ZOALDO REGINATTO,
Nº523, MARINGÁ PR – 44 3265 1232

<http://engrenapeças.com.br/>

Aginaldo, Cleber e Fernando



Fone:

(44) **3354-8100**

Av. Alziro Zarur, 828
Maringá - PR