

# **Automatização do Alinhamento e da Operação do Sistema IRAD – Interferômetro Radial de Luz Incoerente para Peças Cilíndricas**

*por*

**Eng. Rafael Moreira Miggiarin**

**Universidade Federal de Santa Catarina  
Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial  
Departamento de Engenharia Mecânica**

**Trabalho apresentado como parte dos requisitos para a obtenção do título  
de Mestre em Metrologia Científica e Industrial na Universidade Federal de  
Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.**

Florianópolis, dezembro de 2007.

# **Automatização do Alinhamento e da Operação do Sistema IRAD – Interferômetro Radial de Luz Incoerente para Peças Cilíndricas**

**Eng. Rafael Moreira Miggorin**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de  
Mestre em Metrologia Científica e Industrial  
e aprovada na sua forma final pelo  
Programa de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial.

---

**Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr. Eng.  
Orientador  
Coordenador do Programa de Pós Graduação em  
Metrologia Científica e Industrial  
Departamento de Engenharia Mecânica – UFSC**

---

**Prof<sup>a</sup>. Analucia Vieira Fantin, Dr<sup>a</sup>. Eng<sup>a</sup>.  
Universidade Federal de Santa Catarina  
Co-orientadora**

## **Banca Examinadora:**

---

**Prof. Celso Luiz Nickel Veiga, Dr. Eng.  
Universidade Federal de Santa Catarina**

---

**Frank Hrebabetzky, Dr. Rer. Nat.  
PHOTONITA LTDA.**

---

**Prof. Marcelo Ricardo Stemmer, Dr. Ing.  
Universidade Federal de Santa Catarina**

*“Alguns homens observam o mundo e se perguntam: por quê? Outros homens observam o mundo e se perguntam: por que não?”*

George Bernard Shaw

# Resumo

Para atender a um mercado consumidor cada vez mais exigente, a indústria metal-mecânica investe alto na qualidade de seus produtos. Dentro desse contexto a metrologia ganha evidência. Hoje, muitas companhias a utilizam não apenas como uma forma de inspecionar a qualidade de suas peças mecânicas, mas também como uma ferramenta para extrair informações de sua produção. Isso possibilita a realimentação dos processos de fabricação e, conseqüentemente, a constante evolução do produto e da própria empresa. Companhias do setor de refrigeração compartilham a mesma posição quanto à utilização da metrologia. Dentre suas aplicações está o aprimoramento da produção dos pistões para seus compressores.

A fabricação de peças cilíndricas e cônicas envolve processos muito complexos. Mais complexa ainda é a avaliação desses objetos de forma confiável e que traga as informações relevantes sobre sua fabricação. Dentre as inúmeras técnicas de medições existentes, a interferometria de luz branca é a que apresenta o melhor resultado para medição dessa classe de peças. Entretanto, no mercado ainda não são encontrados muitos sistemas dedicados a esta função.

Este trabalho de dissertação dá seqüência ao desenvolvimento de um interferômetro de luz branca para medição de peças cilíndricas que, assim como seu método de medição, vem sendo estudado ao longo de alguns anos pelo Laboratório de Metrologia e Automatização da Universidade Federal de Santa Catarina. O primeiro trabalho relacionado com esse tema desenvolveu a técnica de medição, criando a base para o protótipo de um sistema interferométrico radial. O segundo trabalho implementou efetivamente o protótipo, denominado IRAD. O presente trabalho procura aprimorar o protótipo, através da implementação de módulos automatizados que contribuirão com a usabilidade e eficiência do interferômetro.

# Abstract

In order to attempt a constantly increasing and demanding market, the metal-mechanical industry performs high investments on quality control. Within this context, metrology becomes highlighted. Nowadays many companies make use of metrology not only for quality inspection of their mechanical parts, but also to gather information about their production. This enables feedback control of manufacturing processes and hence the constant evolution of the product and the company itself. Big companies in the refrigeration branch share the same idea about the wise use of metrology. Among its applications, the improvement of pistons, which are important parts of gas compressors, can be mentioned.

The manufacturing of cylindrical and conical parts involves very complex processes. Even more difficult is to obtain reliable and relevant information about those processes from the measurements of such objects. Among many measurement techniques, white light interferometry is the one that presents the best metrological results. Nevertheless there are not so many systems in the market dedicated to measure cylindrical pieces.

This work gives sequency to the development of a white light interferometer for cylindrical pieces. This system, as well as its fundamentals, have been studied over several years by the Metrology e Automatization Laboratory of the Federal University of Santa Catarina, resulting in two Master thesis. The first one has described the measuring technique and contains all basis for the creation of a radial white light interferometer model. The second work has effectively implemented a prototype of a interferometer, named IRAD. The present study intends to perform improvements on this prototype, through implementation of automated modules, which will contribute to the efficiency and usability of this measurement system.

# Agradecimentos

Meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas e entidades que contribuíram com este trabalho.

Ao PósMCI pela estrutura, apoio financeiro, e por acreditarem em minha capacidade.

À EMBRACO pela motivação e pela paciência nos momentos difíceis.

À PHOTONITA pela confiança depositada quanto à realização do trabalho.

Ao Prof. Armando Albertazzi pelo ensino, confiança, orientação e incentivo durante o todo o período desse trabalho.

Ao Alex Dal Pont e à Yara pela ajuda no desenvolvimento do software.

À Prof. Analucia Vieira Fantin e ao Dr. Matias Viotti pelos esclarecimentos, dicas e por mostrarem o caminho certo.

Ao Fabrício Boering pela ajuda fornecida nos experimentos e pelos inúmeros alinhamentos manuais de peça.

Aos estagiários Rafael Fazzolin, Alisson Calgaroto e Mário Pereira Rodrigues pela ajuda concedida e que muito contribuíram neste projeto. Desejo sucesso a todos.

À Rosana Vieira pelo profissionalismo, simpatia, ajuda e preocupação com todos os alunos do PósMCI.

Aos amigos e colegas da turma 2005 e 2006 pelas longas discussões sobre os mais diversos temas.

Aos meus pais e irmãos que me ajudaram em todos os momentos e decisões.

Agradeço principalmente à Aline, pois sem ela nada disso valeria a pena.

# Sumário

<b>Capítulo 1</b> .....	<b>1</b>
1.1 Motivação .....	1
1.2 Objetivos .....	2
1.3 Estrutura do Trabalho .....	2
<b>Capítulo 2</b> .....	<b>4</b>
2.1 Definições .....	4
2.1.1 Interferência .....	4
2.1.2 Coerência .....	9
2.2 Interferometria .....	14
2.3 Aplicações da Interferometria de Luz Incoerente .....	18
2.4 Interferômetros Comerciais .....	19
<b>Capítulo 3</b> .....	<b>22</b>
3.1 Introdução ao Sistema .....	22
3.2 Hardware .....	22
3.2.1 Espelho Cônico .....	24
3.2.2 Óptica .....	25
3.2.3 Iluminação .....	26
3.2.4 Sistema de Varredura do Espelho de Referência .....	28
3.2.5 Alinhamento da Peça no Sistema Óptico .....	30
3.3 Software .....	34
3.4 Avaliação do Tempo de Medição do Sistema IRAD .....	37
3.5 Necessidades do Sistema IRAD .....	40
<b>Capítulo 4</b> .....	<b>41</b>
4.1 Módulos Propostos .....	41
4.1.1 Seleção e Cadastro de Peças e Usuários .....	43
4.1.2 Inserção de Peças .....	44
4.1.3 Ajuste Automático de Iluminação para o Alinhamento .....	46
4.1.4 Alinhamento Grosseiro de Peças .....	48
4.1.5 Alinhamento Fino de Peças .....	62

4.1.6 Seleção de Superfície de Medição.....	68
4.1.7 Ajuste de Iluminação com Dois Níveis .....	69
4.1.8 Determinação das Faixas de Medição .....	72
4.1.9 Varredura .....	73
4.1.10 Classes .....	74
4.2 Interface de Calibração.....	76
<b>Capítulo 5.....</b>	<b>79</b>
5.1 Medições de Tempos de Execução dos Módulos.....	79
5.2 Comparações entre os Sistemas.....	83
5.3 Medição de Pistões com Rebaixo.....	85
5.4 Medição de Pistões Utilizando Iluminação com Dois Níveis.....	86
<b>Capítulo 6.....</b>	<b>88</b>
6.1 Conclusões .....	88
6.2 Sugestões para os Próximos Trabalhos .....	90
<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>91</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>93</b>
A.1 Histograma da Diferença entre Nuvem Alinhada e Pouco Desalinhada. ....	93
A.2 Histograma da Diferença entre Nuvem Alinhada e Muito Desalinhada. ....	94
A.2 Histograma da Diferença entre Nuvem Desalinhada e Muito Desalinhada. ....	94
B.1 Resultados de Avaliação .....	95
B.1.1 Avaliação do Módulo de Seleção de Peças .....	95
B.1.2 Avaliação do Módulo de Inserção de Peças .....	96
B.1.3 Avaliação do Módulo de Ajuste de Iluminação para o Alinhamento Grosseiro.....	97
B.1.4 Avaliação do Módulo de Alinhamento Grosseiro .....	98
B.1.5 Avaliação do Módulo de Alinhamento Fino.....	99
B.1.6 Avaliação do Módulo de Seleção da Superfície de Medição .....	100
B.1.7 Avaliação do Módulo de Ajuste de Iluminação com Dois Níveis.....	100
B.1.8 Avaliação do Módulo de Determinação de Faixas de Medição.....	101



# Lista de Figuras

Figura 1	Padrão de franjas de interferência .....	5
Figura 2	Irradiância em função da diferença de fase e diferença entre caminhos ópticos. ....	9
Figura 3	Faixa de frequências do espectro eletromagnético. Destaque para o espectro visível ao olho humano. ....	10
Figura 4	Comprimento de coerência de um feixe luminoso.....	11
Figura 5	Trens de ondas sinusoidais periódicos com defasagem menor que o comprimento de coerência. ....	12
Figura 6	Trens de ondas sinusoidais periódicos com defasagem maior que o comprimento de coerência .....	12
Figura 7	Interferômetro de Michelson.....	16
Figura 8	Perfil de intensidade das franjas obtido por um interferômetro de luz branca. Também conhecido como correlograma. Intensidade da luz quantizada na escala de cinza de 1024 níveis. ....	18
Figura 9	Interferômetros comerciais.....	19
Figura 10	Tropel ThetaForm.....	20
Figura 11	Visão superior dos componentes do interferômetro radial IRAD.....	23
Figura 12	Espelho cônico com peça inserida.....	24
Figura 13	Comparação entre lentes convencionais e lentes telecêntricas. <sup>[17]</sup> .....	26
Figura 14	Resultado da simulação do cálculo do correlograma utilizando o algoritmo de 10 passos.....	29
Figura 15	Sistema de movimentação do espelho de referência.....	30
Figura 16	(a) cilindro alinhado. (b) cilindro levemente desalinhado. (c) cilindro muito desalinhado. ....	31
Figura 17	Sistema de alinhamento da peça no espelho óptico. ....	34
Figura 18	Sistema de controle de motores utilizado no sistema de alinhamento ....	34
Figura 19	Interface gráfica do sistema IRAD.....	36
Figura 20	Pistões selecionados.....	37
Figura 21	Imagens de alinhamento da peça 1. ....	38
Figura 22	Alinhamento da peça 2.....	38
Figura 23	Alinhamento da peça 3.....	38

Figura 24	Alinhamento da peça 4.....	39
Figura 25	Porcentagens dos tempos referentes a cada sub-processo envolvido em uma medição .....	39
Figura 26	Fluxograma dos passos de medição.....	42
Figura 27	Espaço entre espelho e peça. Peça de 22,5 mm de diâmetro inserida no centro do espelho com 28 mm de diâmetro no furo central.....	45
Figura 28	Fluxograma do ajuste automático de tempo de exposição da câmera....	47
Figura 29	Diagrama de classes simplificado para o módulo de ajuste automático do tempo de exposição da câmera digital do sistema IRAD.....	48
Figura 30	Simulação do desvio dos raios luminosos do conjunto espelho e cilindro na presença de desalinhamentos angulares. ....	49
Figura 31	Simulação do desvio dos raios luminosos do conjunto espelho/cilindro para um desalinhamento horizontal.....	50
Figura 32	Imagens planejadas de um pistão. ....	51
Figura 33	Diagrama de classes simplificado de processamento de imagens para extração de parâmetros.....	52
Figura 34	Linhas desenhadas sobre a imagem.....	52
Figura 35	Perfil das linhas superior, central e inferior, desenhadas sobre a imagem. A linha constante em de cada gráfico representa a média dos valores de cada perfil. ....	53
Figura 36	Imagens de desalinhamento com perfis de intensidade das linhas .....	54
Figura 37	Área complementar dos perfis. ....	55
Figura 38	Variação do módulo do segundo harmônico da linha superior em função do deslocamento horizontal e vertical. ....	56
Figura 39	Variação da diferença de fase do segundo harmônico entre a linha superior e a linha inferior em função do deslocamento horizontal e vertical. ....	57
Figura 40	Curva de calibração para rotação Y em função da diferença de fase do segundo harmônico entre linha superior e inferior.....	58
Figura 41	Perfil das médias da imagem. ....	59
Figura 42	Algoritmo baseado no método <i>Golden Section Search</i> .....	61
Figura 43	Diagrama de classes do módulo de alinhamento grosseiro. ....	62

Figura 44	(a)intersecção do cilindro virtual ideal, em preto, com a peça, em azul, produzindo uma região de intersecção, em vermelho. (b) perspectiva planificada das franjas intersecção.....	63
Figura 45	Número de <i>pixels</i> brancos em relação à posição do espelho de referência para uma peça alinhada. ....	66
Figura 46	Número de <i>pixels</i> brancos em relação à posição do espelho de referência para uma peça pouco desalinhada.....	66
Figura 47	Número de <i>pixels</i> brancos em relação à posição do espelho de referência para uma peça muito desalinhada.....	67
Figura 48	Diagrama de classes simplificado do módulo de alinhamento fino .....	68
Figura 49	Determinação da área de medição. O retângulo vermelho delimita os <i>pixels</i> da imagem que serão varridos no processo de medição. ....	69
Figura 50	Histograma da imagem utilizando iluminação com dois níveis. ....	71
Figura 51	Diagrama de classes simplificado do módulo de ajuste de iluminação ...	72
Figura 52	Medição de cilindro com rebaixo. ....	73
Figura 53	Diagrama de classes simplificado do módulo de medição. ....	74
Figura 54	Diagrama de classes simplificado mostrando a hierarquia e o controle de gerenciamento dos módulos implementado. ....	76
Figura 55	Cálculo do centróide para determinação do centro do espelho cônico ..	78
Figura 56	Tempos medidos para cada processo. ....	80
Figura 57	Porcentagens dos tempos referentes aos módulos de alinhamento automático e de varredura. Agora a varredura representa o gargalo do processo de medição.....	80
Figura 58	Comparação entre os tempos dos processos de medição manual e automático. ....	81
Figura 59	Distribuição média dos tempos dos processos envolvidos na medição. .	82
Figura 60	Pistões com desgaste .....	86
Figura 61	Diferença entre os pontos de uma nuvem alinhada e uma nuvem pouco desalinhada. ....	93
Figura 62	Diferença entre os pontos de uma nuvem alinhada e uma nuvem muito desalinhada. ....	94
Figura 63	Diferença entre os pontos de uma nuvem pouco desalinhada ( $\emptyset X$ e $\emptyset Y = 0,05$ mm) e uma nuvem muito desalinhada ( $\emptyset X$ e $\emptyset Y = 0,1$ mm). ....	94

## Lista de Tabelas

Tabela 1	Casos de interferência.....	8
Tabela 2	Comparação de tempos de medição de peça alinhada e desalinhada ..	32
Tabela 3	Influência do desalinhamento no valor medido de cilindridade.....	33
Tabela 4	Subtração de nuvens de pontos com diferentes desalinhamentos. ....	33
Tabela 5	Tempos de alinhamentos de peças e limites de varredura .....	39
Tabela 6	Tabela de tempos dos módulos automáticos implementados .....	79
Tabela 7	Critérios para avaliação de influência no processo de medição.....	83
Tabela 8	Critérios para avaliação de resultados atingidos. ....	84
Tabela 9	Critérios de avaliação de tempo e modo operação. ....	84
Tabela 10	Tabela de avaliação .....	85
Tabela 11	Tempos de medição de um pistão com rebaixo .....	86
Tabela 12	Número de pontos medidos em função do tipo de iluminação .....	87
Tabela 13	Avaliação do módulo 1 .....	95
Tabela 14	Avaliação do processo manual equivalente ao módulo 1.....	95
Tabela 15	Avaliação do módulo 2 .....	96
Tabela 16	Avaliação do processo manual equivalente ao módulo 2.....	96
Tabela 17	Avaliação do módulo 3 .....	97
Tabela 18	Avaliação do processo manual equivalente ao módulo 3.....	97
Tabela 19	Avaliação do módulo 4 .....	98
Tabela 20	Avaliação do processo manual equivalente ao módulo 4.....	98
Tabela 21	Avaliação do módulo 5 .....	99
Tabela 22	Avaliação do processo manual equivalente ao módulo 5.....	99
Tabela 23	Avaliação do módulo 6 .....	100
Tabela 24	Avaliação do processo manual equivalente ao módulo 6.....	100
Tabela 25	Avaliação do módulo 7 .....	100
Tabela 26	Avaliação do processo manual equivalente ao módulo 7.....	101
Tabela 27	Avaliação do módulo 8 .....	101
Tabela 28	Avaliação do processo manual equivalente ao módulo 8.....	101

# Lista de Símbolos

- $k_1, k_2$  : direção de propagação da onda 1 e 2 respectivamente;
- $r$  : vetor posição;
- $\omega$  : frequência rotacional;
- $t$  : tempo;
- $E_1, E_2$  : vetores campo elétrico;
- $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  : são as fases na origem, relativas a  $E_1$  e  $E_2$  ;
- $E_{01}, E_{02}$  : valores escalares de intensidades máximas de  $E_1$  e  $E_2$  ;
- $\delta$  : diferença de fase entre as ondas.
- $\Delta L_{OP}$  : diferença de caminho percorrido pelas ondas;
- $\Delta\nu$  : faixa de frequência da banda espectral da fonte de luz;
- $c$  : velocidade da luz;
- $\lambda$  : comprimento de onda médio entre as componentes espectrais da fonte;
- $\Delta\lambda$  : é a variação do comprimento de onda da fonte da faixa espectral;
- $\gamma(\tau)$  : grau de coerência;
- $\tau_c$  : tempo de coerência;
- $L_c$  : comprimento de coerência da fonte de luz;
- $I_{\max}, I_{\min}$  : intensidades máxima e mínima da figura de interferência;
- $A(I)$  : amplitude do envelope do correlograma de interferência;
- $\Phi_e$  : fluxo luminoso em W;
- $A$  : área emissiva em  $m^2$ ;
- $\Omega$  : ângulo sólido formado entre um objeto e um ponto da fonte de luz em sr;
- USB : *Universal Serial Bus*;
- LED : *Light Emitting Diode*;
- IRAD : Interferômetro Radial;
- CCD : *Charged-Coupled Device*;
- $\emptyset X, \emptyset Y$ : Eixos de rotação do sistema de alinhamento;
- SQL : *Structured Query Language*.

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Motivação

A medição de forma de peças cilíndricas recebe atualmente grande atenção da indústria metal-mecânica. Através da avaliação geométrica das peças fabricadas, as indústrias procuram obter informações sobre seus processos de produção com o intuito de aprimorá-los constantemente.

Uma técnica muito utilizada para medição da geometria de peças é a interferometria de luz incoerente. Essa técnica apresenta vantagens por não necessitar entrar em contato com o objeto e possibilitar medições com incertezas muito baixas. Por apresentar resultados tão excepcionais existe um grande esforço voltado para o desenvolvimento de novas aplicações e de métodos otimizados para aplicações já conhecidas. Com base nesse fato, vem sendo desenvolvido pelo LABMETRO da Universidade Federal de Santa Catarina um interferômetro de luz branca para medição de peças cilíndricas, o IRAD. A interferometria de luz incoerente é muito utilizada na medição de planeza, paralelismo e rugosidade de placas e partes planas. Sua aplicação na medição de objetos cilíndricos é mais recente, se comparada com as anteriores. No Labmetro, Albertazzi e Dal Pont <sup>[1]</sup>, utilizando a técnica de interferometria de luz branca para a medição de superfícies tridimensionais, desenvolveram um protótipo de um interferômetro para peças cilíndricas. Atualmente o sistema se encontra em fase de adaptação para ser utilizado efetivamente em uma indústria e operado por usuários não especialistas.

Seguindo a tendência de desenvolvimento e melhoria de aplicações já conhecidas, serão propostas nesse trabalho de dissertação melhorias e otimizações de processos e métodos que contribuam de forma a facilitar sua utilização.

### 1.2 Objetivos

Neste trabalho é proposta a modularização dos processos de ajustes e configurações para a realização da medição de peças com o IRAD. O objetivo é tornar sua operação mais fácil e intuitiva, automatizando a maior parte desses processos.

Uma das metas principais é a automatização do alinhamento da peça a ser medida com o eixo óptico do sistema. Atualmente esse alinhamento é realizado por operadores treinados, levando em média 15 minutos por peça alinhada. Busca-se com essa automatização manter a mesma qualidade obtida com o alinhamento manual, porém obtendo uma grande redução de tempo e de esforço do especialista.

### 1.3 Estrutura do Trabalho

A presente dissertação foi dividida em seis capítulos. No segundo capítulo será introduzido o princípio de medição utilizando interferometria de luz incoerente. Serão discutidos os fenômenos físicos que possibilitam a técnica, como coerência e interferência, assim como as características da luz branca que possibilitam sua utilização.

No capítulo seguinte será feita uma análise do sistema de medição já desenvolvido, procurando extrair informações e características de procedimentos que possam ser melhorados e automatizados. Serão realizadas algumas medições utilizando o primeiro protótipo do interferômetro, a fim de se obter alguns valores dos tempos para futura comparação com os métodos desenvolvidos neste trabalho.

O quarto capítulo irá tratar dos módulos propostos. Serão descritos os componentes de *software* e *hardware*, implementados em cada parte, assim como algoritmos utilizados na automatização dos mesmos.

O penúltimo capítulo irá apresentar os resultados obtidos com os módulos implementados. Cada módulo será avaliado e criteriosamente comparado com os processos equivalentes ao primeiro protótipo. Serão realizadas algumas medições de peças com tomadas de tempos, para serem comparados com os tempos obtidos com antigo IRAD.

O sexto e último capítulo apresentará as principais conclusões do trabalho, considerando os resultados obtidos com a automatização e economia de tempo. Conterá também as sugestões de melhorias para os próximos trabalhos a serem desenvolvidos nessa área.



# Capítulo 2

## Interferometria de Luz Incoerente

Também conhecida como WLI (*White Light Interferometry*), a interferometria de luz incoerente vem sendo amplamente utilizada como uma técnica óptica de alta performance para medição de deslocamento, distâncias e formas tridimensionais de peças metal-mecânicas, ópticas e microeletrônicas.

Para melhor entendimento do funcionamento do sistema de medição sobre o qual se desenvolveu o trabalho, serão apresentados neste capítulo os fundamentos teóricos da interferometria de luz incoerente. Serão também referenciados alguns equipamentos comerciais que utilizam técnicas semelhantes, relacionando os mesmos com suas respectivas aplicações.

### 2.1 Definições

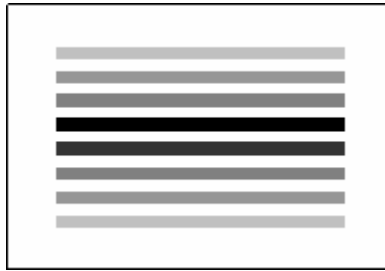
Algumas definições básicas são necessárias para se discutir sobre interferometria de luz branca. São elas a interferência e a coerência.

#### 2.1.1 Interferência

A interferência luminosa ocorre quando um ou mais feixes luminosos se sobrepõem. Em meios lineares ela obedece ao princípio da superposição de ondas, a qual infere que a onda resultante é igual à soma das funções de ondas individuais.

A interferência é um fenômeno típico que ocorre em superposição de ondas. Pode ser observada, por exemplo, num tanque de água em que se produzem ondas por meio de duas pontas afastadas que tocam periódica e sincronizadamente a superfície da água. O resultado é um padrão característico de superposição de ondas na superfície da água, denominado figura de interferência.

A interferência luminosa foi reproduzida primeiramente em laboratório pelo inglês Thomas Young, através do experimento da fenda dupla [2]. Procurando estabelecer a natureza ondulatória da luz, o físico realizou um ensaio utilizando a iluminação solar. Na experiência Young fez a luz do sol passar inicialmente por um pequeno orifício, tornando-a relativamente esférica e espacialmente coerente. Logo após iluminou duas fendas próximas e pôde observar, posteriormente às aberturas, um padrão de franjas alternadamente iluminadas e escurecidas. As franjas claras correspondem às regiões onde as ondas luminosas interferem construtivamente. As franjas escuras são as regiões onde as ondas luminosas interferem destrutivamente. O padrão de faixas claras e escuras projetado na tela é denominado franjas de interferência [2].



**Figura 1 Padrão de franjas de interferência**

As franjas de interferência podem ser explicadas pelo princípio da superposição de ondas harmônicas, o qual determina que um campo elétrico resultante em um ponto P criado a partir de dois ou mais campos individuais é igual à soma vetorial dos mesmos. Assim sendo, para o caso mais simples de dois componentes:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 \quad \text{Equação 1}$$

Normalmente um sensor óptico é capaz de medir apenas a irradiância da luz, que pode ser traduzida como a energia média por unidade de área e por unidade de tempo [3][2], convém fazer as análises utilizando como base a irradiância. A irradiância é definida por:

$$I = \langle \mathbf{E}^2 \rangle_T \quad \text{Equação 2}$$

A média temporal de uma função num tempo T  $\langle f(t) \rangle_T$  é definida como:

$$\frac{1}{T} \int_t^{t+T} f(t') dt' \quad \text{Equação 3}$$

A expressão:  $\langle \mathbf{E}^2 \rangle_T$  constitui a média temporal em T do quadrado da intensidade do campo elétrico  $\mathbf{E}$ . Das equações 1 e 2 tem-se:

$$I = \langle (\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2) \cdot (\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2) \rangle_T \quad \text{Equação 4}$$

e

$$I = \langle \mathbf{E}_1^2 + \mathbf{E}_2^2 + 2(\mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2) \rangle_T \quad \text{Equação 5}$$

A última parcela da equação 5 constitui o termo de interferências relativo às duas ondas, dada por:

$$I_{12} = 2 \langle \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2 \rangle_T \quad \text{Equação 6}$$

Os outros termos correspondem a:

$$I_1 = \langle \mathbf{E}_1^2 \rangle_T, I_2 = \langle \mathbf{E}_2^2 \rangle_T \quad \text{Equação 7}$$

Para o cálculo do termo de interferência utilizam-se as equações dos campos elétricos de cada onda luminosa na direção de propagação  $\vec{k}$  [3], considerando ondas monocromáticas de mesma frequência. As equações são dadas por:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_1 &= E_{01} \cos(\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r} - \omega t + \varepsilon_1) \\ \mathbf{E}_2 &= E_{02} \cos(\mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r} - \omega t + \varepsilon_2) \end{aligned} \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

$\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2$  = direção de propagação da onda 1 e 2 respectivamente;

$\mathbf{r}$  = vetor posição;

$\omega$  = frequência radial;

$t$  = tempo;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$  = são as fases na origem, relativas a  $\mathbf{E}_1$  e  $\mathbf{E}_2$ , introduzidas na equação por se tratarem de fontes diferentes.

$E_{01}, E_{02}$  = valores escalares de intensidades máximas de  $\mathbf{E}_1$  e  $\mathbf{E}_2$

Desenvolvendo  $\mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2$  teremos:

$$\mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2 = E_{01} \cos(\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r} - \omega t + \varepsilon_1) \cdot E_{02} \cos(\mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r} - \omega t + \varepsilon_2) \quad \text{Equação 9}$$

$$= E_{01} E_{02} \cdot [\cos(\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r} + \varepsilon_1) \cos(\omega t) + \sin(\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r} + \varepsilon_1) \sin(\omega t)] \cdot [\cos(\mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r} + \varepsilon_2) \cos(\omega t) + \sin(\mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r} + \varepsilon_2) \sin(\omega t)] \quad \text{Equação 10}$$

$$= E_{01} E_{02} \cos(\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r} + \varepsilon_1) \cos(\mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r} + \varepsilon_2) \cos^2(\omega t) + \cos(\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r} + \varepsilon_1) \cos(\omega t) \sin(\mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r} + \varepsilon_2) \sin(\omega t) + \sin(\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r} + \varepsilon_1) \sin(\mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r} + \varepsilon_2) \sin^2(\omega t) \quad \text{Equação 11}$$

Aplicando a média temporal na equação 11 e considerando que

$$\langle \cos^2 \omega t \rangle_T = \frac{1}{2}, \quad \langle \sin^2 \omega t \rangle_T = \frac{1}{2} \quad \text{e} \quad \langle \cos(\omega t) \sin(\omega t) \rangle_T = 0, \quad \text{segue:}$$

$$\langle \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2 \rangle_T = E_{01} E_{02} \frac{1}{2} \cos(\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r} + \varepsilon_1 - \mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r} - \varepsilon_2) \quad \text{Equação 12}$$

Da equação do termo de interferência, dado pela equação 6 se obtém:

$$I_{12} = 2 \langle \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2 \rangle_T = E_{01} E_{02} \cos(\delta) \quad \text{Equação 13}$$

onde:  $\delta = (\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r} + \varepsilon_1 - \mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r} - \varepsilon_2)$  é a diferença de fase entre as ondas.

Aplicando o mesmo raciocínio para os termos  $I_1$  e  $I_2$ , tem-se que:

$$I_1 = \frac{E_{01}^2}{2} \quad \text{e} \quad I_2 = \frac{E_{02}^2}{2} \quad \text{Equação 14}$$

A equação 13 pode ser escrita da seguinte forma:

$$I_{12} = 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\delta) \quad \text{Equação 15}$$

Chega-se então à expressão para irradiância total:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\delta) \quad \text{Equação 16}$$

A equação 16 indica que a irradiância pode assumir valores menores, maiores ou iguais à  $I_1 + I_2$ , dependendo do valor assumido por  $\delta$ . A tabela 1 contém os casos possíveis de interferência entre duas ondas.

**Tabela 1** Casos de interferência<sup>[2]</sup>

$\delta = 2\pi n$	$I_{MAX}$	Interferência construtiva e total
$0 < \cos(\delta) < 1$	$I_1 + I_2 < I < I_{MAX}$	Interferência construtiva
$\delta = \frac{\pi}{2}, \pm\pi(\frac{3}{2}), \dots$	$I = I_1 + I_2$	Ondas em quadratura
$0 > \cos(\delta) > -1$	$I_1 + I_2 > I > I_{MIN}$	Interferência destrutiva
$\delta = (2m + 1) \cdot \pi$	$I_{MIN}$	Interferência destrutiva total

$m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Para o caso em que duas ondas possuem amplitudes iguais, os valores das irradiâncias também serão idênticos. Então:

$$E_{01} = E_{02} \quad I_1 = I_2 = I_0$$

$$I = 4I_0 \cos^2 \frac{\delta}{2} \quad \text{Equação 17}$$

Assim a irradiância assumirá valores entre  $I_{MAX} = 4I_0$  e  $I_{MIN} = 0$ .

Ao expressar  $\delta$  em função do caminho óptico percorrido por cada onda luminosa, chega-se a:

$$\delta = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \Delta L_{OP}$$

onde:

$\lambda$  = comprimento de onda.

$\Delta L_{OP}$  = diferença de caminho percorrido pelas ondas.

A figura 2 ilustra o perfil da irradiância em função da diferença de fase e da diferença de caminhos ópticos percorridos por ondas que possuem igual amplitude e interferem entre si.

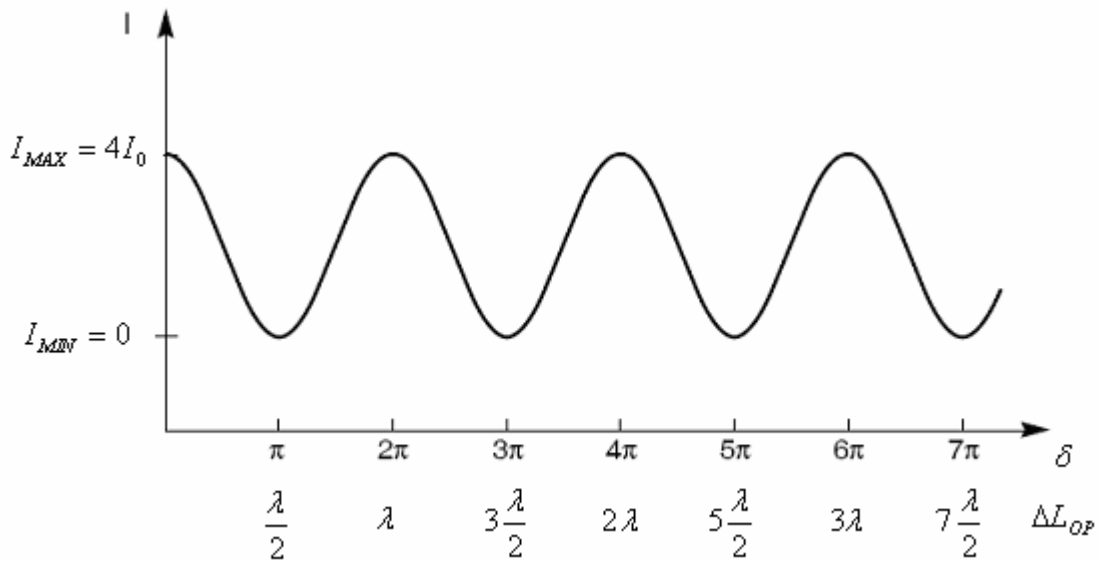


Figura 2 Irradiância em função da diferença de fase e diferença entre caminhos ópticos.

Para que o padrão de interferência seja estável, é necessário que existam algumas condições. As frequências das ondas devem ser iguais e o defasamento entre os feixes deve ser constante. Observa-se também um padrão mais bem definido quando as amplitudes dos feixes são iguais.

### 2.1.2 Coerência

Em óptica, coerência é um conceito que está associado à estabilidade da propagação de uma onda luminosa no tempo e no espaço. É importante destacar que existem dois tipos de coerência: a temporal e a espacial. A coerência espacial é a medida da correlação da fase, em diferentes pontos na direção transversal a direção de propagação, da onda luminosa. É uma indicação da uniformidade da fase da frente de onda. Já a coerência temporal pode ser definida como o intervalo de tempo no qual o campo luminoso se propaga segundo uma mesma função harmônica de forma contínua, ou seja, o intervalo de tempo em que se pode prever

seu comportamento <sup>[3]</sup>. Em termos geométricos, a coerência temporal representa a distância máxima entre dois pontos de uma mesma onda, onde é possível ainda manter uma relação de fase estável. Essa distância, referida como comprimento de coerência, representa a máxima diferença de caminho óptico entre as ondas luminosas, dentro da qual haverá a formação de franjas de interferência. A característica que irá definir o comprimento de coerência é a banda de frequências da fonte de luz. Se existisse uma fonte cuja luz emitida fosse perfeitamente monocromática, a onda luminosa teria um perfil senoidal e comprimento de coerência infinito. Na prática tal fonte não é encontrada <sup>[4]</sup>. Existem casos de fontes muito boas que produzem um feixe de laser com comprimentos de coerência com valores na ordem de centenas de metros. Já a luz branca, cujo espectro luminoso é composto por vários comprimentos de onda diferentes (400 a 700 nm como indicado na figura 3), possui um comprimento de coerência de aproximadamente 1000 nm, que é considerado muito pequeno.

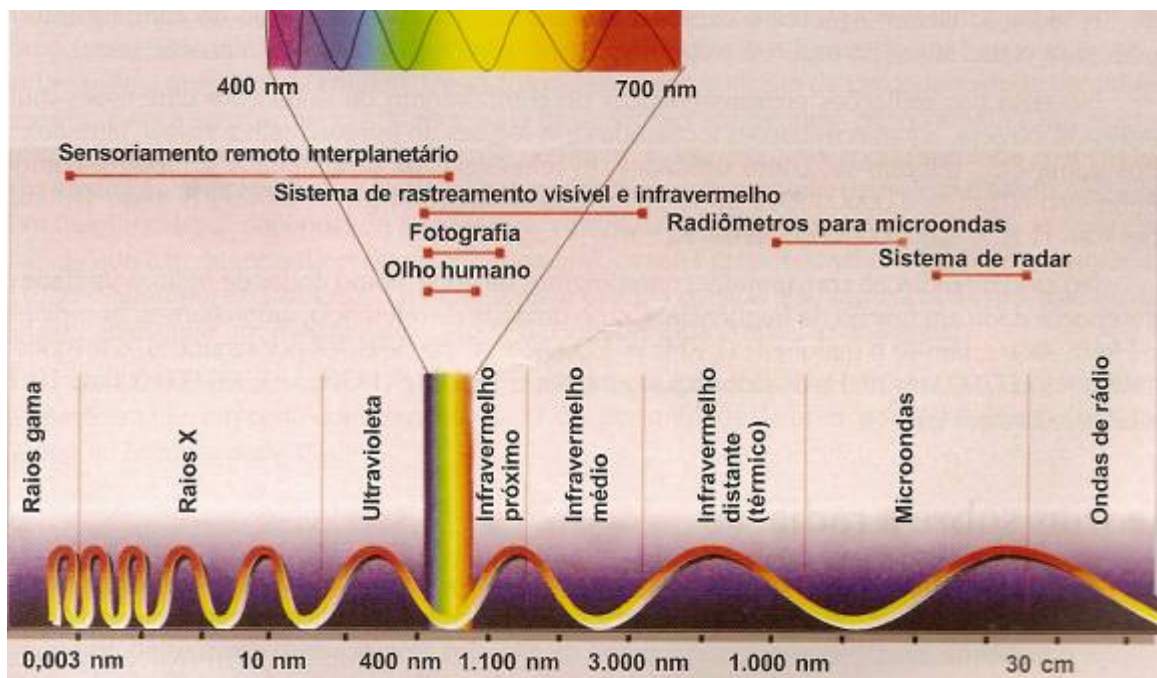
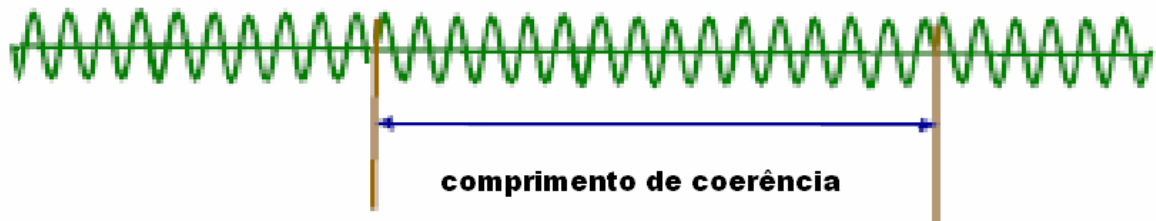


Figura 3 Faixa de frequências do espectro eletromagnético. Destaque para o espectro visível ao olho humano<sup>1</sup>.

O comprimento de coerência da luz possui uma influência muito grande na interferometria, mais especificamente na visibilidade das franjas de interferência.

<sup>1</sup> Imagem disponível em <http://www.geog.ufpr.br/disciplinas/espectro1.doc>. Acessado em 18/09/2007

De acordo com a teoria da coerência, a luz pode ser modelada como trens de ondas com comprimentos finitos e com diferenças de fase entre si distribuídas aleatoriamente <sup>[5]</sup>. A figura 4 ilustra um feixe luminoso modelado por trens de ondas harmônicas com comprimento definido, mas que possuem uma mudança de fase aleatória ao final de cada intervalo.



**Figura 4 Comprimento de coerência de um feixe luminoso**

A figura 5 representa a interferência entre dois feixes que foram modelados como seqüências de trens de ondas, provenientes da mesma fonte, mas com defasagem (atraso) menor que o comprimento de coerência. A fase de cada seqüência é aleatoriamente alterada após cada comprimento de coerência. Na figura, idealmente somente interferência construtiva deveria ser obtida. É o que acontece quando luz da mesma frente de onda interfere. Devido ao atraso, porções de trens de onda diferentes interferem por períodos curtos, produzindo momentos em que a interferência resultante pode não mais ser construtiva. Sendo curtos estes períodos, eles têm pouca influência na figura de interferência, fazendo com que a média ao longo do tempo ainda produza figuras de interferência visíveis e estáveis. A visibilidade das franjas se reduz progressivamente à medida que o atraso aumenta.



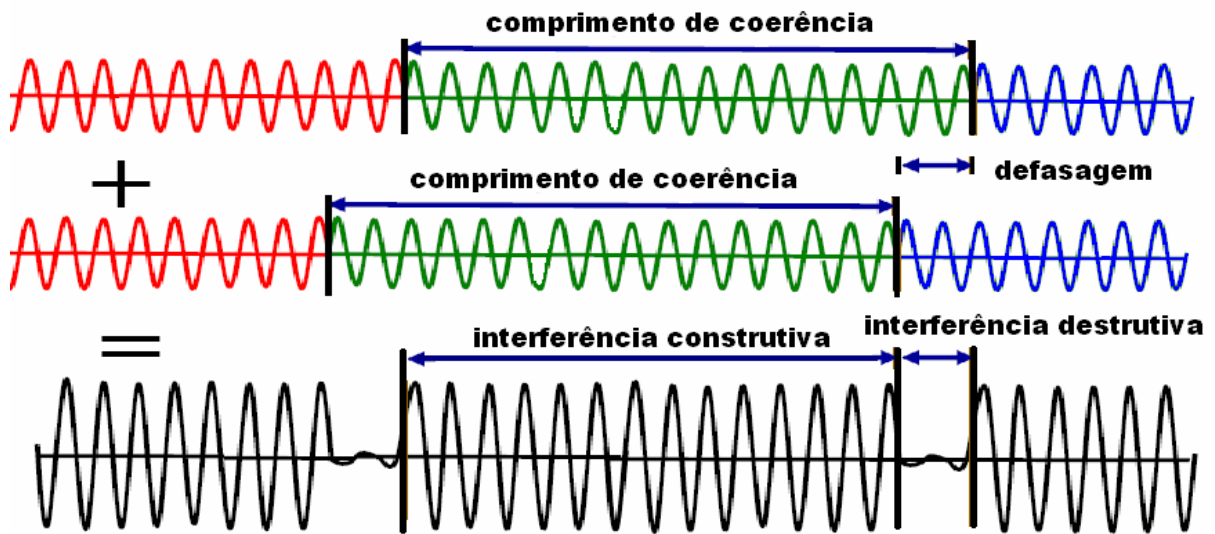


Figura 5 Trens de ondas sinusoidais periódicos com defasagem menor que o comprimento de coerência.

A figura 6 ilustra o outro caso, onde a defasagem é maior que o comprimento de coerência. A interferência resultante é uma onda composta por trechos cujas intensidades variam de forma completamente aleatória. Na média sobre o tempo, a figura de interferência terá um contraste tão baixo que não será visível.

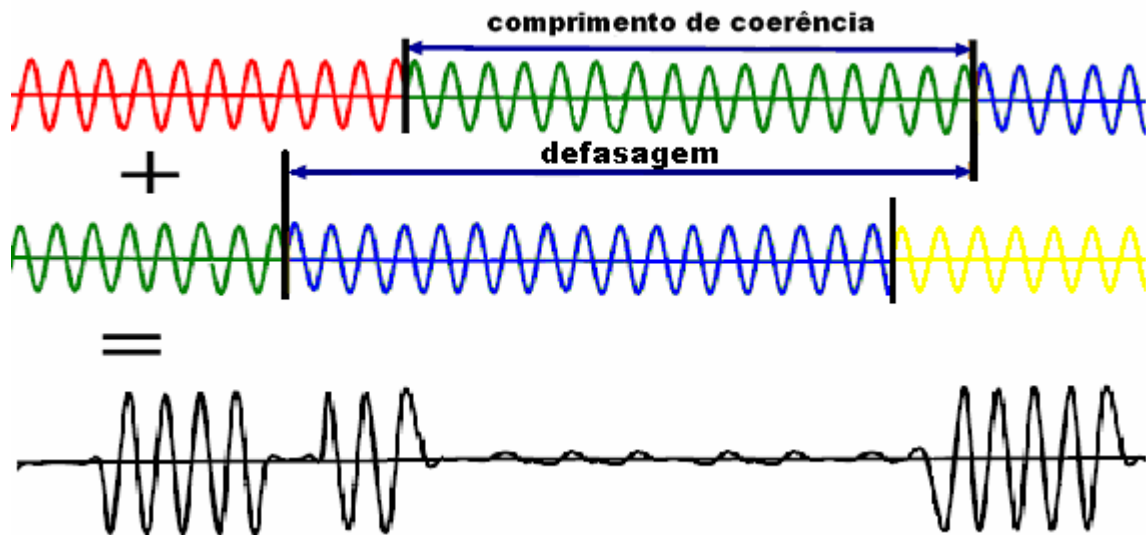


Figura 6 Trens de ondas sinusoidais periódicos com defasagem maior que o comprimento de coerência

A intensidade do feixe resultante poderá ser expressa por <sup>[4]</sup>:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} |\gamma(\tau)| \cos(\delta) \quad \text{Equação 18}$$

onde  $\tau$  representa o tempo de defasagem e  $|\gamma(\tau)|$  representa o valor absoluto de  $\gamma(\tau)$ , conhecido como grau de coerência complexa. O grau de coerência complexa pode assumir valores entre zero e 1, dependendo de três situações:

$$|\gamma(0)| = 1 \quad \text{Equação 19}$$

$$|\gamma(\tau_c)| = 0 \quad \text{Equação 20}$$

$$0 < |\gamma(\tau)| < 1 \quad \text{Equação 21}$$

A completa coerência, ou o maior nível de contraste, será obtida quando  $\tau$  for igual a zero e conseqüentemente  $|\gamma(0)| = 1$ . A intensidade neste caso será:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\delta) \quad \text{Equação 22}$$

Como  $\cos(\delta)$  varia entre 1 e -1:

$$I_{\max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \quad \text{Equação 23}$$

$$I_{\min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} \quad \text{Equação 24}$$

Para o caso de ondas com mesma amplitude, têm-se como valores para completa coerência:

$$I_{\max} = 4I \quad \text{e} \quad I_{\min} = 0 \quad \text{Equação 25}$$

onde  $I_{\max}$  e  $I_{\min}$  representam os valores de intensidade das franjas vizinhas em um padrão de interferência.

Para  $\tau$  igual ao tempo de coerência  $\tau_c$ , haverá ausência de contraste ou incoerência e a intensidade do feixe de interferência será simplesmente:

$$I_{\max} = I_{\min} = I_1 + I_2 \quad \text{Equação 26}$$

Percebe-se então que o tempo de coerência é o fator que irá influenciar muito a formação das franjas de interferência. O máximo nível de contraste na figura de interferência é obtido quando o tempo de defasagem  $\tau$  entre os feixes é igual a zero. Isso significa que os caminhos percorridos pelos feixes interferentes são exatamente iguais, produzindo plena interferência, exceto para luz completamente incoerente.

O tempo de coerência pode ser definido por <sup>[4]</sup>:

$$\tau_c = \frac{1}{\Delta\nu} \quad \text{Equação 27}$$

A coerência também pode ser expressa através do comprimento de coerência dado por <sup>[4]</sup>:

$$L_c = \frac{c}{\Delta\nu} = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} \quad \text{Equação 28}$$

onde:

$\Delta\nu$  = faixa de freqüência da banda espectral da fonte de luz;

$c$  = velocidade da luz;

$\lambda$  = comprimento de onda médio entre as componentes espectrais da fonte;

$\Delta\lambda$  = é a variação do comprimento de onda da fonte da faixa espectral;

Como a luz branca possui uma faixa espectral ampla, possuindo componentes de luz com comprimentos de onda que variam de 400 a 700 nm (comprimento médio = 550 nm), conclui-se que seu comprimento de coerência é muito pequeno, como mostra cálculo <sup>[4]</sup>:

$$L_c = \frac{550^2}{300} \text{ nm} \approx 1 \mu\text{m} \quad \text{Equação 29}$$

Diz-se então se tratar de luz incoerente, isto é, com comprimento de coerência muito pequeno.

## 2.2 Interferometria

A interferometria óptica é uma técnica que utiliza a interferência entre ondas luminosas para realizar medições. Em essência, consiste em dividir feixes de luz, fazendo com que percorram caminhos diferentes, e recombina-los para produzirem padrões visuais.

Existem diversos tipos de interferômetros, alguns baseados na divisão da amplitude e outros na divisão da frente de onda. Os interferômetros baseados na divisão da amplitude são compostos basicamente pelos seguintes componentes:

- Fonte de luz (coerente ou incoerente);
- Divisor de feixe de luz (geralmente um espelho parcial);
- Diferentes caminhos de propagação para os feixes divididos;

- Elemento para recombinar e superpor as ondas separadas;
- Anteparo ou detector para avaliar a figura de interferência resultante da superposição das ondas.

A figura 7 representa a configuração do interferômetro de Michelson <sup>[4]</sup>. O feixe luminoso emitido por uma fonte é dividido em dois pelo divisor de feixe. A partir desse ponto podem ser considerados dois braços em que a luz percorre caminhos diferentes. Ambos os feixes irão refletir em um espelho e retornar ao local onde foram separados. Nesse ponto os feixes se reencontram e se dirigem ao anteparo. Se as condições de interferência (discutidas em 2.1.1 Interferência e 2.1.2 Coerência) forem satisfeitas os feixes irão interferir e conseqüentemente serão observadas franjas de interferência. Caso os caminhos ópticos percorridos pelos dois feixes forem exatamente iguais, haverá interferência construtiva com intensidade máxima no feixe de interferência. À medida que a diferença de caminho óptico entre os feixes se aproxima do comprimento de coerência da luz, a intensidade das franjas diminuirá até não serem mais visíveis.

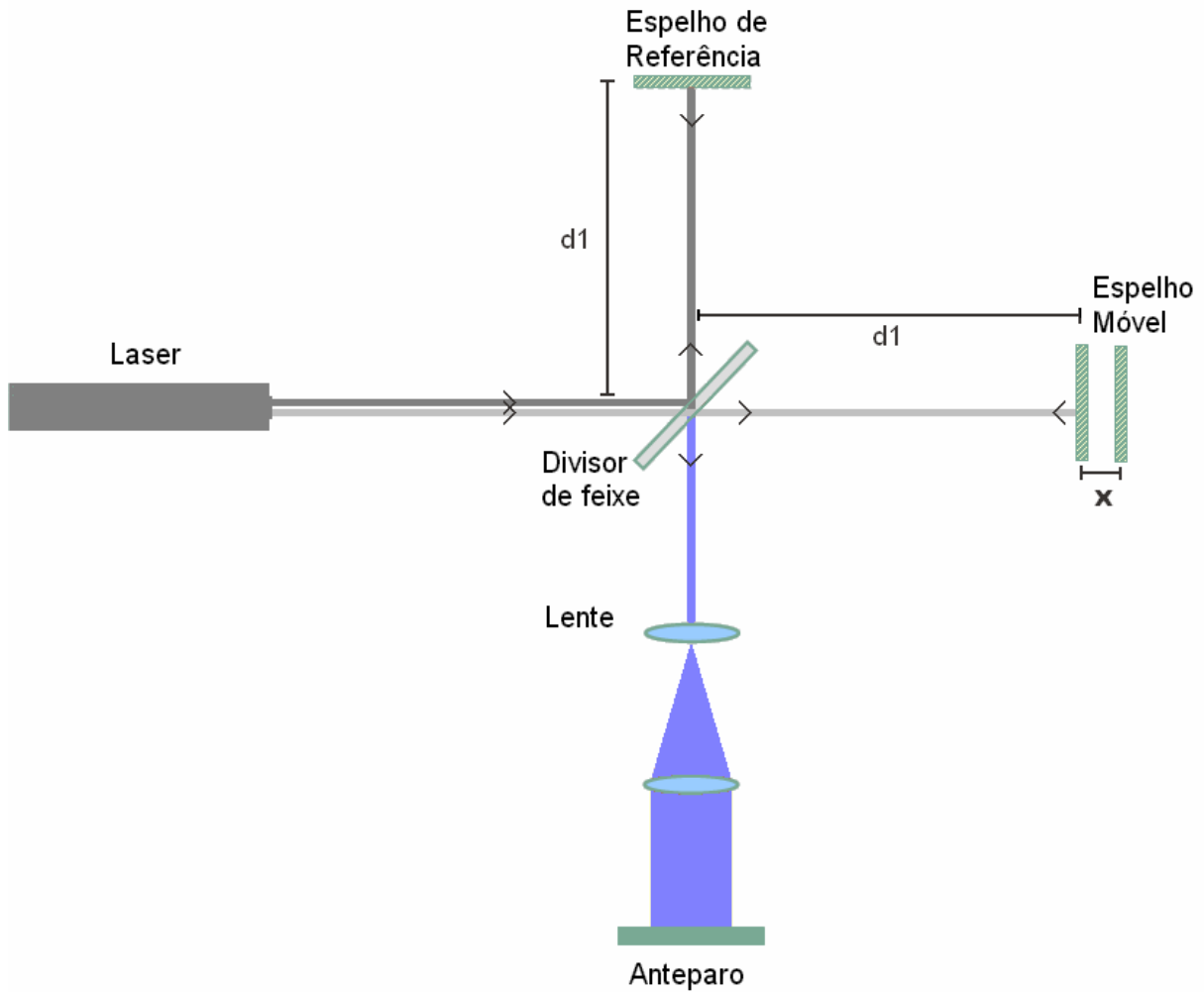
Uma diferença entre os tamanhos dos braços igual a  $x$ , como indica a figura 7, implica numa diferença de caminho óptico entre os feixes duas vezes maior, ou seja,  $2x$ . A diferença de fase será igual a <sup>[4]</sup>:

$$\delta = \frac{4\pi x}{\lambda} \quad \text{Equação 30}$$

A intensidade, definida pela equação 18, para o caso de ondas emitidas pela mesma fonte, será agora dada por :

$$I = 2I_0 \left( 1 + \cos\left(\frac{4\pi x}{\lambda}\right) |\gamma(\tau)| \right) \quad \text{Equação 31}$$

onde  $I_0$  é a amplitude máxima da onda emitida pela fonte de luz.



**Figura 7 Interferômetro de Michelson**

É importante ressaltar que a diferença de caminho óptico deve ser sempre menor que o comprimento de coerência da fonte de luz. Isso é uma condição necessária para se ter um bom contraste das franjas de interferência, ou seja:

$$|2x| < L_c \quad \text{Equação 32}$$

onde:

$|2x|$  = módulo da diferença entre caminhos ópticos entre os braços do interferômetro de Michelson.

$L_c$  = comprimento de coerência da fonte de luz.

Um interferômetro que possui uma fonte com um grande comprimento de coerência produzirá franjas mesmo com uma diferença de caminho óptico muito grande. Já um interferômetro de luz branca irá produzir franjas de bom contraste apenas em um intervalo de deslocamento muito pequeno. Como visto anteriormente na equação 29, o comprimento de coerência da luz branca é aproximadamente

1  $\mu\text{m}$ , o que implica que as franjas somente serão visíveis se a diferença  $x$  entre os braços do interferômetro não ultrapassar o limite  $\pm 0,5 \mu\text{m}$ .

A figura 8 representa o perfil da intensidade das franjas luminosas em função da diferença de caminho óptico entre os feixes do interferômetro. Este gráfico é conhecido também como correlograma. A intensidade do sinal de interferência varia de forma cossenoidal, como mostrado anteriormente na figura 2, porém este é modulado por uma envoltória com a forma aproximada de uma função gaussiana, cujas características dependem do comprimento de coerência da luz. Essa envoltória irá modificar o contraste do sinal de interferência em função da diferença de caminho óptico entre os feixes. À medida que a diferença de caminho óptico se aproxima de  $\pm 1 \mu\text{m}$ , a envoltória, ou envelope, praticamente anulará o contraste, o que tornaria as franjas não mais visíveis. Para uma diferença nula de caminho óptico tem-se a maior variação da intensidade luminosa (pico da envoltória do correlograma). Quanto menor o comprimento de coerência menor será a abertura (desvio padrão) dessa curva gaussiana, conseqüentemente, menor será o intervalo de visibilidade das franjas.

A estratégia de medição utilizada pelos interferômetros de luz incoerente é a de realizar uma varredura em múltiplos pontos de uma superfície para encontrar em cada um deles a posição onde a diferença de caminho óptico é nula. Esses pontos são determinados através da aquisição do correlograma para cada pixel da imagem e determinação do ponto de máximo da envoltória. Os equipamentos comerciais que utilizam essa técnica diferem no modo de detecção e determinação da posição do valor de pico da envoltória <sup>[7]</sup>.

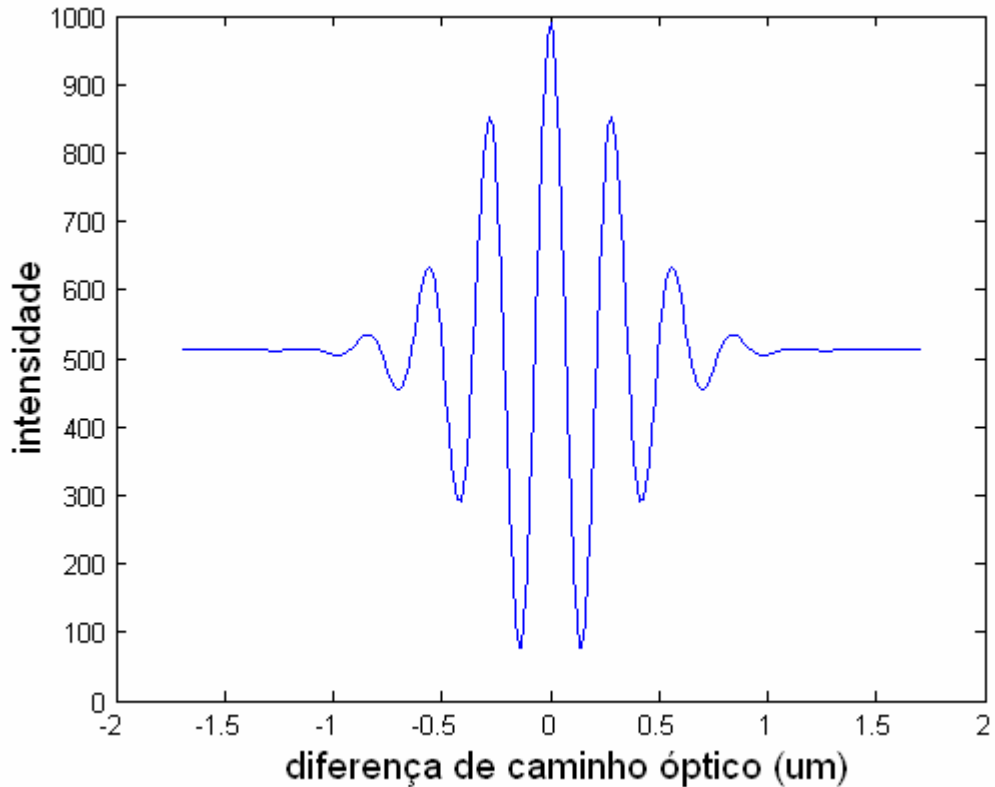


Figura 8 Perfil de intensidade das franjas obtido por um interferômetro de luz branca. Também conhecido como correlograma. Intensidade da luz quantizada na escala de cinza de 1024 níveis.

### 2.3 Aplicações da Interferometria de Luz Incoerente

Há em muitas indústrias uma grande demanda por medições de superfícies e pequenas estruturas de precisão. Na indústria metal-mecânica e de semicondutores há grande interesse na medição de componentes com dimensões que variam de poucos micrometros até alguns centímetros. A interferometria de luz incoerente é considerada metrologicamente atrativa devido a suas vantagens sobre a interferometria convencional como a capacidade de medir superfícies tanto rugosas como espelhadas, com variações desde submicrométricas até da ordem de centímetros.

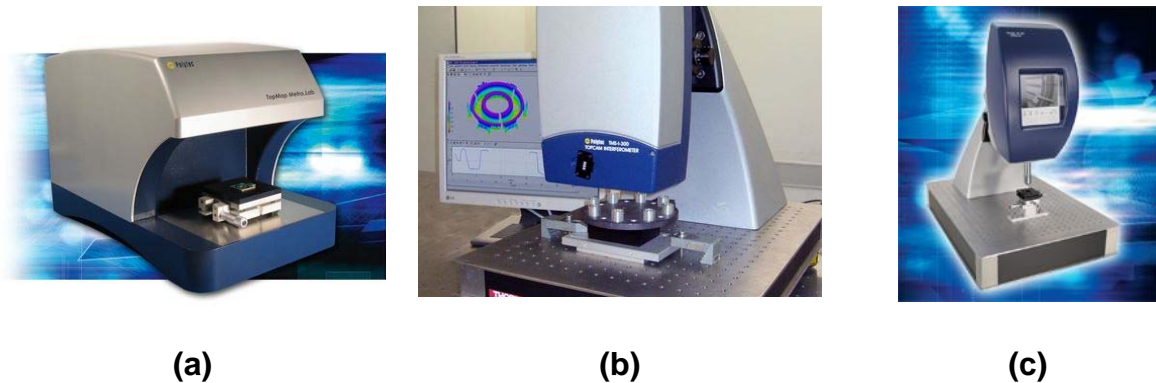
Interferômetros de luz incoerente utilizam fontes luminosas com larga faixa espectral. As fontes mais populares são os LEDs (*Light Emitting Diode*) e diodos laser multimodo, que possuem comprimentos de coerência relativamente pequenos <sup>[9]</sup>.

Dependendo do comprimento de coerência de suas fontes, os interferômetros de luz incoerente podem ser utilizados para diferentes propósitos, como <sup>[8]</sup>: medição

de distâncias e deslocamentos micrométricos, medição tridimensional do perfil de superfícies, medição de rugosidade, medição de cilindridade, medição de desgaste, medição de planeza e paralelismo.

## 2.4 Interferômetros Comerciais

A figura 9 ilustra alguns sistemas comerciais que utilizam o princípio da interferometria de luz incoerente. Eles são capazes de realizar medições com resolução de 1 nm na direção normal à superfície medida, como o caso do interferômetro de luz branca da empresa Breitmeier. O equipamento utiliza uma lâmpada de halogênio como fonte de luz (comprimento de coerência de 3,5  $\mu\text{m}$ ). Sua faixa de medição pode chegar até 50 mm ao adotar um motor de passo, ou 150  $\mu\text{m}$  ao empregar um atuador piezoelétrico. Sua resolução lateral (relacionada ao tamanho do pixel) é de 1  $\mu\text{m}$ . É capaz de medir áreas de 250  $\mu\text{m}$  x 250  $\mu\text{m}$  <sup>[11]</sup>. Foi desenvolvido para medição de perfil de superfícies, rugosidade e microestruturas. Outro modelo, o TMS-100 TopMap Metro.Lab, da Polytec, possui resolução vertical de 20 nm, faixa de medição de 70 mm, campo de visão de 50 mm x 50 mm e resolução lateral de 47  $\mu\text{m}$ . Esse é utilizado para extração de perfil tridimensional de objetos na escala de centímetros e também para a medição de planeza de furos cegos com até 70 mm de profundidade.



**Figura 9** Interferômetros comerciais. (a) TMS-100 TopMap Metro.Lab. (b) TMS-300/320 TopMap In.Line. (c) TMS-1200 TopMap  $\mu$ .Lab <sup>[12]</sup>.

Há também no mercado sistemas para medição em ambientes de produção. O TMS-320 TopMap In.Line, da Polytec, foi desenvolvido para inspeção rápida em linhas de produção. Com campo de visão de 19 mm de diâmetro, resolução vertical de 1  $\mu\text{m}$ , resolução lateral de 39  $\mu\text{m}$  e faixa de medição de 50 mm, ele é capaz de



realizar medições mais velozes de peças e representá-las através de *softwares* de visualização tridimensional <sup>[12]</sup>.

Para a realização de medições de rugosidade e topografia de superfícies na ordem de micrometros pode-se citar o TMS-1200 TopMap  $\mu$ .Lab. Sua resolução vertical é muito pequena, sendo de 0,3 nm. Seu tempo de medição para uma faixa de 20  $\mu$ m é de aproximadamente 1 min. A incerteza de medição é avaliada em 0,5%. Seu campo de visão dependerá das lentes utilizadas, podendo variar entre 3,59 mm x 2,63 mm, para um fator de aumento de 2,75 vezes, até 0,18 mm x 0,134 mm, para um fator de aumento de 50 vezes. A resolução de cada *pixel* assumirá respectivamente os valores 3 e 0,134  $\mu$ m <sup>[12]</sup>.

Referente à medição de formas cilíndricas dois sistemas podem ser citados: o Tropel ThetaForm, da Corning Tropel, e o IRad, da Photonita. Ambos realizam medição de formas cilíndricas utilizando interferometria. O Tropel ThetaForm utiliza uma técnica de interferometria de duplo comprimento de onda patenteado para medir peças cilíndricas, cônicas e até mesmo planas. O objeto é posicionado sobre um eixo rotatório que gira a uma velocidade de 600 rpm bem próximo do cabeçote de medição. A varredura é feita ponto a ponto e por fim gera-se um mapa tridimensional da peça. Seu tempo de medição médio é menor que 120 s e mede rugosidade até um limite superior de 2  $\mu$ m. Os limites máximos das peças são 45 mm de comprimento e 25 mm de diâmetro. Sua resolução é de 5 nm e sua incerteza de medição para diâmetros é de 100 nm <sup>[13]</sup>.



**Figura 10** Tropel ThetaForm [13]

O IRAD da Photonita utiliza a interferometria de luz incoerente para realizar medições em peças cilíndricas e cônicas <sup>[15]</sup>. O equipamento pode ser utilizado para medir circularidade e cilíndricidade, bem como avaliar desgaste em peças de revolução. Permite uma avaliação visual tridimensional da peça, uma ferramenta

muito utilizada no controle de qualidade e desenvolvimento de produtos. O IRAD pode medir peças com diâmetros internos entre 50 e 200 mm e diâmetros externos entre 1 e 26 mm. Sua faixa de medição radial se estende a 200 mm com resolução de 50 nm. A peça medida permanece estática durante o processo de medição. Sua incerteza de medição para formas é avaliada em  $\pm 0,96 \mu\text{m}$  e para medição dimensional em  $\pm 2,1 \mu\text{m}$  <sup>[15]</sup>. O tempo de medição de uma peça se divide em tempo de alinhamento e tempo de varredura. O primeiro consome em média quinze minutos e o segundo depende da distância entre os limites radiais de varredura, sendo definido por aproximadamente  $(2 \text{ min} + 10 \text{ s}/\mu\text{m})$  <sup>[15]</sup>.

O IRAD será melhor apresentado nos próximos capítulos, pois será o objeto de estudo do presente trabalho, que visa contribuir para o seu desenvolvimento.

# Capítulo 3

## O Sistema IRAD

Esse capítulo apresenta o sistema de interferometria radial IRAD, em desenvolvimento pela Universidade Federal de Santa Catarina e pela empresa Photonita desde 2002, e que servirá de base para o trabalho. Inicialmente será feita uma introdução sobre o equipamento, seu princípio de medição e seus componentes de *hardware* e *software*, visando proporcionar uma noção geral de suas funcionalidades. Algumas medições serão realizadas a fim de se avaliarem os tempos dos processos envolvidos. Por fim, serão listados os requisitos de automatização, os quais serão abordados no próximo capítulo desse trabalho de mestrado.

### 3.1 Introdução ao Sistema

O primeiro protótipo do interferômetro radial foi desenvolvido por Dal Pont e Albertazzi<sup>[15]</sup> e deu origem, posteriormente, ao sistema IRAD.

O IRAD tem a configuração de um interferômetro de Michelson modificado. Utiliza uma fonte de luz incoerente e um espelho cônico para realizar medições de partes mecânicas de forma cilíndrica. O espelho cônico possui um furo concêntrico, onde a peça cilíndrica é inserida. O anteparo, que fazia parte da configuração original, foi substituído por uma câmera digital de alta taxa de aquisição, com um sensor CCD. Esses componentes serão mais bem explanados ao decorrer do trabalho.

### 3.2 Hardware

O *hardware* do IRAD é composto por três classes distintas de componentes: os ópticos, que configuram o interferômetro; os eletromecânicos, utilizados para movimentação dos componentes ópticos e da peça; e os eletrônicos, que realizam a aquisição, transmissão e processamento de dados. Como discutido anteriormente, o

arranjo óptico do sistema de interferometria radial se assemelha à configuração de um interferômetro de Michelson adaptado com um espelho cônico. A figura 11 mostra sua configuração. Uma fonte de luz incoerente emite um feixe luminoso em direção ao divisor de feixes. Após o divisor passam a existir dois feixes que percorrem caminhos diferentes. O primeiro deles, chamado C1, é percorrido pelo feixe que vai do divisor até o espelho cônico, retornando ao divisor e em seguida para a câmera. O segundo, chamado C2, é percorrido pelo feixe que sai do divisor, reflete no espelho de referência, retorna ao divisor e se dirige também à câmera. A câmera registra a figura de interferência, dependendo da diferença entre os caminhos ópticos entre os feixes. O sensor da câmera adquire as intensidades das figuras de interferência e as converte para valores digitais, possibilitando processamento através de um computador.

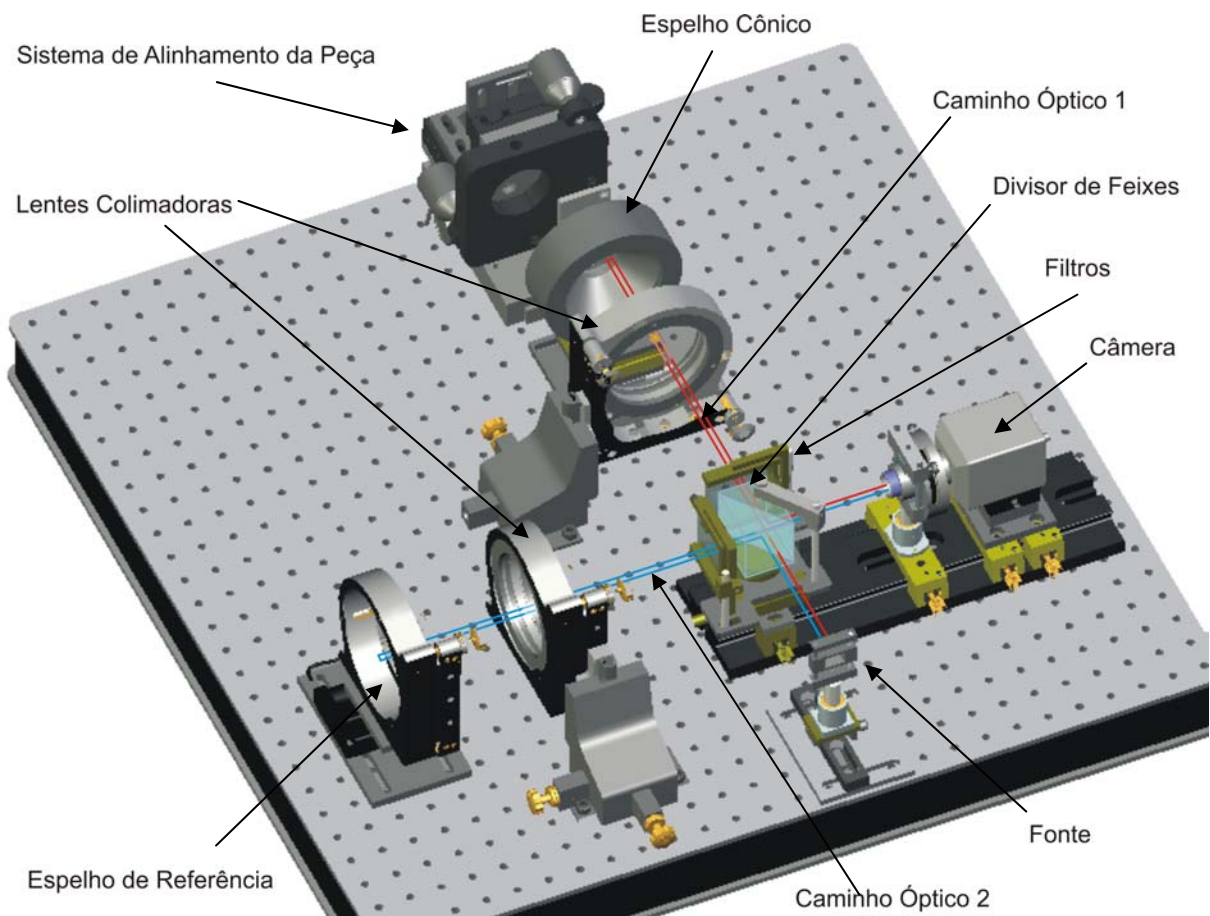
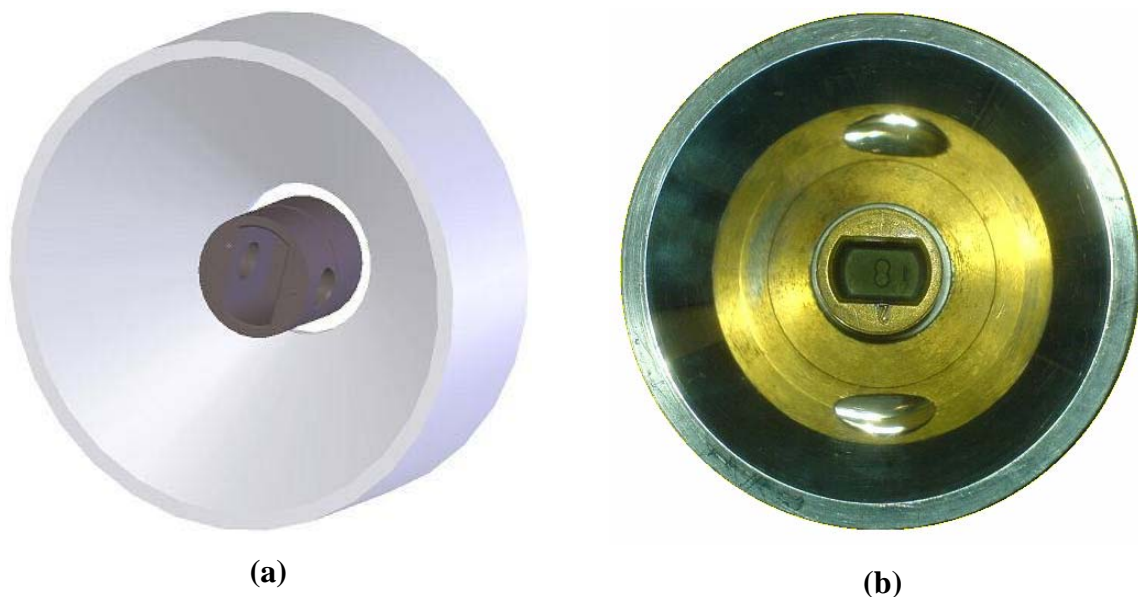


Figura 11 Visão superior dos componentes do interferômetro radial IRAD.

Resumidamente, a diferença de caminhos ópticos nula é encontrada quando, a partir da movimentação do espelho de referência, se obtém as figuras de interferência de maior contraste na imagem. O espelho é movimentado através de um micromotor CC, equipado com um *encoder* e controlado via *software*, através da interface RS232. Para que se encontrem franjas bem definidas é necessário que o sistema óptico esteja muito bem alinhado e que a peça seja posicionada de modo que seu eixo coincida com o eixo do espelho cônico.

### 3.2.1 Espelho Cônico

Para realizar a medição de peças cilíndricas, foi inserido no braço do caminho C1, um espelho cônico de 45°. A figura 12 (a) ilustra o espelho cônico em conjunto com um pistão. As paredes internas do espelho refletem a luz proveniente da peça em seu centro, gerando uma imagem plana e circular, como ilustra a figura 12 (b).



**Figura 12** Espelho cônico com peça inserida. (b) Imagem superior do conjunto pistão-espelho, mostrando a imagem planificada da superfície cilíndrica do pistão, refletida no espelho.

O espelho foi projetado para medir peças cilíndricas de até 13 mm de raio. Possui um diâmetro externo de 80 mm e um furo central com 28 mm de diâmetro. Os valores de rugosidade Ra e erro de forma de espelho, informados pelo seu fabricante, são de 4,7 nm de 406 nm respectivamente. Com esse espelho é possível medir trechos de cilindros com até 21 mm de altura <sup>[15]</sup>.

### 3.2.2 Óptica

A óptica de um interferômetro de Michelson poderia ser projetada com feixes de luz colimados em todo o caminho óptico. Para isso deve-se utilizar uma lente colimadora logo à frente da fonte luminosa. Para possibilitar a medição de toda a área compreendida pelos 80 mm de diâmetro do espelho cônico, todos os componentes ópticos do interferômetro deveriam ter dimensões compatíveis com essa ordem de grandeza. Entretanto um divisor de feixes com essas dimensões elevaria muito o custo do protótipo, pois teria que ser produzido sobre encomenda. Para tornar o custo do protótipo mais acessível, fez-se a opção por uma óptica que operasse com feixes de ondas divergentes na maior parte do caminho, possibilitando a utilização de um divisor de feixes comercial. Portanto, a lente colimadora situada à frente da fonte luminosa foi retirada e foram adicionadas outras duas lentes colimadoras, uma à frente do espelho de referência e outra à frente do conjunto espelho cônico e peça.

Outro importante fator é a utilização de um filtro cinza no braço do interferômetro que corresponde ao caminho óptico do feixe de referência, o caminho C1. Como demonstrado pela equação 17, observa-se um padrão de interferências melhor definido quando as amplitudes dos feixes são iguais. O filtro é utilizado para equalizar as intensidades dos feixes de luz no interferômetro, pois o espelho de referência reflete mais luz que o objeto <sup>[14]</sup>. Com a adição do filtro se altera o caminho óptico, pois o índice de refração do material do filtro (vidro) é diferente do índice de refração do ar, o que provoca dispersão. Para compensar a dispersão causada pelo filtro, foi adicionado um outro componente óptico no braço do espelho de referência. Esse componente possui a mesma espessura e é feito de um substrato com mesmo índice de refração do material do filtro cinza, mas não altera a intensidade do feixe.

Para a aquisição de imagens foi projetada uma óptica telecêntrica. Roethe-Neves em seu trabalho definiu a vantagem da utilização de uma óptica telecêntrica como sendo a diminuição do erro de paralaxe. Dal Pont aplicou essa técnica no primeiro protótipo do IRAD, adicionando ao projeto uma íris para controle de contraste da interferência.

A figura 13 ilustra a diferença de perspectivas entre lentes convencionais e lentes telecêntricas.

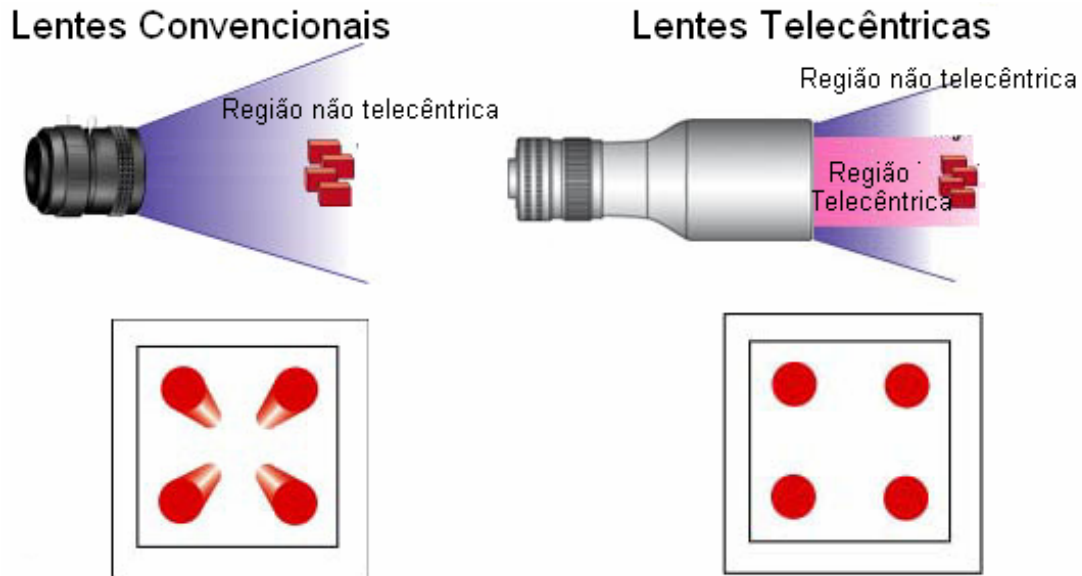


Figura 13 Comparação entre lentes convencionais e lentes telecêntricas. <sup>[17]</sup>

As lentes telecêntricas fazem com que apenas os raios que chegam paralelamente ao eixo óptico atinjam os sensores, anulando a perspectiva do objeto e conseqüentemente os erros de paralaxe.

O último componente óptico do sistema é a câmera digital. A aquisição das figuras de interferência é realizada por uma câmera com sensor CCD. Esse sensor adquire a imagem de interferência e a converte em *pixels*, com valores numéricos de intensidades luminosas.

O modelo utilizado, Cohu 7500, foi escolhido devido a sua resolução espacial, velocidade de aquisição e sensibilidade <sup>[15]</sup>, respectivamente  $6,7 \mu\text{m} \times 6,7 \mu\text{m}$  por *pixel*, 12 quadros por segundo e nível mínimo de iluminação de  $0,28 \text{ lx}^2$ .

### 3.2.3 Iluminação

A escolha da fonte de iluminação deve ser cuidadosa. Basicamente ela irá depender de três parâmetros: o comprimento de coerência, a luminância e o tamanho da fonte. Algumas análises para determinação desses parâmetros devem

<sup>2</sup> Símbolo para lux, unidade SI derivada. Pode ser expressa por  $(\text{cd sr} / \text{m}^2)$

ser realizadas. Como citado no capítulo anterior, um comprimento de coerência pequeno é necessário para se obter melhor exatidão na medição, pois mais pronunciado será o pico da envoltória do correlograma <sup>[15]</sup>. Na prática, porém, isso torna a busca por franjas de interferência mais onerosa e diminui a velocidade da medição. Uma fonte com alta emissão luminosa é necessária, pois para se medir superfícies foscas é necessário mais energia para que a reflexão difusa da peça seja captada pelo sensor. Quanto ao tamanho da fonte, é ideal que seja o menor possível. Um mesmo ponto da peça é iluminado por muitos pontos da fonte, causando redução no contraste da interferência, logo seu tamanho deve ser pequeno.

A fonte de iluminação utilizada foi o LED superluminoso SFH 421, fabricado pela Siemens. Seu comprimento de onda médio é de 880 nm, com faixa espectral de 80 nm. Esse LED possui um nível alto de luminância energética<sup>3</sup>, que é conhecida por:

$$L_e = \frac{\Phi_e}{A\Omega} \quad \text{Equação 33}$$

onde:

$\Phi_e$  = fluxo luminoso em W;

A = área emissiva em m<sup>2</sup>;

$\Omega$  = ângulo sólido formado entre um objeto e um ponto da fonte de luz em sr.

A luminância energética do SFH 421, calculada através dos valores fornecidos pelo fabricante, é de  $1438 \times 10^4$  W/(m<sup>2</sup>sr) (watts por esterradiano<sup>4</sup> e por metro quadrado), seu comprimento de coerência é de aproximadamente 10  $\mu$ m<sup>5</sup> e sua área emissora efetiva é de apenas 0,16 mm<sup>2</sup> <sup>[16]</sup>.

---

<sup>3</sup> **Luminância energética**, em uma direção determinada, de uma fonte superficial de intensidade energética é igual a 1 watt por esterradiano, por metro quadrado de sua área projetada sobre um plano perpendicular à direção considerada.

<sup>4</sup> O **esterradiano** é o ângulo sólido de um cone que, tendo o vértice no centro de uma esfera, intersecta na superfície dessa esfera uma área igual à de um quadrado cujo lado tem um comprimento igual ao do raio da esfera.

<sup>5</sup> O comprimento de coerência do LED SFH 421 é dado para valores do espectro acima de 50% da intensidade máxima.



### 3.2.4 Sistema de Varredura do Espelho de Referência

Como visto no item anterior, o comprimento de coerência da fonte luminosa do IRAD é de 10  $\mu\text{m}$ . Como indicado na equação 32, um deslocamento de  $X$  do espelho de referência implicará numa diferença de caminho óptico igual a  $2X$ . Assumindo que a diferença de caminho óptico seja nula neste momento para um determinado ponto sendo medido, conclui-se que o espelho só poderá de deslocar no máximo 5  $\mu\text{m}$ , tanto para um sentido quanto para o outro, de modo que continue dentro da região que produzirá sinal de interferência perceptível.

Durante a medição de uma peça, o espelho de referência será deslocado a passos constantes, englobando uma faixa radial predeterminada e adquirindo uma imagem a cada passo. No final da varredura, se terá um conjunto de imagens seqüenciadas. Um algoritmo de processamento de imagens irá procurar por sinais de correlograma (figuras 8 e 14) nesse conjunto de imagens. Cada um dos  $N$  *pixels* será analisado, gerando  $N$  sinais de correlograma. Para cada sinal de correlograma será calculado um envelope e desse extraída a posição de seu pico. O algoritmo utilizado no IRAD para o cálculo do envelope do correlograma é denominado de *phase shifting* ou deslocamento de fase. Esse algoritmo utiliza os valores de um correlograma para interpolar um envelope. A equação da intensidade da franja de interferência em função da diferença de caminho óptico pode ser definida por:

$$I(l) = I_0 + A(l) \cos\left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right) \quad \text{Equação 34}$$

onde:

$l$  = diferença de caminho óptico;

$I_0$  = soma das amplitudes dos feixes que interferem;

$A(l) = I_0 |\gamma(l)|$

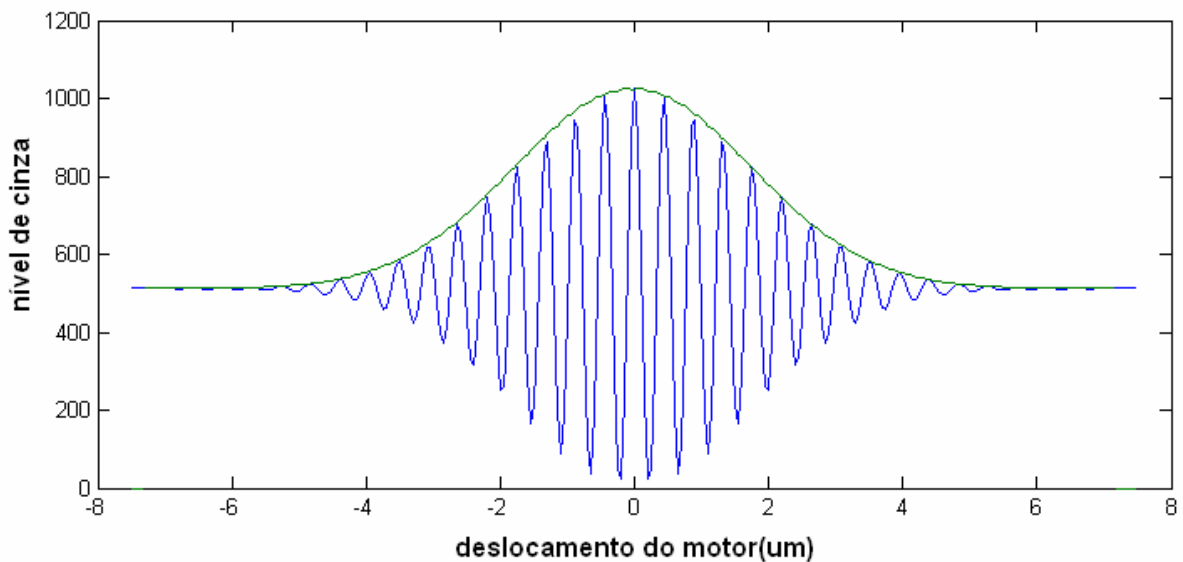
O algoritmo utiliza dez valores de intensidade da franja para calcular cada valor do envelope. O intervalo entre esses valores deve ser constante e equivalente a um deslocamento de fase de  $45^\circ$ . A equação é dada por:

$$A(l) = \sqrt{\frac{[2(I_{90} - I_{270}) + 2(I_{135} - I_{315})]^2 + [(I_{180} - I_{360}) - (I_0 - I_{180}) + (I_{225} - I_{405}) - (I_{45} - I_{225})]^2}{2}} \quad \text{Equação 35}$$

Um motor de passo irá deslocar o espelho de referência em passos iguais correspondentes a 45° de deslocamento de fase. Para um comprimento de onda médio da fonte de luz de 880 nm, 45° de defasagem compreende a 110 nm de deslocamento na onda. Como o deslocamento do motor equivale a uma diferença de caminho óptico duas vezes maior, seu passo deve ser de exatos 55 nm. A figura 14 representa o resultado de uma simulação feita utilizando o algoritmo de 10 passos em um sinal de função de coerência com as características do LED SFH 421.

A função utilizada para gerar o sinal do correlograma é dada por <sup>[18]</sup>:

$$I(l) = I_o \left\{ 1 + e^{-16 \left(\frac{l}{l_c}\right)^2 \ln 2} \cos\left(\frac{2\pi 2l}{\lambda}\right) \right\} \quad \text{Equação 36}$$



**Figura 14** Resultado da simulação do cálculo do correlograma utilizando o algoritmo de 10 passos.

O modelo de motor utilizado no sistema IRAD possui um passo mínimo de 50 nm a uma velocidade de até 1,5 mm/s. O suporte do espelho é posicionado acima do estágio de deslocamento, como demonstra a figura 15. Uma aceleração ou uma desaceleração muito brusca do motor implicará em uma oscilação do espelho. Essa inclinação prejudica a medição, pois altera o caminho óptico percorrido pelo feixe de luz. O motor de deslocamento possui parâmetros de controle de aceleração que podem ser ajustados para reduzir o efeito de inclinação causado no espelho de referência.

Após o cálculo do envelope do correlograma é necessário encontrar seu ponto máximo. Uma forma muito conhecida e utilizada na interferometria de luz branca é a determinação do pico do sinal através do cálculo do centróide do envelope, que pode ser determinado por <sup>[15]</sup>:

$$l_0 = \frac{\sum [l_i A(l_i)]}{\sum A(l_i)}$$

Equação 37

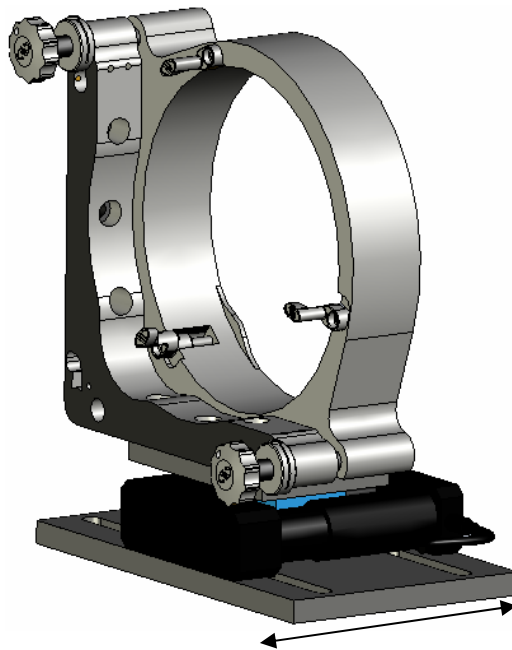


Figura 15 Sistema de movimentação do espelho de referência

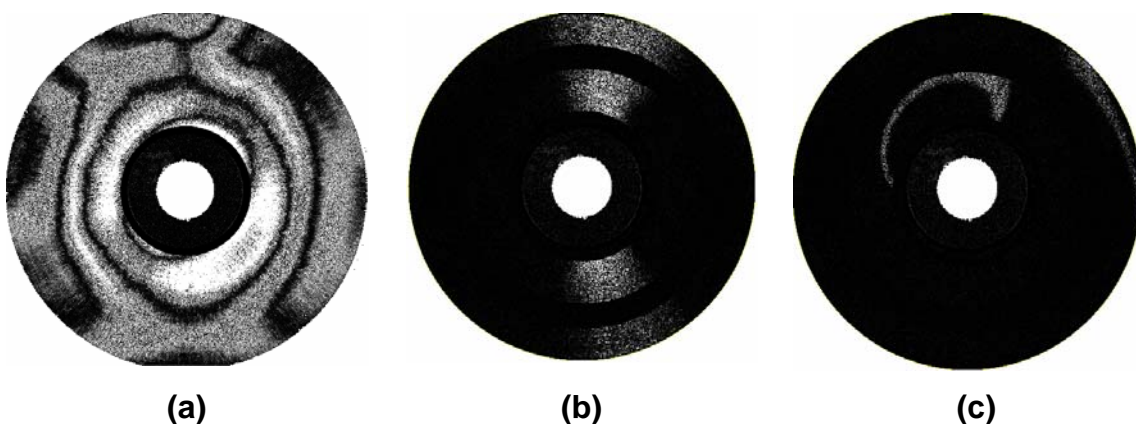
### 3.2.5 Alinhamento da Peça no Sistema Óptico

Para se obter um resultado de medição satisfatório, todos os componentes do sistema devem estar bem alinhados. Os eixos do espelho cônico e das lentes devem coincidir e o mesmo serve para a peça a ser medida. Sem dúvida a peça é a parte mais penosa a se alinhar, pois o processo é lento, necessita ser repetido a cada inserção de nova peça e requer treino. Outro fator importante é a diminuição do tempo de medição. Uma peça bem alinhada necessitará de uma faixa de varredura menor para ser medida, o que reduz o tempo de medição.

O processo pode ser dividido em duas partes: o alinhamento grosseiro e o alinhamento fino. Dependendo do ângulo de inclinação entre o eixo do cilindro e o eixo do espelho cônico haverá regiões onde a luz será refletida em outras direções,

formando na imagem refletida do cilindro áreas não uniformemente iluminadas, isto é, com regiões claras e escuras. Nessas regiões não serão formadas figuras de interferência com contraste suficiente para se realizarem medições. Esse desalinhamento grosseiro é facilmente notado e rapidamente corrigido. Ao fim desse processo de alinhamento grosseiro, a imagem do cilindro estará uniformemente iluminada, porém serão visualizadas figuras de interferência por toda a peça. Para que as franjas ocupem toda a superfície da peça um ajuste fino é necessário. Por isso a primeiro é denominado de alinhamento grosseiro. Geralmente o alinhamento fino requer muito mais tempo e habilidade que o alinhamento grosseiro. Para a execução desse procedimento é necessário um operador treinado para a execução.

O alinhamento da peça é feito através da análise visual das figuras de interferência pelo operador. Este deve utilizar sua experiência para, com base na forma da figura de interferência, identificar o desalinhamento da peça e corrigi-lo. A figura 16 fornece alguns exemplos de desalinhamentos. As franjas demonstradas pelas figuras foram geradas com auxílio de um *software* e seu processo de geração será detalhado no quarto capítulo. Em 16 (a) são mostradas as franjas obtidas com o alinhamento de um cilindro padrão com acabamento espelhado. Essa figura mostra poucas franjas cobrindo toda a área de medição, o que indica um excelente alinhamento da peça. A figura 16 (b) mostra um cilindro rugoso (pistão) com um desalinhamento leve no eixo X. A figura 16 (c) mostra o mesmo pistão com desalinhamento em X, Y,  $\emptyset X$  e  $\emptyset Y$ .



**Figura 16** (a) cilindro alinhado. (b) cilindro levemente desalinhado. (c) cilindro muito desalinhado.

O tempo de alinhamento de uma peça varia muito. Normalmente um operador bem treinado leva entre 12 e 20 min. Esse tempo, para alguém não treinado, sobe consideravelmente, desestimulando a utilização do IRAD.

Para o alinhamento das peças foi projetado e construído no Labmetro um sistema de eixos com motores de passo acoplados. Esse aparato possibilita a movimentação da peça em quatro eixos: vertical (Y), horizontal (X), angular em torno do eixo vertical ( $\emptyset Y$ ) e angular em torno do eixo horizontal ( $\emptyset X$ ). A figura 17 ilustra o sistema com seus motores de passo. A figura 18 ilustra o módulo de acionamento seqüencial de motores utilizado para movimentar cada eixo. Os motores são acionados através de um controle manual e seqüencial, ou seja, apenas um motor pode ser acionado por vez. Essa restrição é imposta pelo próprio controlador dos motores. Cada motor possui uma faixa de deslocamento de 11,0 mm, com incremento mínimo de 0,2  $\mu\text{m}$  e velocidade máxima de 0,9 mm/s. Esses motores substituem os parafusos das mesas de deslocamento micrométrico, utilizadas no primeiro protótipo, tornando o processo de alinhamento mais eficiente e mais rápido. Esse suporte irá posicionar a peça no centro do espelho cônico, como demonstrado na figura 12(a), possibilitando assim a visualização da imagem planificada pela câmera, em 12 (b).

Um experimento com um cilindro de 22,5 mm de diâmetro foi feito para verificar a importância de realizar o alinhamento da peça antes de sua medição. A mesma peça foi medida desalinhada e depois alinhada. No primeiro caso realizou-se um alinhamento grosseiro no cilindro para que as franjas surgissem e os limites de varredura fossem determinados. Portanto o cilindro foi medido com faixa de varredura muito grande. No segundo caso foi realizado manualmente um alinhamento fino, reduzindo a faixa de varredura ao mínimo. Os resultados podem ser vistos na tabela 2.

**Tabela 2 Comparação de tempos de medição entre peça alinhada e desalinhada**

Peça	Limite inferior da faixa radial de medição	Limite superior da faixa radial de medição	Faixa de Medição	Tempo Total
<b>Desalinhada</b>	11,186478 mm	11,325717 mm	0,139239 mm	29 min 12 s
<b>Alinhada</b>	11,250797 mm	11,267619 mm	0,016822 mm	04 min 22 s
<b>Peça</b>	<b>Tempo de alinhamento grosseiro / alinhamento fino</b>			
<b>Desalinhada</b>	2 min 40 s			
<b>Alinhada</b>	12 min 20 s			

Analisando os resultados se conclui que o alinhamento fino manual da peça reduz drasticamente o tempo de medição. Mesmo adicionando o tempo necessário para alinhar a peça, ainda assim é vantajosa a medição de uma peça alinhada.

Outro fator a ser analisado é a influência do alinhamento sobre o erro de forma da peça calculado pelo sistema. Para avaliar essa influência foram realizadas três medições com a mesma peça em três níveis diferentes de desalinhamento. Para cada medição foi gerada uma nuvem de pontos e calculada a cilindridade. Em seguida essas três nuvens foram combinadas em três pares e seus pontos subtraídos entre si, gerando outras três nuvens de pontos. Para cada uma dessas novas nuvens de pontos foi gerado um histograma e dele calculada a média e o desvio padrão. Os resultados podem ser vistos nas tabelas 3 e 4:

**Tabela 3 Influência do desalinhamento no valor medido de cilindridade.**

Nível de Alinhamento	$\varnothing X; \varnothing Y$ (mm) <sup>6</sup>	Cilindridade ( $\mu\text{m}$ )
Alinhada	0;0	$4,65 \pm 2,1$
Desalinhada	0,05;0,05	$6,61 \pm 2,1$
Muito Desalinhada	0,1;0,1	$6,42 \pm 2,1$

**Tabela 4 Subtração entre nuvens de pontos obtidas com diferentes desalinhamentos.**

Par Nº	1ª Nuvem	2ª Nuvem	Valor Médio da Subtração (nm)	Desvio Padrão da Subtração (nm)	Intervalo da Subtração para $\alpha = 0,05$ (nm) <sup>7</sup>
1	Alinhada	Desalinhada	17,73	156,50	$17,7 \pm 313,0$
2	Alinhada	Muito Desalinhada	-1,614	694,80	$-1,6 \pm 1361,8$
3	Desalinhada	Muito Desalinhada	-19,39	652,99	$-19,4 \pm 1279,8$

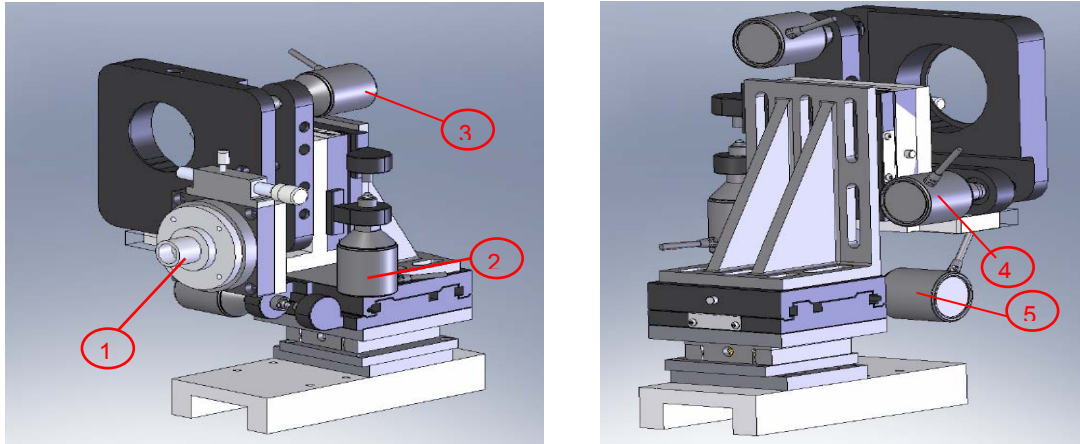
Os resultados mostram que com o aumento do desalinhamento se pode notar uma pequena diferença quanto aos valores de cilindridade, entretanto essa diferença não é significativa, pois se encontra abaixo da incerteza de medição do sistema.

Já os histogramas das diferenças entre as nuvens (ver Anexo A) indicam um considerável aumento no desvio padrão para desalinhamentos muito intensos. Em

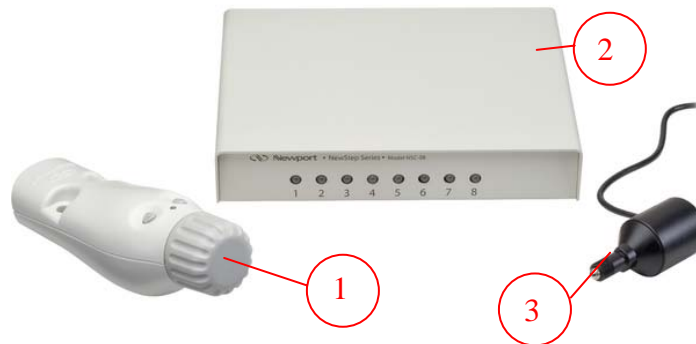
<sup>6</sup> Deslocamento dos motores que movimentam os eixos  $\varnothing X$  e  $\varnothing Y$ .

<sup>7</sup> Utilizando  $\sigma = 1,96$  para nível de confiança de 95% e número de pontos = 124.365.

uma análise geral, conclui-se que medições de peças muito desalinhadas podem apresentar resultados de medição com incertezas maiores, se comparadas com medições de peças alinhadas.



**Figura 17** Sistema de alinhamento da peça no espelho óptico. (1) Suporte da peça com ímã para fixação. (2) Motor de passo para movimentação vertical. (3) Motor de passo para movimentação angular em torno do eixo horizontal. (4) Motor de passo para movimentação angular em torno do eixo vertical. (5) Motor de passo para movimentação horizontal.



**Figura 18** Sistema de controle de motores utilizado no sistema de alinhamento [19]. (1) Joystick . (2) Controlador. (3) Motor de passo.

### 3.3 Software

Outro componente essencial do interferômetro é o *software*. Ele foi desenvolvido com dois objetivos: facilitar a operação do sistema, controlando adequadamente os dispositivos do *hardware* e apresentar os resultados de forma apropriada. Foi projetado com uma interface gráfica que tem a função de auxiliar o

usuário a realizar medições e exibir os resultados numéricos e gráficos de formas bi e tridimensional <sup>[15]</sup>. A interface gráfica permite ao usuário visualizar a imagem da peça planejada com uma taxa de atualização de 12 quadros por segundo. A possibilidade de visualizar a peça a uma taxa de aquisição elevada proporciona ao usuário uma melhor percepção das mudanças nas franjas de interferência durante o alinhamento e o ajuste de iluminação.

Alguns controles do *software* serão aqui discutidos, são eles:

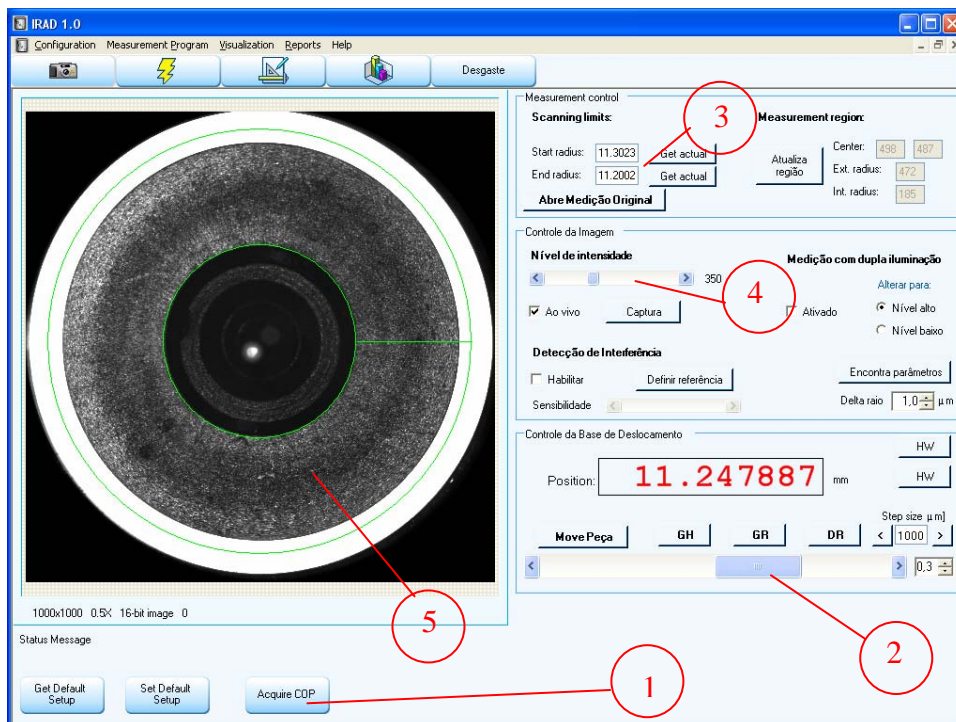
- Controle de modo de visualização: durante o alinhamento fino, o usuário necessita visualizar as franjas para melhor ajustar a posição da peça. O *software* possui um modo de visualização no qual a intensidade média da imagem é subtraída da imagem atual e o quadrado da diferença seja mostrado continuamente, fazendo com que apenas as franjas claras sejam destacadas do fundo escuro, como mostram as figuras 16 (a), (b) e (c);
- Controle de tempo de exposição da câmera: o tempo de exposição da câmera pode ser ajustado pelo usuário através de um controle de interface. Quanto menor o tempo de exposição mais escura será a imagem. Uma imagem muito clara também é prejudicial à medição. Como determinado por Dal Pont <sup>[15]</sup> o nível ótimo para a iluminação, utilizando-se a câmera Cohu 7500, se encontra entre 150 e 350 níveis de cinza;
- Controle do espelho de referência: uma outra funcionalidade muito importante é o comando do motor de deslocamento do espelho de referência. Para que uma medição seja realizada, é necessário que os limites de varredura sejam definidos pelo operador. Esses limites compreenderão as posições do espelho de referência que equivalem respectivamente ao início e ao final da faixa de medição. O usuário também necessitará movimentar o espelho de referência durante o alinhamento da peça;
- Controle para seleção da região de medição: como pode ser visto na figura 16, nem toda a região da imagem planejada será medida. O *software* disponibiliza um controle de seleção de região circular para que o usuário eleja apenas a faixa que lhe interessa para a medição, economizando processamento.

Na medição da peça são armazenados aproximadamente 200.000 pontos por imagem. Durante a varredura da peça, os valores dos *pixels* de cada imagem



adquirida são armazenados em um *buffer* circular que suporta até dez imagens. À medida que o *buffer* de imagens se enche, a primeira imagem é descartada, liberando espaço para uma nova imagem. Esse vetor é analisado já durante a medição para calcular o ponto máximo do correlograma de cada um de seus *pixels*. Ao final da varredura serão resultados em torno de 200.000 valores numéricos que compreendem os valores dos raios da peça medida, salvos em um arquivo. Um algoritmo realiza a conversão desses valores para coordenadas cilíndricas, reconstruindo matematicamente a peça medida. O algoritmo utilizado por Dal Pont <sup>[15]</sup> reconstrói o cilindro a partir da coordenada central do anel interno na imagem planejada do cilindro. Uma representação tridimensional desse cilindro pode ser visualizada na interface gráfica do *software* em diferentes escalas.

Alguns filtros e algoritmos também foram previstos para separar os desvios de forma dos desvios de superfícies do cilindro. Um dos principais filtros é o *Discrete L-Spline*. Esse filtro recebe como parâmetros de entrada valores que representam o perfil de circularidade e uma frequência de corte. O resultado será um novo perfil de circularidade com frequências inferiores ao valor da frequência de corte <sup>[15]</sup>. A figura 19 ilustra a interface gráfica do IRAD, anterior ao desenvolvimento desse trabalho de mestrado.



**Figura 19** Interface gráfica do sistema IRAD. (1) Botão para iniciar a varredura. (2) Controle de posição do espelho de referência. (3) Limite inferior e superior de varredura. (4) Controle do tempo de exposição da câmera. (5) Imagem planejada do pistão com limites de medição.

### 3.4 Avaliação do Tempo de Medição do Sistema IRAD

Algumas medições foram realizadas com o protótipo do sistema IRAD, procurando avaliar os tempos de cada etapa envolvida no processo. Para isso foram realizadas quatro medições em quatro pistões diferentes. As medições foram executadas por um operador treinado. A figura 20 ilustra as peças selecionadas para o experimento. O pistões 1 e 3 possuem ambos 22,5 mm de diâmetro, já os pistões 2 e 4 possuem 21 mm de diâmetro.

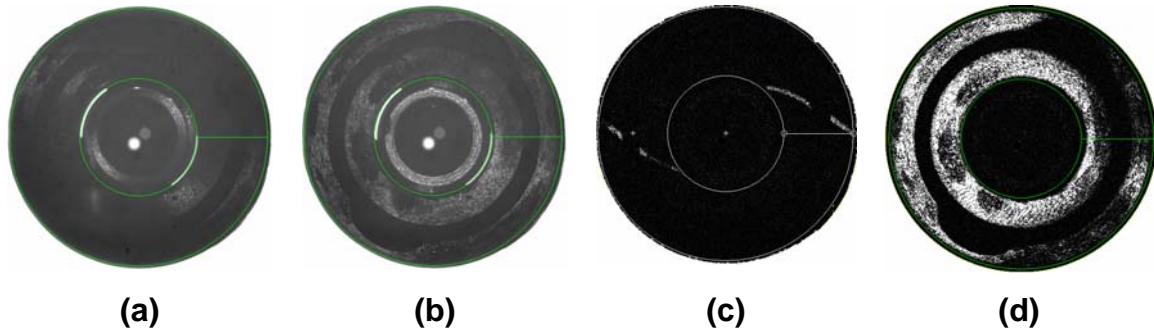


Figura 20 Pistões selecionados.

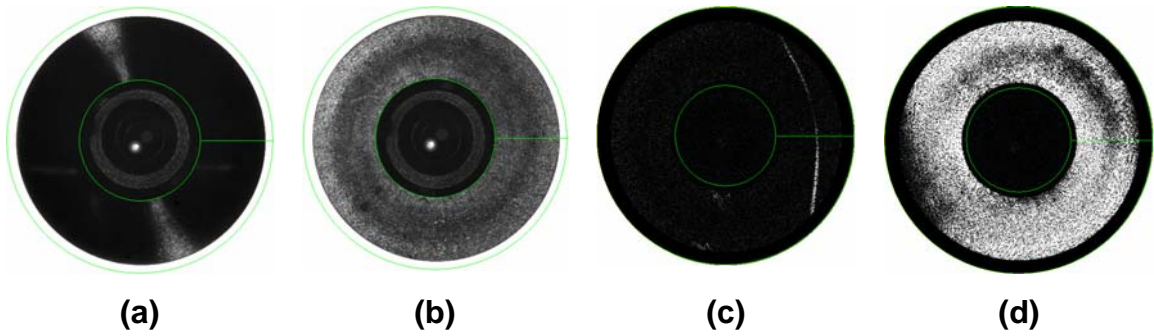
Após a inserção de cada peça, o usuário deve realizar o alinhamento grosseiro. Nesse processo ele, controlando os motores dos eixos do sistema de alinhamento através do *joystick* (figura 18.1), deve procurar obter uma imagem o mais uniformemente iluminada possível e sem regiões escuras, como a imagem mostrada na figura 19.5. O tempo do alinhamento grosseiro é então medido e logo após se inicia o processo de alinhamento fino. No alinhamento fino é utilizado o modo de visualização de franjas (quadrado da diferença), para melhorar o contraste da imagem. O usuário irá então movimentar levemente os eixos e o espelho de referência, em quantidades e na seqüência apropriadas, a fim de obter franjas por toda a imagem. Esse processo não é fácil de ser realizado, requer treinamento prévio do usuário, além de muita habilidade e paciência.

As figuras 21, 22, 23 e 24 mostram os estados das peças respectivamente nos momentos de início do alinhamento grosseiro, fim do alinhamento grosseiro, início do alinhamento fino e fim do alinhamento fino. As primeiras duas imagens de cada conjunto de figuras foram adquiridas no modo de visualização normal e se

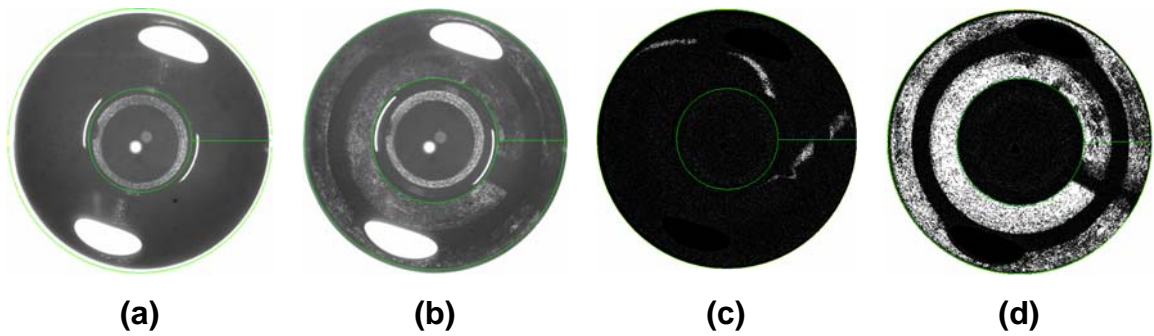
referem ao alinhamento grosseiro. As duas últimas imagens foram adquiridas se utilizando o modo de visualização de franjas e são referentes ao alinhamento fino.



**Figura 21** Imagens de alinhamento da peça 1. (a) anterior ao alinhamento grosseiro. (b) posterior ao alinhamento grosseiro. (c) anterior ao alinhamento fino. (d) posterior ao alinhamento fino.



**Figura 22** Alinhamento da peça 2



**Figura 23** Alinhamento da peça 3

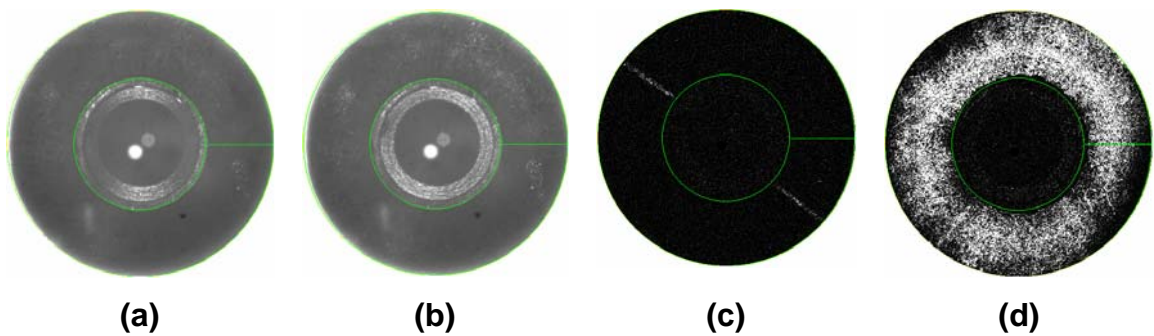


Figura 24 Alinhamento da peça 4

Os tempos gastos em cada sub-processo envolvido em uma medição foram tomados e anotados. Na tabela 5 estão contidos os tempos de alinhamento grosseiro, alinhamento fino e o tempo de medição de cada peça.

Tabela 5 Tempos de alinhamentos de peças e limites de varredura

Peça	Tempo de Alinhamento Grosseiro	Tempo de Alinhamento Fino	Limite Inferior (mm)	Limite Superior (mm)	Tempo de Medição
1	1 min e 33,5 s	14 min e 12 s	11,2452	11,2648	4 min e 10 s
2	34 s	21 min e 21 s	10,4859	10,5057	4 min e 12 s
3	1 min e 20 s	17 min e 59 s	11,2272	11,2578	6 min e 5 s
4	2 min e 1 s	14 min e 25 s	10,4860	10,5076	4 min e 25 s

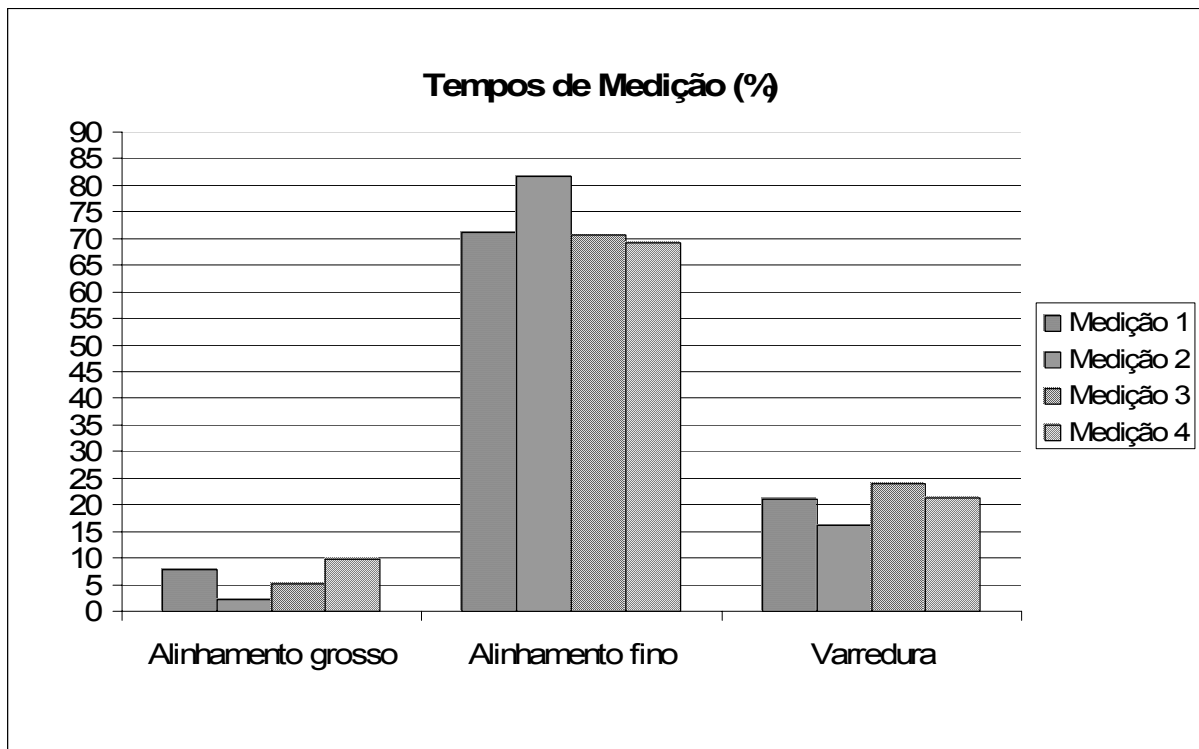


Figura 25 Porcentagens dos tempos referentes a cada sub-processo envolvido em uma medição

Analisando a figura 25 percebe-se que o alinhamento fino corresponde ao sub-processo com maior demanda de tempo em uma medição.

Vale reforçar que os tempos de medição dependem diretamente dos limites de varredura. Quanto melhor é o alinhamento fino, mais próximos do valor de raio nominal da peça estarão os limites. O tempo de medição da peça 3 foi um pouco maior do que os tempos das peças restantes. Entretanto, seu alinhamento foi satisfatório. O que implicou em um tempo maior foi o aumento da faixa de medição devido à presença de desgaste em uma parte da peça, como pode ser visto na figura 20. Entretanto essa característica não dificultou o alinhamento fino da peça.

### 3.5 Necessidades do Sistema IRAD

Nesse capítulo procurou-se realizar uma análise completa do sistema e seus componentes a fim de se identificarem alguns pontos a serem melhorados e automatizados. Os testes realizados mostram que o processo de alinhamento fino requer muito tempo, além de exigir grande experiência do operador para sua realização. A automatização desse processo facilitará a utilização do sistema e reduzirá o tempo total da medição de uma peça.

O alinhamento grosseiro não exige um grande esforço do operador e não representa uma porcentagem expressiva no tempo total de medição, contudo sua automatização otimizará o processo, facilitando ainda mais o alinhamento fino automático.

Em alguns casos a medição de peças desgastadas é crítica, pois a reflexão da luz é irregular. Nas regiões onde há desgaste a reflexão é maior do que nas regiões sem desgaste. Muitas vezes a reflexão é demasiado intensa e satura o sensor da câmera, impedindo a medição da região do desgaste. Para contornar esse problema é necessário se alternar o nível de iluminação da peça automaticamente durante a medição (iluminação forte e fraca), possibilitando a medição de pontos com desgaste. Um módulo pode ser desenvolvido para realizar o ajuste automático dos níveis de iluminação.

Uma nova interface gráfica é necessária para tornar o sistema mais amigável, facilitando sua utilização e a execução dos passos seqüenciais da medição.

# Capítulo 4

## Módulos Desenvolvidos para o Sistema IRAD

As contribuições do trabalho para o IRAD consistem principalmente no desenvolvimento de módulos e algoritmos computacionais, visando melhorar sua usabilidade e principalmente diminuir o tempo e o esforço de alinhamento de peças. Uma subdivisão do processo de medição em vários passos foi proposta juntamente com uma nova interface gráfica. Nesse capítulo será discutido cada um dos módulos criados para o interferômetro.

### 4.1 Módulos Propostos

A partir da experiência adquirida com o IRAD, pôde-se constituir um roteiro para o processo de medição. Nesse roteiro estão contemplados todos os ajustes e operações que o usuário necessita realizar, e de forma ordenada. O primeiro passo é a inserção da peça. Nessa etapa, o único cuidado a ser tomado pelo usuário é evitar que a peça se choque com a superfície espelhada do espelho cônico. O passo seguinte é o ajuste do nível de iluminação. No IRAD esse ajuste era feito de forma empírica, baseado no julgamento e bom senso do usuário que irá se referenciar pela qualidade da imagem mostrada pelo programa. O terceiro passo corresponde ao alinhamento grosseiro. Utilizando um *joystick*, o usuário aciona os motores que movimentam os eixos do sistema de alinhamento para pré-alinhar a peça, visando obter uma imagem clara e homogênea, sem regiões escuras. Ele irá preparar a peça para o passo seguinte, o alinhamento fino. Nessa próxima etapa o usuário realiza uma procura por franjas de interferência. Para isso ele utiliza o modo de visualização de franjas (quadrado da diferença), explicado no capítulo anterior. Movimentando o espelho de referência, através do controle gráfico, o usuário deverá percorrer valores próximos do raio nominal em busca de franjas. Depois de encontradas as franjas, o operador deverá decidir qual eixo movimentar para que a franja ocupe a área da imagem por completo. Sem dúvida esse é o passo mais difícil e moroso,

como demonstrado nos experimentos do item 3.4. No quinto passo o usuário ajusta novamente a iluminação. Geralmente ela necessita de ajuste quando há na peça algum desgaste, o qual provoca reflexões destoantes da média. O sexto passo é o ajuste da faixa de medição. O usuário procura, com o espelho de referência, pelas posições de aparecimento e desaparecimento das franjas de interferência, que representam os limites de varredura, para então iniciar o último passo, a medição propriamente dita.

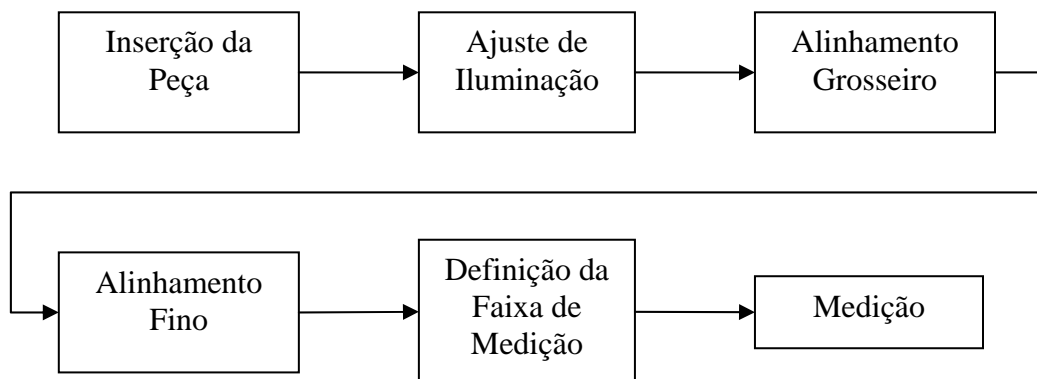


Figura 26 Fluxograma dos passos de medição

As etapas supracitadas compõem um roteiro de medição do IRAD. Entretanto esses passos não estão bem definidos para o usuário e nem se encontram ordenados de forma mandatória. Do ponto de vista de qualidade metrológica é interessante que o sistema atue como um guia para o operador. Isso padronizará, de certa forma, as medições tornando-o mais amigável. Em outras palavras, o *software* estará sutilmente impondo um roteiro a ser seguido pelo usuário.

Como contribuição ao IRAD é proposta uma nova interface gráfica dividida em telas seqüenciais, onde cada tela representará um passo no processo de medição. Ao iniciá-lo, o usuário será indicado a passar seqüencialmente por cada módulo e realizar cada um dos passos, até chegar ao processo de medição da peça. Os passos propostos correspondem ao total de nove módulos de interface, são eles:

- Módulo de seleção de peças;
- Módulo de inserção de peças;
- Módulo de ajuste prévio de iluminação para o alinhamento grosseiro;
- Módulo de alinhamento grosseiro automático;
- Módulo de alinhamento fino automático;

- Módulo de determinação de superfície de medição;
- Módulo de ajuste final de iluminação;
- Módulo de determinação da faixa de medição;
- Módulo de varredura.

### 4.1.1 Seleção e Cadastro de Peças e Usuários

Considerando que o sistema será utilizado para medir diferentes peças cilíndricas, com diâmetro, altura e acabamento diferentes, foi desenvolvido um módulo para cadastro e seleção de peças. O cadastramento foi desenvolvido utilizando a tecnologia de banco de dados relacional. Seu propósito é o de guardar as características da peça e os valores dos parâmetros relacionados com sua medição. O módulo de cadastro e seleção de peças irá salvar as configurações de uma medição previamente realizada e associá-la com um determinado tipo de peça. Assim, em futuras medições essas configurações poderão ser recuperadas, permitindo ao usuário obtê-las automaticamente e reutilizá-las na medição de objetos do mesmo tipo, economizando tempo. O cadastro de usuários foi implementado para que se tenha um controle maior de acesso e de operação, muitas vezes necessário na indústria. O cadastramento de usuários permite atribuir diferentes níveis de acesso para os usuários. Com isso é possível implementar restrições de acesso a funções do *software* dependendo do grau de hierarquia do operador. Algumas funcionalidades do programa só serão habilitadas para níveis de hierarquia mais elevados.

O módulo foi desenvolvido utilizando linguagem SQL (*Structured Query Language*)<sup>[20] [21]</sup> para o acesso e a operação com banco de dados. Os parâmetros das peças guardados no banco de dados são: tipo, representado pelo nome ou código a ser indicado pelo próprio fabricante; diâmetro e altura (comprimento axial). Essas características são suficientes para representar uma peça dentro do IRAD. Os dados referentes às medições das peças serão gravados de duas formas: em arquivo de configuração, onde cada parâmetro é lido separadamente, em banco de dados, onde se utiliza concatenação de todos os parâmetros em uma *string*<sup>8</sup> para seu armazenamento.

---

<sup>8</sup> O termo *string* é muito utilizado na área da informática. É o nome dado a uma cadeia ordenada de caracteres que por sua vez pertencem a um determinado alfabeto.



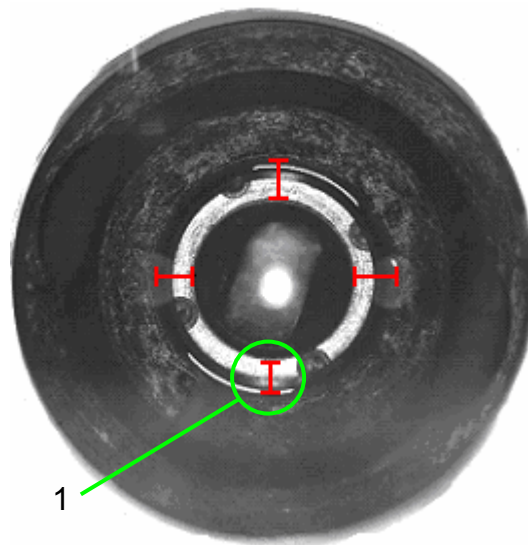
Quando uma peça de um determinado tipo é medida pela primeira vez, não há parâmetros salvos no banco de dados. Portanto é adequado que exista um conjunto de parâmetros iniciais (*default*) que possam ser utilizados para todos os tipos de peças que não foram cadastrados. Esses parâmetros, gravados em um arquivo de configurações, serão carregados apenas na primeira vez que um tipo de peça está sendo medido. Somente após o cadastro e a medição do objeto, essas variáveis serão armazenadas no banco de dados. Por serem numerosas, optou-se por guardá-las dentro de apenas uma variável. Foi então desenvolvida uma função para compilar todas as informações em uma só string, denominada de *SetupString*.

Da mesma forma foi desenvolvida uma outra função para converter essa *string* em configurações de ajuste. As informações guardadas em arquivo correspondem aos parâmetros de iluminação, como nível da fonte luminosa e o tempo de exposição da câmera; parâmetros de alinhamento, como valores de limiares e limites de procura por franjas; parâmetros da região de medição, como raio mínimo e máximo. Todas essas informações correspondem a valores particulares para cada tipo de peça. Haverá outros parâmetros referentes ao *hardware*, como o centro do espelho de referência na imagem, os parâmetros de velocidade dos motores de alinhamento, os coeficientes do polinômio de calibração do sistema de alinhamento. Essas informações são gravadas em arquivo de inicialização e não em banco de dados. Isso possibilita ao usuário mais avançado realizar ajustes diretamente no arquivo.

### 4.1.2 Inserção de Peças

O espelho cônico foi projetado para realizar medições de peças com até 26 mm de diâmetro. O diâmetro de seu furo interno, onde as peças serão posicionadas, possui 28 mm. Essa diferença de dois milímetros representa a folga mínima para se inserir a peça sem risco de choque entre as partes. No momento da inserção da peça no centro do espelho deve-se tomar muito cuidado. Caso o suporte da peça se encontre muito deslocado em qualquer direção, poderá ocorrer o choque e danificar tanto a peça quanto o espelho cônico. A solução encontrada para se evitar uma colisão entre as partes foi o desenvolvimento de procedimento para centralização automática do sistema de suporte no centro do espelho cônico.

O algoritmo de centralização do suporte da peça foi adicionado ao segundo módulo desenvolvido, o de inserção de peças. Seu objetivo é o de auxiliar o usuário durante a inserção da peça. Nele é mostrada a imagem frontal ao vivo do espelho côncavo. Para evitar o risco de choque, o usuário deverá anteriormente executar o algoritmo de centralização automática do suporte da peça. Sua movimentação é feita automaticamente através do sistema de alinhamento. As posições dos motores do sistema de alinhamento foram gravadas no arquivo de configuração após se ter o sistema manualmente centralizado. Ao se executar a função de centralização, as posições serão lidas, os motores acionados e o suporte da peça levado para a posição central. A simples centralização do sistema não significará que a peça estará alinhada. Isso irá apenas diminuir o risco de colisão entre peça e espelho. A figura 27 ilustra os espaços entre os limites de uma peça e os limites do espelho côncavo. A peça possui 22,5 mm de diâmetro e o furo interno do espelho 28 mm. O suporte está centralizado, a peça não. As distâncias medidas entre as partes correspondem a 21 *pixels* na parte superior, 18 na parte inferior, 20 na parte esquerda e 22 na parte direita, onde cada *pixel* representa 0,0688 mm.



**Figura 27** Espaço entre espelho e peça. Peça de 22,5 mm de diâmetro inserida no centro do espelho com 28 mm de diâmetro no furo central. (1) Folga entre peça e espelho.

### 4.1.3 Ajuste Automático de Iluminação para o Alinhamento

O sistema de alinhamento utiliza técnicas de processamento de imagens (ver anexo B). Para que as técnicas sejam bem aplicadas e forneçam um bom resultado é fundamental ter uma imagem adequadamente iluminada. O módulo de iluminação automática foi desenvolvido com o objetivo de fornecer uma imagem com iluminação adequada para a realização do alinhamento da peça.

Como Dal Pont já observou, a distribuição de brilho na imagem resultante da combinação entre os dois feixes do interferômetro não é constante, podendo apresentar valores saturados e valores nulos. O acabamento da peça também irá diferenciar o nível médio de níveis de cinza da imagem. Peças cromadas e usinadas refletem mais a luz, quando comparadas com peça fosfatizadas, aumentando o nível médio de níveis de cinza da imagem.

Dal Pont, em sua dissertação, realizou experimentos e definiu que o nível de cinza médio ideal para se realizar medições está dentro do intervalo compreendido entre 150 e 350. Apesar de o experimento de Dal Pont estar relacionado com a medição da peça, o intervalo encontrado será também considerado como ideal para realizar o alinhamento da peça. Entretanto para uma faixa de 1024 níveis de cinza (10 bits), o nível 350 representa um valor mais próximo do centro da escala, e portanto, para esse trabalho foi eleito como sendo o valor médio ideal para a realização do alinhamento, com limites de segurança superior e inferior de 150 níveis de cinza.

O valor médio dos níveis de cinza da imagem é diretamente proporcional à quantidade de luz média incidente no sensor da câmera. Além da intensidade da fonte luminosa, outros fatores que alteram o nível de cinza médio da imagem são: a abertura da lente da câmera, os filtros e o tempo de exposição da câmera para cada aquisição. No IRAD o único fator que pode ser alterado via programação é o último: o tempo de exposição da câmera, ou *shutter*.

Para o ajuste do nível de iluminação da imagem foi desenvolvido um algoritmo de controle do tempo de exposição da câmera. O nível de cinza médio da imagem é medido e expresso através de um histograma, que relaciona cada nível de cinza com a contagem do número de *pixels* que contém aquele nível. O histograma da imagem da peça pode assumir uma distribuição qualquer de valores de cinza,

podendo ser bem disperso ou bem concentrado ao redor de determinado nível de cinza. Para o desenvolvimento do algoritmo foi estabelecido um determinado nível de cinza como limite superior, que será utilizado pelo algoritmo de ajuste automático para ajustar o tempo de exposição da câmera. A figura 28 ilustra o fluxograma do algoritmo de ajuste automático do nível de cinza da imagem. O algoritmo irá calcular a porcentagem dos *pixels* da imagem acima de um nível de cinza limiar e sua derivada em relação à diferença de intensidade do *shutter* para obter um nível de iluminação dentro do intervalo desejado. A derivada é calculada através da divisão do número de pontos do histograma que ultrapassam o limiar no sentido contrário pelo valor da diferença de intensidade aplicado ao *shutter* da câmera.

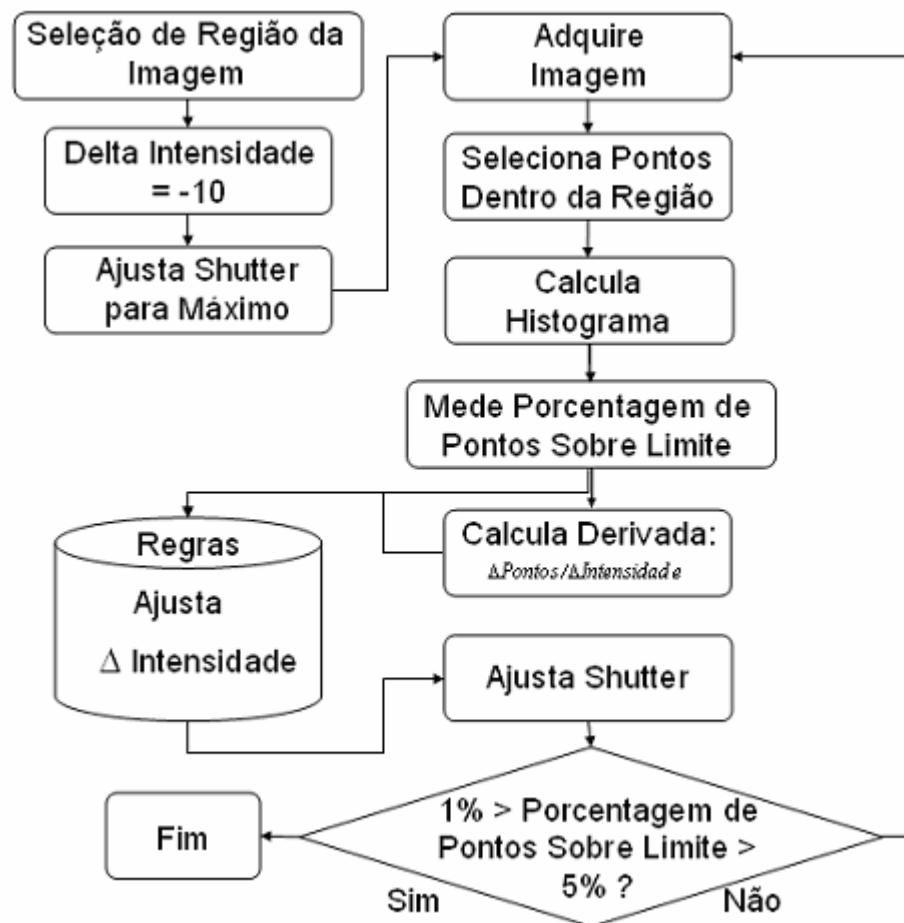


Figura 28 Fluxograma do ajuste automático de tempo de exposição da câmera

Anteriormente à execução do algoritmo, o usuário deverá selecionar uma região da imagem para ser analisada. Isso permite que as regiões da imagem que

representam furos, rebaixos ou regiões que não serão medidas sejam evitadas e descartadas do algoritmo de ajuste automático, tornando-o mais eficiente.

A classe *Step3* foi desenvolvida para o módulo em discussão. Essa classe contém todas as funções de interface gráfica, como atualização da imagem da peça e atualização do histograma. Também contém a interface gráfica do controle de iluminação e implementa as funções para seleção da região a ser analisada pelo algoritmo. O diagrama de classes simplificado do módulo em questão é ilustrado na figura 29.

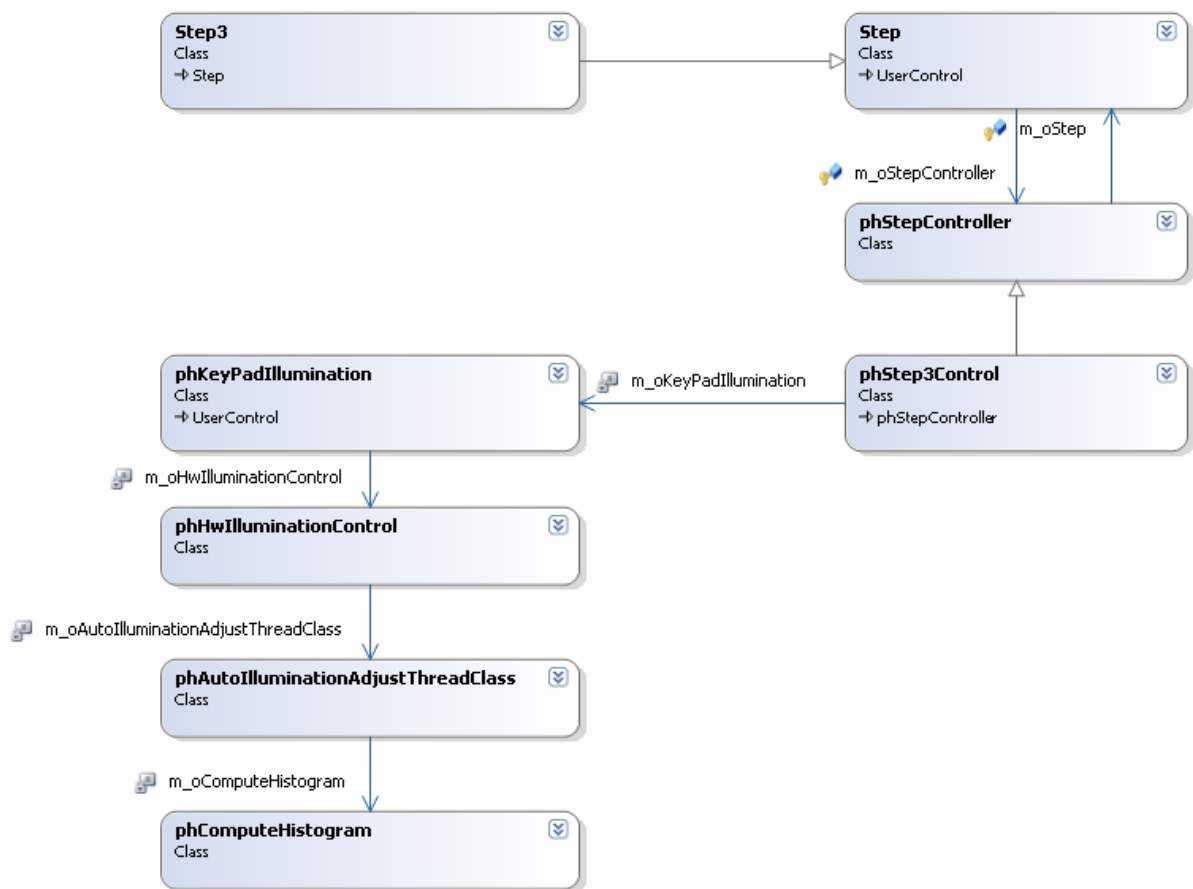


Figura 29 Diagrama de classes simplificado para o módulo de ajuste automático do tempo de exposição da câmera digital do sistema IRAD. As setas fechadas (cinza) indicam herança e as setas abertas (azul) indicam associação.

#### 4.1.4 Alinhamento Grosseiro de Peças

O processo de alinhamento automático de peças representa o principal requisito para as contribuições ao IRAD. Devido a sua complexidade foram dedicados dois módulos separados para o tratamento dessa necessidade. O

primeiro consiste no módulo de alinhamento grosseiro e o segundo no módulo de alinhamento fino de peças. Neste tópico, será discutido o alinhamento grosseiro.

No caso de uma peça bem alinhada, os raios incidentes e refletidos são quase paralelos, fazendo com que a iluminação se distribua igualmente pela superfície da peça, como mostram as figuras 30 (a) e 31 (a). Esse efeito é observado mais intensamente em peças de superfícies especulares. Um desalinhamento muito acentuado da peça, em qualquer direção em relação ao eixo do espelho cônico, irá provocar desvios nos raios refletidos na peça, criando deformações e regiões mais escuras na imagem. Neste caso, o desalinhamento faz com que alguns raios refletidos na peça se dirijam a outros pontos do espelho, diferente dos pontos de seus raios incidentes, gerando na imagem regiões menos iluminadas. Quanto maior for o desalinhamento, maiores serão as áreas escuras e maior será a deformação.

As imagens da figura 30 (b), 30 (c) e 31 (b) simulam os caminhos dos raios refletidos no espelho cônico e no cilindro para os casos de desalinhamento angular e horizontal respectivamente. No caso de desalinhamento angular, nas figuras 30 (b) e (c), alguns raios refletidos são desviados do eixo óptico do sistema e não são captados pela câmera. No caso de desalinhamento horizontal, na figura 31 (b), os raios refletidos se concentram mais em determinadas regiões do que em outras, gerando não uniformidades na iluminação da imagem.

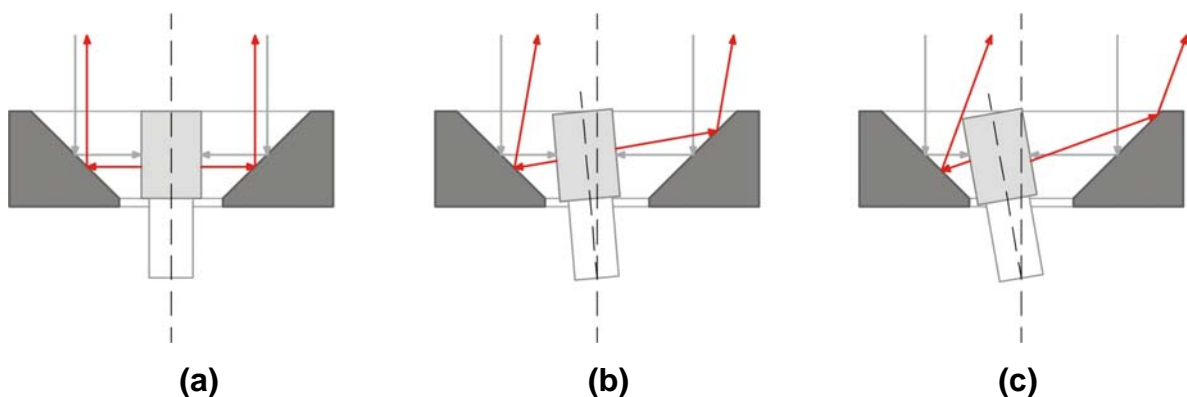
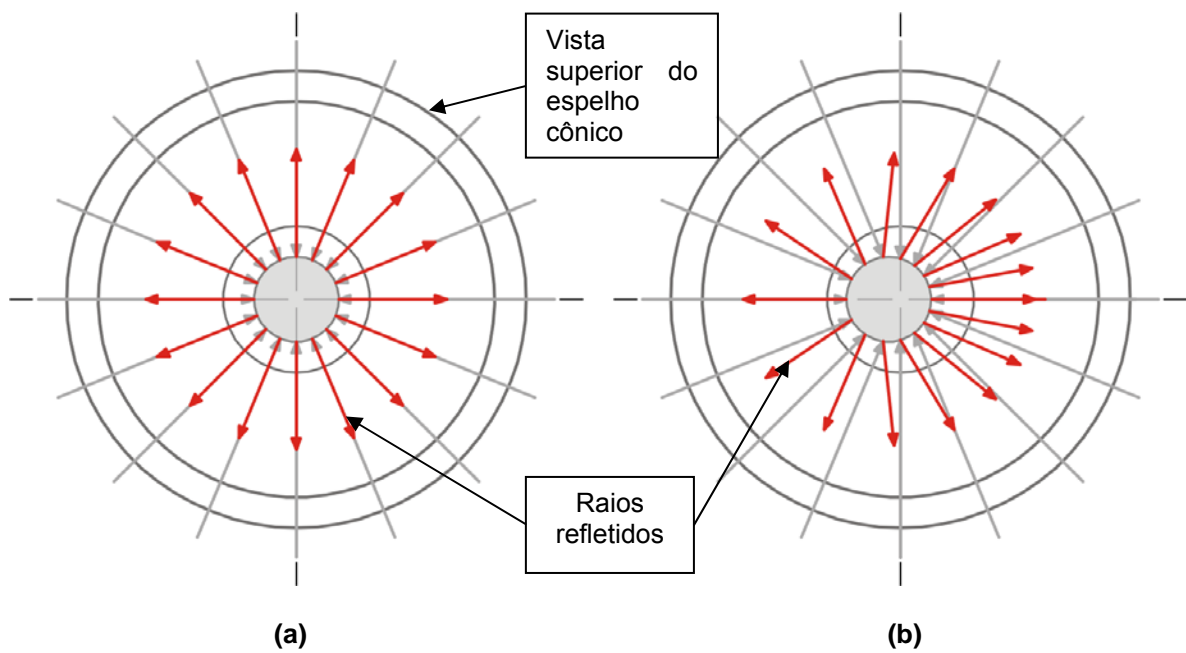


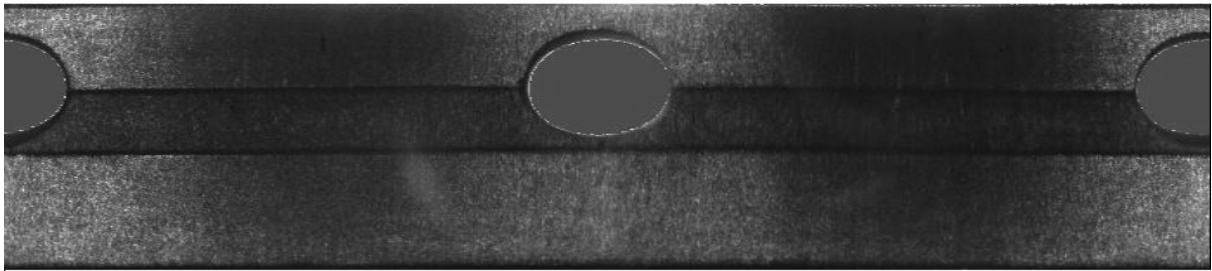
Figura 30 Simulação do desvio dos raios luminosos do conjunto espelho e cilindro na presença de desalinhamentos angulares.



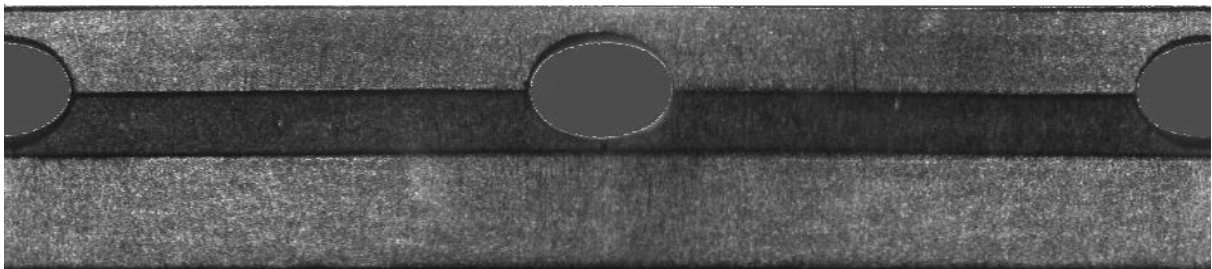
**Figura 31** Representação do desvio dos raios luminosos do conjunto espelho/peça para um desalinhamento horizontal. (a) Peça alinhada com o centro do espelho. (b) Peça deslocada horizontalmente no centro do espelho cônico.

No IRAD, o alinhamento grosseiro da peça era realizado manualmente. O usuário movimentava cada eixo do sistema de alinhamento individualmente, procurando pela posição que resultasse em uma imagem com o mínimo de regiões escuras. Caso o ajuste de um determinado eixo não causasse melhoria na intensidade média da imagem, o mesmo é desfeito e seleciona-se outro eixo para ser alinhado.

Neste módulo, será discutida a implementação da automatização do processo de alinhamento grosseiro. O problema é tratado através do processamento das imagens adquiridas pela câmera, a fim de se extrair parâmetros que indiquem a direção de desalinhamento da peça. Para tal objetivo foram analisados diversos parâmetros das imagens e testados juntamente com diferentes algoritmos de otimização.



(a)



(b)

**Figura 32** Imagens planificadas de um pistão. (a) Pistão com desalinhamento no eixo horizontal, mostrando a presença de regiões escuras. (b) Pistão alinhado, iluminação homogênea.

A figura 32 mostra duas imagens planificadas de um mesmo pistão em dois momentos. No primeiro momento, figura 32 (a), o pistão se encontra desalinhado em relação ao eixo espelho do cônico e por isso há regiões escuras na imagem. No segundo momento, figura 32 (b), o pistão se encontra alinhado com o eixo do espelho cônico e sua iluminação é homogênea (desconsiderando o rebaixo da peça e os furos). Analisando diferentes casos de desalinhamento de peças foi possível estabelecer um determinado padrão de sombras para cada direção e sentido de desalinhamento. Buscou-se uma maneira de identificar cada caso de desalinhamento a partir das características das imagens e suas sombras.

O método utilizado consiste em extrair linhas de determinadas alturas da imagem planificada dos pistões, analisando sua forma de onda para tentar obter informações sobre a direção de desalinhamento da peça. A classe *phLineProfileTest* foi desenvolvida para realizar a extração e o pré-processamento dessas linhas. Essa classe contém funções e algoritmos de extração de valores de níveis de cinza, filtragem e cálculo de média e desvio padrão dos *pixels*. A *phLineProfileTest* utiliza um objeto da classe *phImageByte* para armazenar os valores de cada *pixel* da imagem por inteiro. Uma outra classe, a *CLine*, foi desenvolvida para desenhar uma



linha em determinada altura da imagem e extrair os valores dos *pixels* sob a mesma. Por fim, a classe *phCoarseAdjust* implementa os algoritmos de otimização.

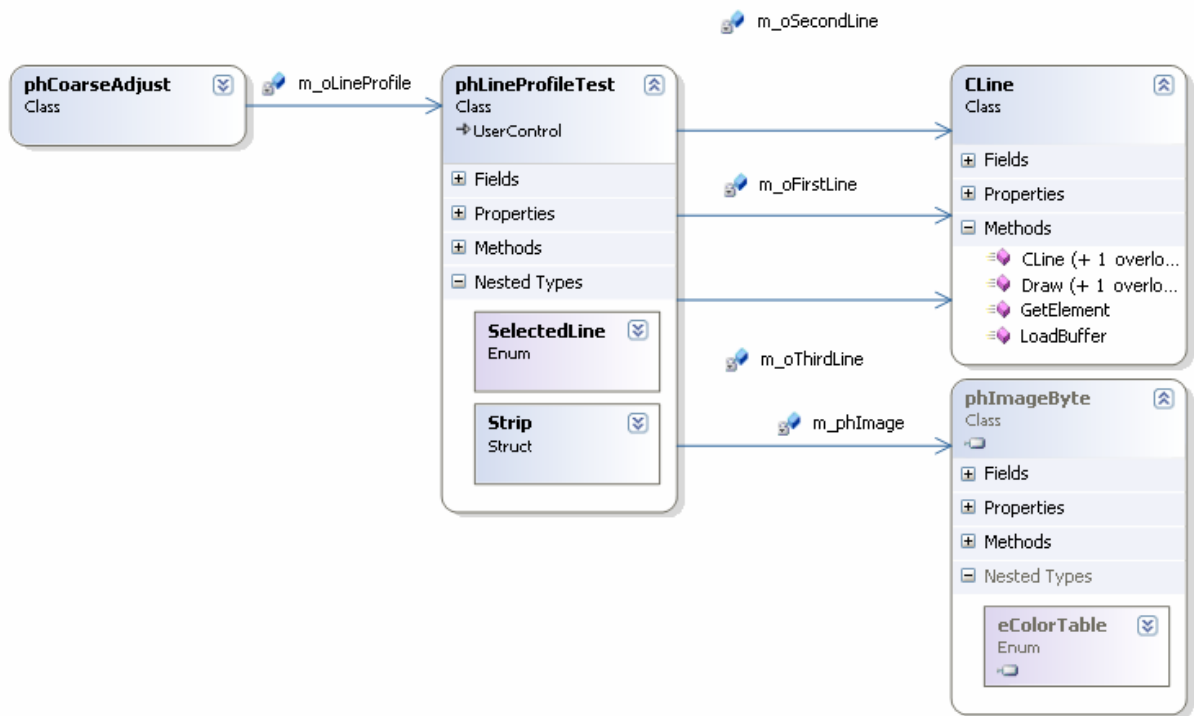


Figura 33 Diagrama de classes simplificado de processamento de imagens para extração de parâmetros.

Para analisar a imagem foram geradas ao todo três linhas, posicionadas e definidas respectivamente como linha superior, central e inferior. Cada uma dessas linhas irá conter os valores dos níveis de cinza dos *pixels* sobrepostos. Para atenuar os ruídos presentes na imagem foi aplicado a cada linha um filtro de média móvel.

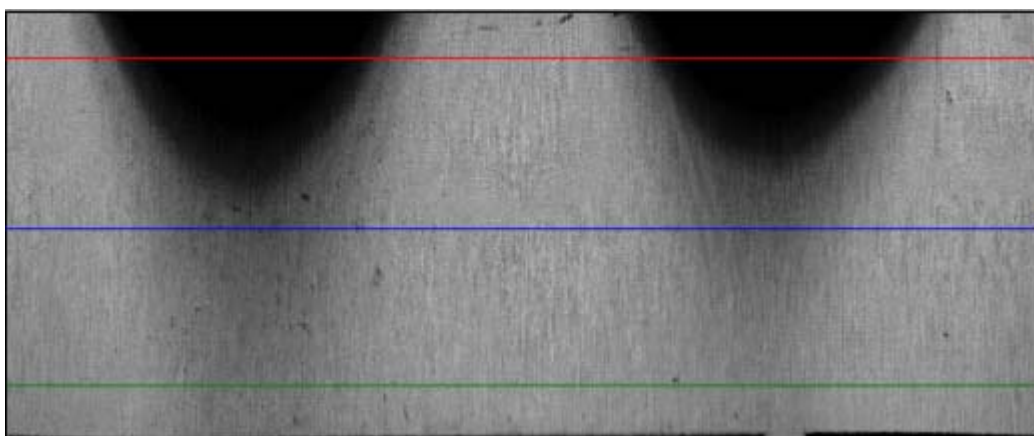
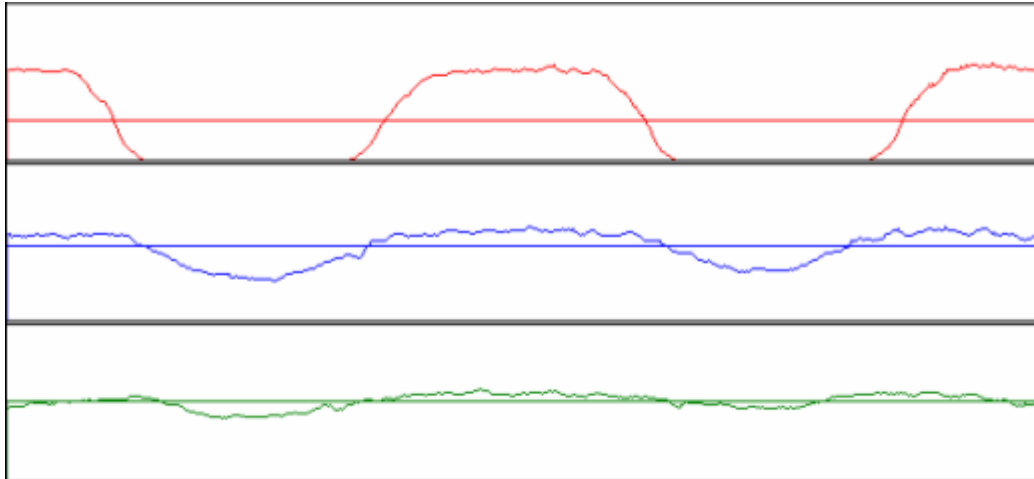


Figura 34 Linhas desenhadas sobre a imagem.



**Figura 35** Perfil das linhas superior, central e inferior, desenhadas sobre a imagem. A linha constante em de cada gráfico representa a média dos valores de cada perfil.

Foi também implementada uma função para desenhar os gráficos com os valores dos *pixels* extraídos pelas linhas, como mostrado na figura 35.

Utilizando a classe *phLineProfile* foram levantados vários gráficos para cada tipo de desalinhamento. Através da análise dos gráficos foi possível concluir que:

- Quanto mais alinhada estiver a peça, mais os perfis se aproximam de uma linha horizontal;
- Um desalinhamento lateral no eixo horizontal provoca regiões escuras mais concentradas na parte superior a  $90^\circ$  e  $270^\circ$  da imagem, não importando o sentido;
- Um desalinhamento lateral no eixo vertical provoca regiões escuras mais concentradas na parte superior a  $0^\circ$  e  $180^\circ$  da imagem, não importando o sentido;
- Um desalinhamento angular em torno do eixo horizontal provoca regiões escuras mais concentradas na parte inferior a  $90^\circ$  da imagem, para o sentido horário e a  $270^\circ$  para o sentido anti-horário;
- Um desalinhamento angular em torno do eixo vertical para o sentido horário provoca regiões escuras mais concentradas na parte inferior a  $0^\circ$  da imagem e para o sentido anti-horário a  $180^\circ$ ;
- A soma de diferentes desalinhamentos combinados irá acentuar e alterar a posição das regiões escuras na imagem, dependendo da combinação.

As imagens da figura 36 ilustram os casos supracitados.

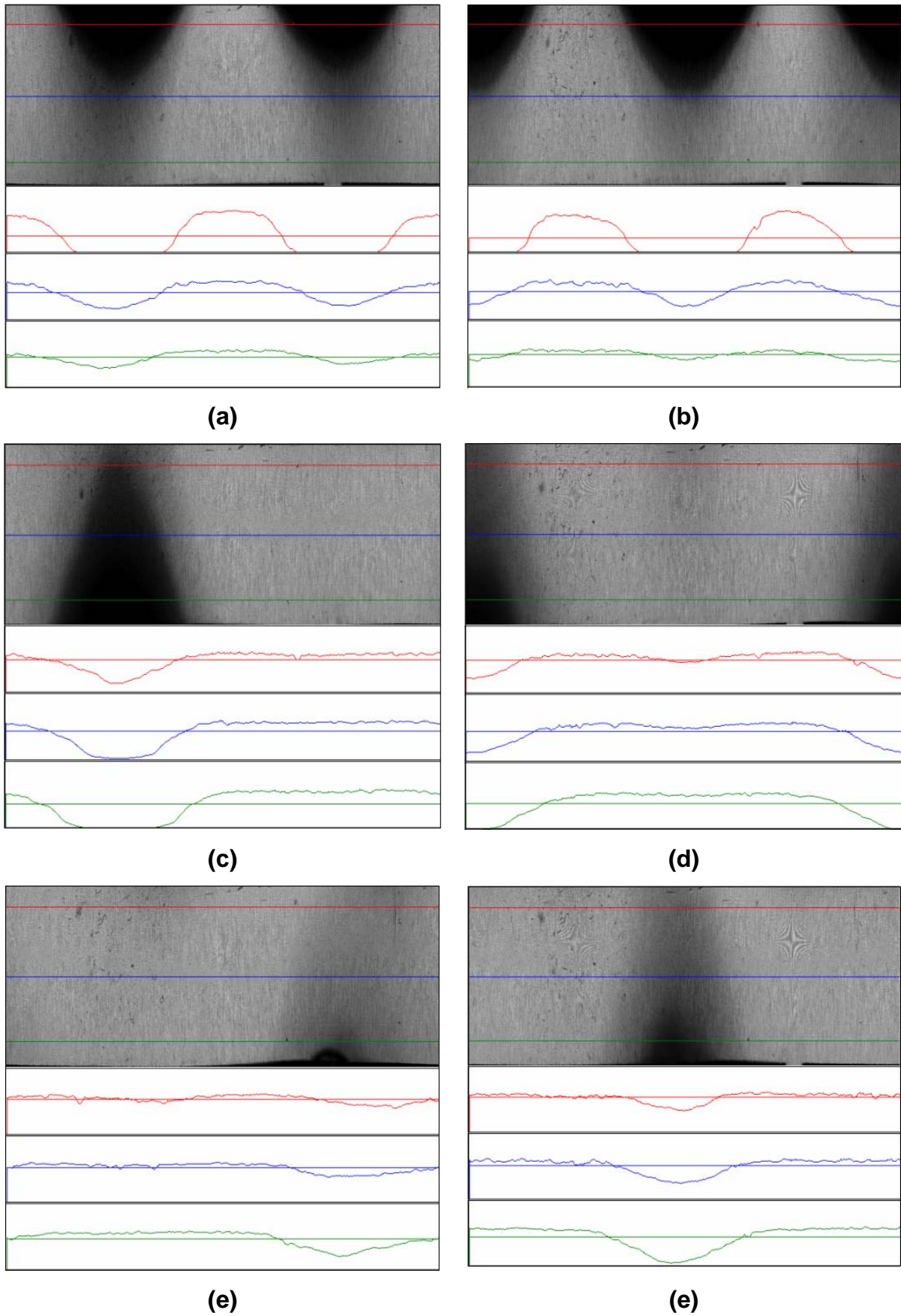


Figura 36 Imagens de desalinhamento com perfis de intensidade das linhas. Desalinhamentos: (a) horizontal; (b) vertical; (c)  $\varnothing X$  horário; (d)  $\varnothing Y$  horário; (e)  $\varnothing X$  anti-horário; (f)  $\varnothing Y$  anti-horário.

A partir dos perfis das linhas das imagens foram calculados alguns parâmetros com a intenção de observar o seu comportamento em relação ao nível de desalinhamento da peça.

Inicialmente foi aplicado um filtro de média nos perfis, com um núcleo de convolução de tamanho 11x11 para redução de ruídos. Os seguintes parâmetros foram calculados:

- Módulo e ângulo do primeiro e segundo harmônicos da série de Fourier da linha: ao se analisar os perfis das linhas nas imagens da figura 36 (a) e (b), nota-se que elas se assemelham a ondas senoidais. Os harmônicos foram calculados, pois se acredita que as fases e os valores dos módulos serão indicadores coerentes do eixo e intensidade do desalinhamento;
- Média e desvio padrão da linha;
- Valor e posição do máximo da linha;
- Área complementar do perfil. Esse parâmetro é obtido através da determinação da área externa ao gráfico do perfil com o limite em seu valor máximo. A figura 37 ilustra o parâmetro em questão;
- Diferença de fase do segundo harmônico da série de Fourier entre cada perfil;
- Média da imagem.

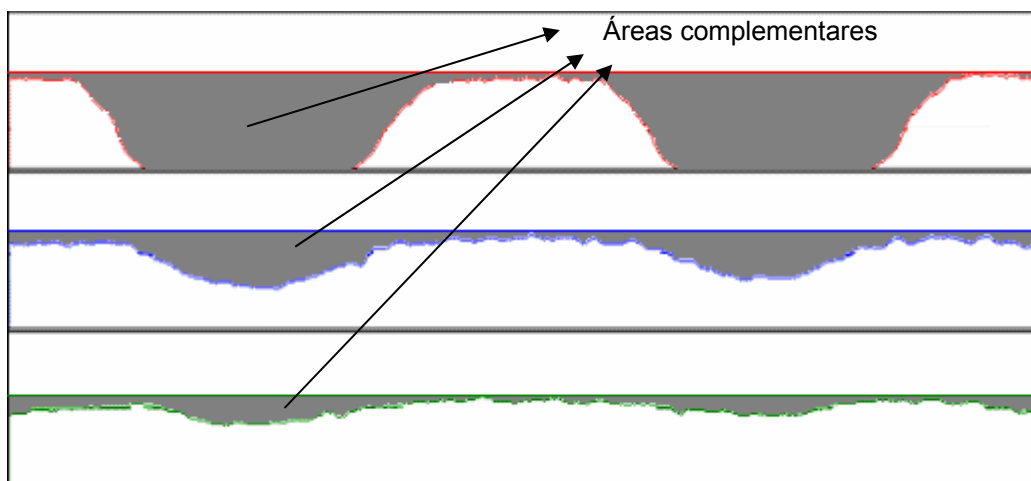


Figura 37 Área complementar dos perfis.

Para analisar o comportamento de cada parâmetro em relação ao desalinhamento de cada eixo (X, Y, ØX e ØY), foi realizado um experimento prático. Normalmente o desalinhamento conterá parcelas em todos os quatro

eixos. Analisar o comportamento dos parâmetros em relação ao desalinhamento de apenas um eixo não é suficiente. Portanto, nesse experimento foram incluídas parcelas de desalinhamento em dois ou mais eixos. O procedimento adotado foi realizar uma varredura em cada eixo por vez, variando o deslocamento dos motores que acionam o sistema de alinhamento entre -0,15 mm e 0,15 mm, em passos de centésimos de milímetros.

Os resultados obtidos foram promissores somente para alguns dos parâmetros. A maioria dos parâmetros não apresentou um comportamento bem definido que possa ser determinado através de um algoritmo de minimização ou maximização. Alguns dos resultados serão discutidos na seqüência.

A figura 38 ilustra o gráfico obtido com os valores dos módulos do segundo harmônico da Série de Fourier. Nesse experimento foi feita uma varredura pelo eixo vertical (Y), e horizontal (X), ambos utilizando passos aproximadamente entre 0,3 e 0,4 mm e sem a presença de desalinhamento angular em torno desses eixos ( $\emptyset Y$  e  $\emptyset X$ ). Portanto foram geradas ao todo nove curvas. Cada curva foi determinada com um valor constante de deslocamento em Y (unidade em mm).

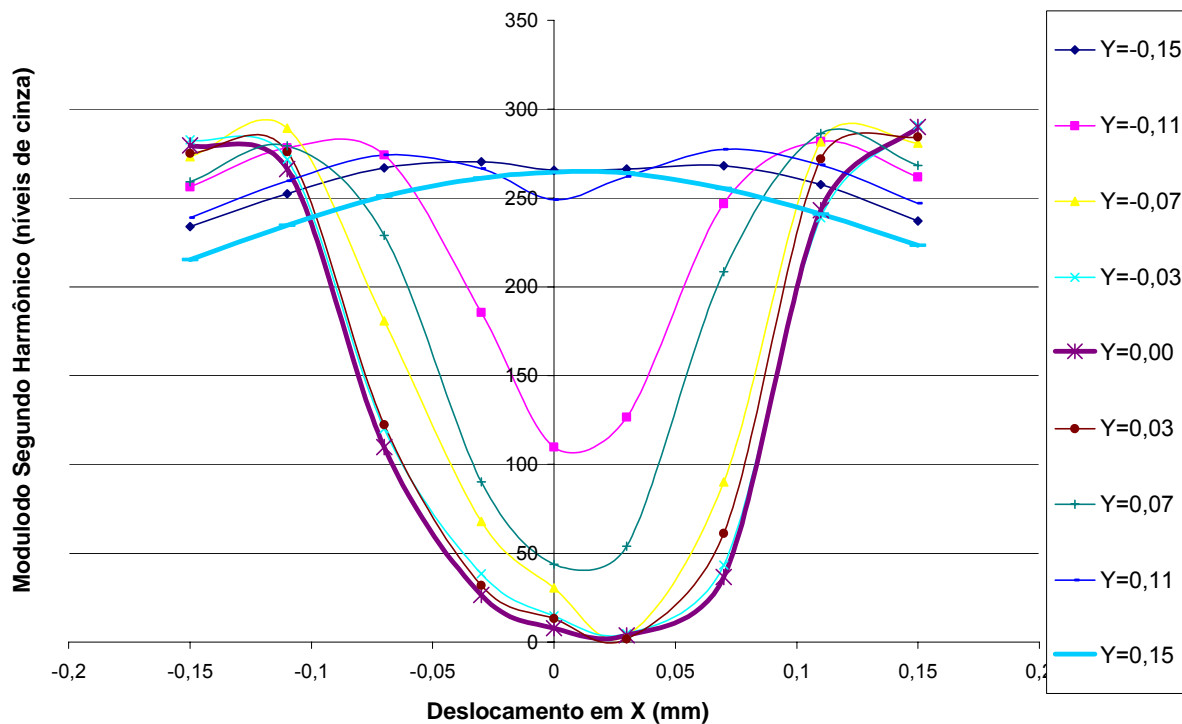
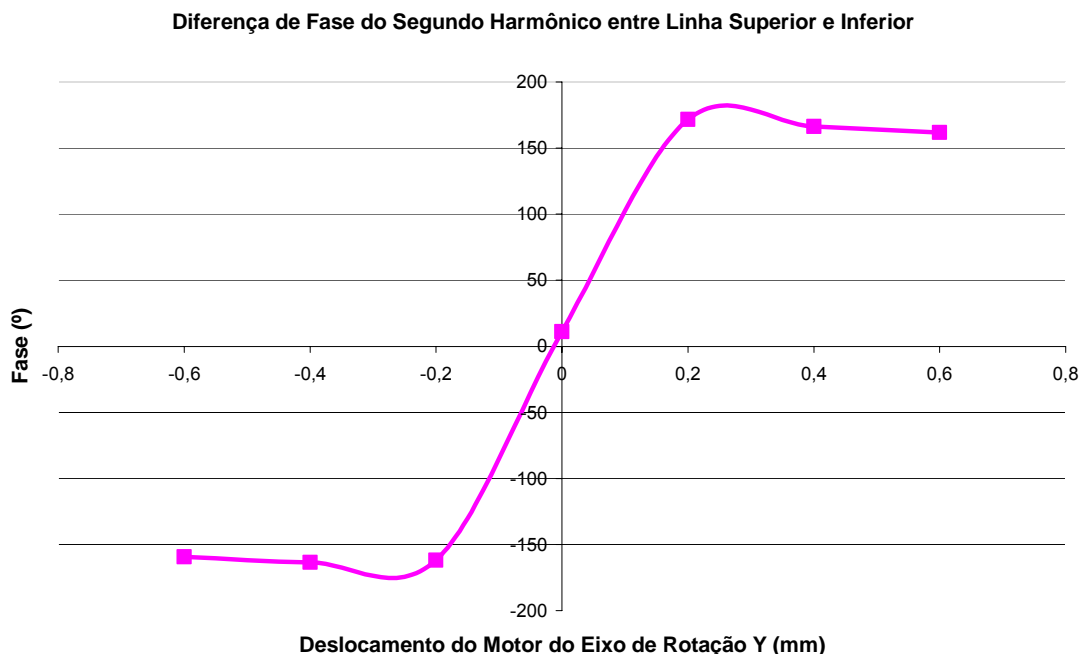


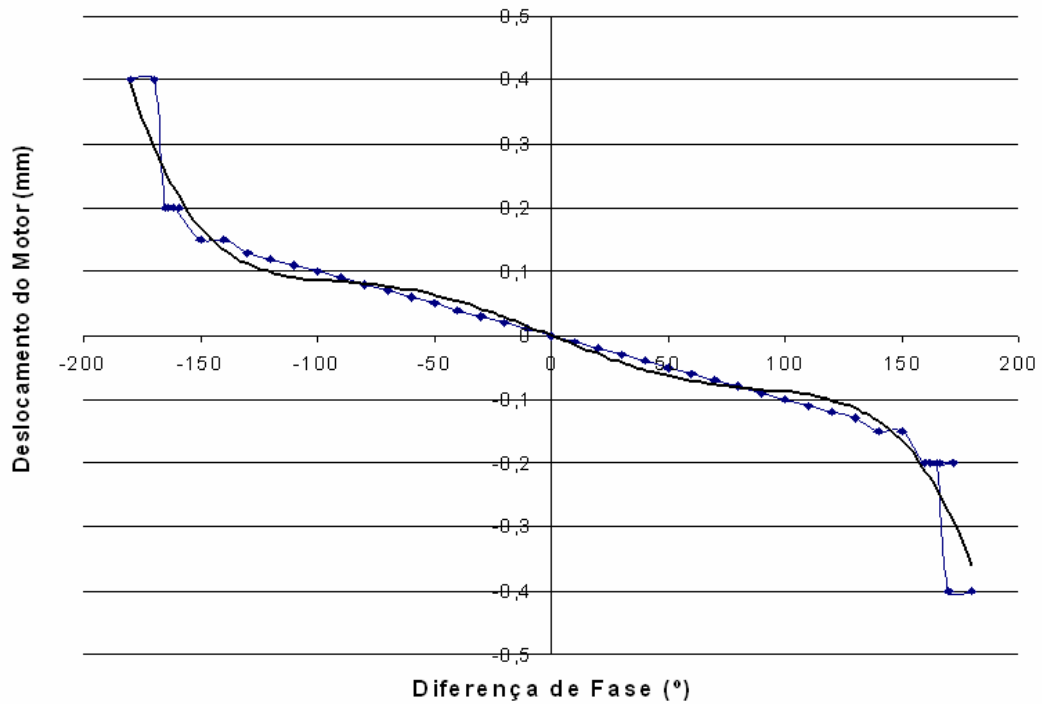
Figura 38 Variação do módulo do segundo harmônico da linha superior em função do deslocamento horizontal e vertical.

Pode-se notar no gráfico que o valor mínimo para a curva  $Y = 0$ , corresponde aproximadamente à posição de alinhamento, ( $Y = 0$  e  $X = 0$  mm). A escolha desse parâmetro seria viável caso todas as curvas de  $Y$  se comportassem de maneira semelhante. Entretanto, nota-se um comportamento diferente das curvas à medida que o deslocamento vertical aumenta. Isso impede que o comportamento do parâmetro seja considerado como uma premissa para o algoritmo de minimização. Portanto, a utilização do módulo do segundo harmônico como parâmetro de minimização do algoritmo de alinhamento automático foi descartada.

Outra abordagem foi a utilização de funções de calibração, geradas a partir do comportamento dos parâmetros. O gráfico da figura 39 representa o comportamento da diferença de fase entre o segundo harmônico da série de Fourier da linha superior e da linha inferior. A curva foi obtida rotacionando passo a passo um cilindro padrão em torno do eixo vertical ( $\emptyset Y$ ), com a adição de desalinhamento horizontal constante de 0,15 mm. Utilizou-se o método dos mínimos quadrados para encontrar a função que melhor se ajustasse aos pontos fornecidos pelo gráfico, como mostrado na figura 40.



**Figura 39** Variação da diferença de fase do segundo harmônico entre a linha superior e a linha inferior em função do deslocamento horizontal e vertical.



**Figura 40** Curva de calibração para rotação Y em função da diferença de fase do segundo harmônico entre linha superior e inferior

Por apresentar as características de uma função ímpar, a diferença de fase indicará também o sentido do desalinhamento, pois não há ambigüidade de valores, como no caso do gráfico de módulos da segunda harmônica (figura 38).

O polinômio de sexto grau encontrado pelo método de mínimos quadrados é dado pela função:

$$y = 1,165 \times 10^{-15} x^6 - 3,577 \times 10^{-12} x^5 - 20,62 \times 10^{-12} x^4 - 97,20 \times 10^{-9} x^3 - 29,41 \times 10^{-9} x^2 - 1,489 \times 10^{-3} x + 290,8 \times 10^{-6}$$

**Equação 38**

Acreditou-se que, utilizando uma função de calibração para determinar o desalinhamento, a convergência seria mais veloz, com menos iterações, no entanto os resultados obtidos com a implementação do polinômio de sexto grau não foram satisfatórios. Apesar de responder bem na região central, para deslocamentos muito grandes a resposta era falha. O alinhamento não convergia para o centro e se tornava muitas vezes instável.

Após vários experimentos concluiu-se que a intensidade média da imagem foi o parâmetro que apresentou o comportamento mais coerente, considerando a presença de outros desalinhamentos. A figura 41 ilustra o comportamento da média

dos *pixels* da imagem em relação ao deslocamento horizontal, combinando vários valores de desalinhamento vertical. Analisando o gráfico, percebe-se que os pontos de máximo de cada curva traçada se encontram próximos à posição de deslocamento zero. Isso é um requisito importante para o bom funcionamento do algoritmo de otimização.

Dois algoritmos de minimização foram implementados e testados para realizar o alinhamento nos quatro eixos do sistema de movimentação da peça: o algoritmo de busca utilizando a derivada primeira <sup>[22]</sup> e o algoritmo *Golden Section Search* unidimensional <sup>[22]</sup>.

O primeiro algoritmo busca o máximo da função dentro de um determinado intervalo utilizando a primeira derivada. O objetivo do algoritmo não é encontrar o zero da função, mas sim o ponto onde a derivada é nula. Como a forma da concavidade é conhecida, não haverá problemas de ambigüidade entre máximo e mínimo da função, a derivada nula irá apontar sempre para o máximo neste caso.

O algoritmo foi implementado de modo a tratar cada eixo (X, Y, ØX e ØY) separadamente e seqüencialmente.

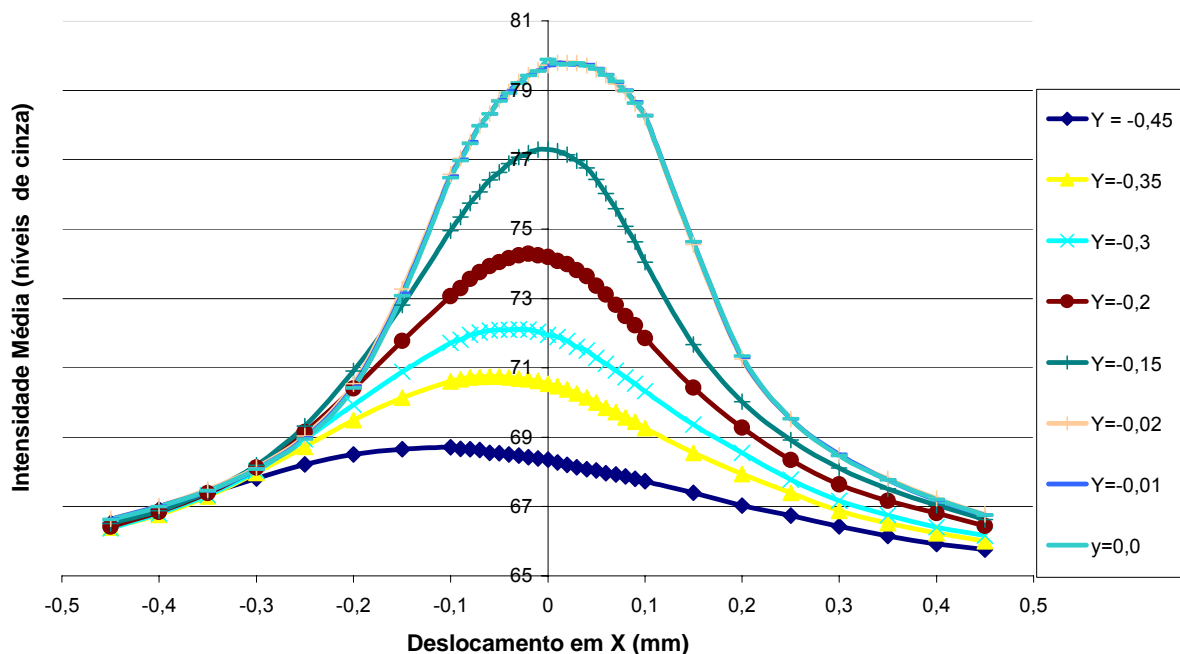


Figura 41 Perfil das médias da imagem.



O algoritmo apresentou bons resultados quanto à convergência, entretanto, devido à baixa velocidade dos motores e ao elevado número de iterações e movimentações da peça, o processo se tornou mais lento do que o esperado. Outro fator é o modo de obtenção da derivada em cada ponto. Como nem o valor da função e nem sua equação são conhecidas, sua derivada deve ser obtida experimentalmente com a movimentação da peça. A repetição desse procedimento a cada iteração tornou o processo de alinhamento muito lento e, portanto, inviável.

O algoritmo *Golden Section Search* apresentou resultados mais satisfatórios. O cálculo da derivada primeira é irrelevante para esse algoritmo, o que se torna uma vantagem sobre o primeiro método. Nesse algoritmo é estabelecido um intervalo, no qual se acredita estar o máximo da função. Dentro desse intervalo é obtido o valor da função em três pontos: posição central, limite direito e limite esquerdo. Se o valor da função na posição central do intervalo for maior em comparação com os outros valores limites, o intervalo de busca diminui na razão áurea. Mas se esse valor for menor, o centro do intervalo é deslocado para o limite de maior valor. O processo é repetido até se chegar a um intervalo suficientemente curto. A figura 42 ilustra o fluxograma do algoritmo desenvolvido para o alinhamento grosseiro.

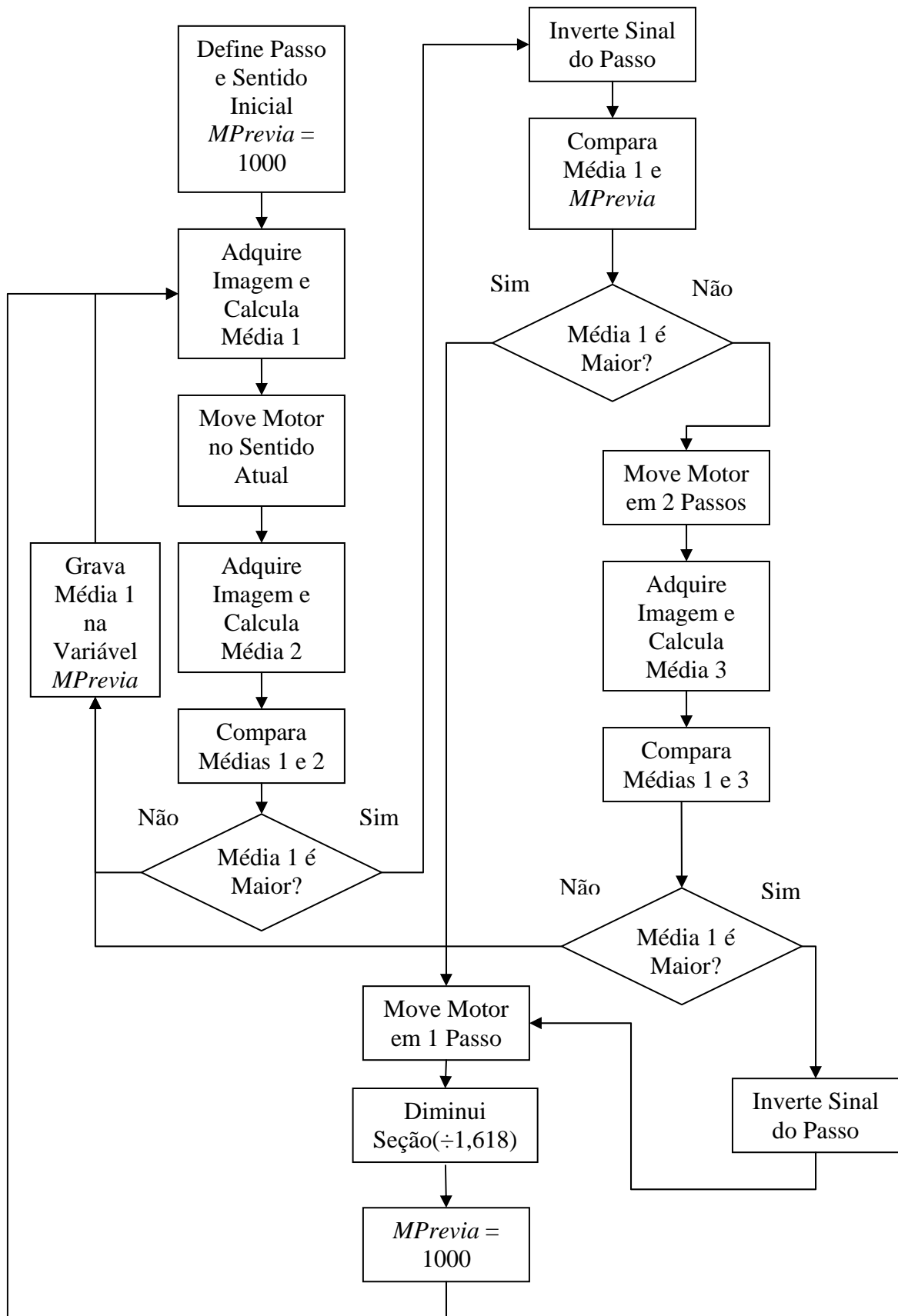


Figura 42 Algoritmo de maximização baseado no método *Golden Section Search*

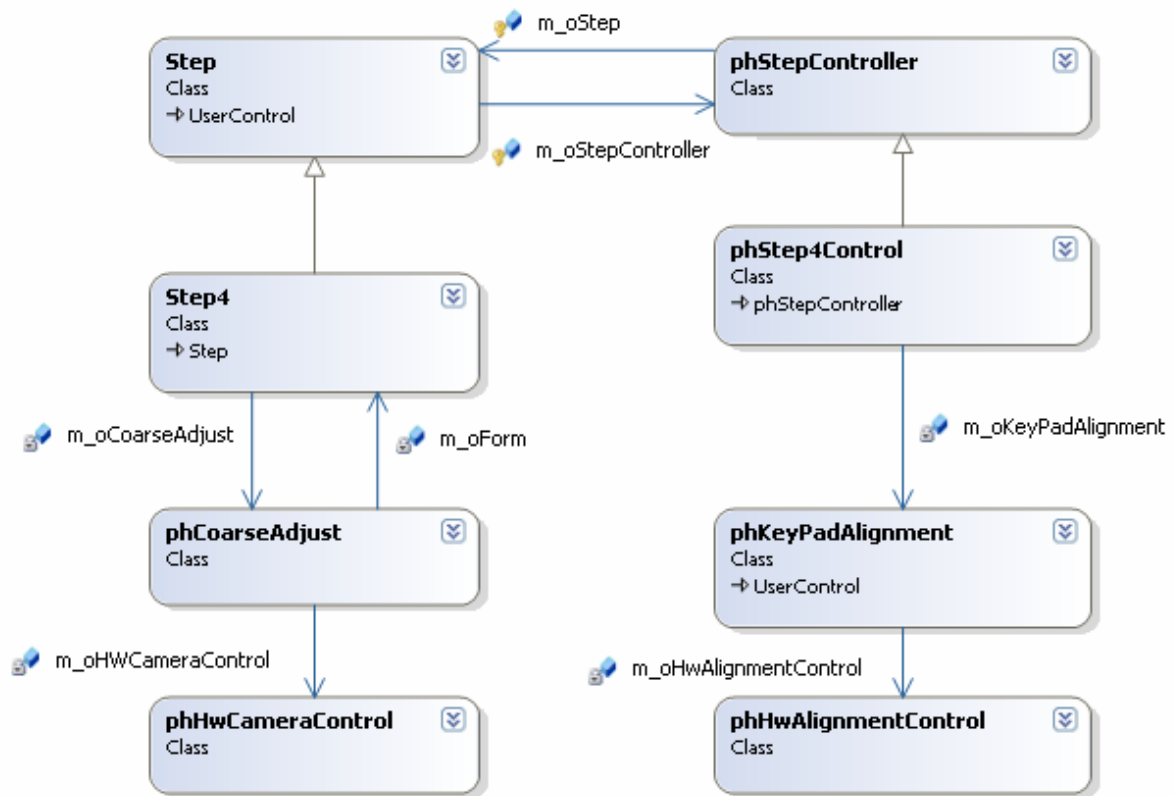


Figura 43 Diagrama de classes simplificado do módulo de alinhamento grosseiro.

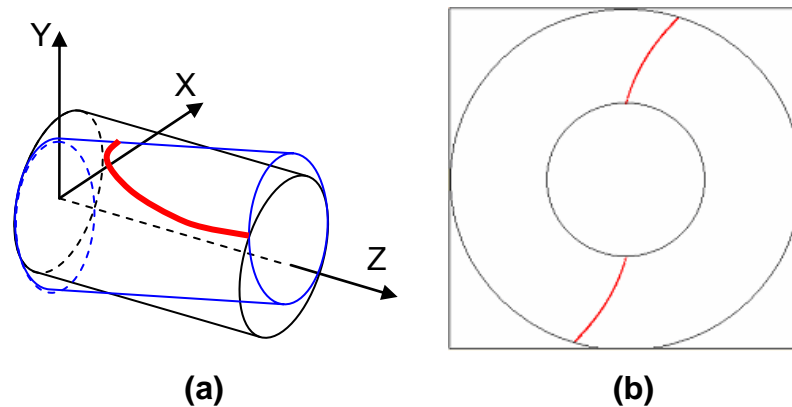
O diagrama de classes desenvolvidas para o módulo de alinhamento grosseiro pode ser visualizado na figura 43. As classes *Step4* e *phStep4Control* implementam respectivamente a interface gráfica e as chamadas de funções dos dispositivos de *hardware*. A classe *phKeyPadAlignment* implementa a interface gráfica do controle do sistema de alinhamento. A classe *phHwAlignmentControl* implementa as chamadas de funções para movimentação, ajuste de velocidade, posicionamento e limites dos motores.

#### 4.1.5 Alinhamento Fino de Peças

A realização do passo anterior irá garantir um pré-alinhamento da peça. Como resultado, o algoritmo produzirá uma imagem uniformemente iluminada do cilindro. Para que a faixa de medição seja a mais curta possível é necessário que a peça esteja muito bem alinhada em relação ao eixo óptico. Essa situação é identificada quando as franjas de interferência ocupam toda a área da imagem. O módulo de alinhamento fino de peças foi desenvolvido com esse objetivo. Tendo como premissa uma peça pré-alinhada, o algoritmo irá processar as imagens para alinhar

automaticamente a peça até que as franjas de interferência estejam presentes por toda a área iluminada. O princípio do algoritmo será mais bem detalhado a seguir.

A varredura da peça cilíndrica pode ser interpretada como a variação do raio de um cilindro virtual ideal alinhado com o eixo do interferômetro. Esse cilindro virtual ideal, ao coincidir com os limites da peça posicionada no interferômetro, irá gerar franjas apenas na região de intersecção, como mostra a figura 44. O algoritmo de alinhamento fino utiliza o método dos mínimos quadrados para construir o cilindro que melhor se encaixe dentro da região de intersecção presente no cilindro virtual de varredura. O novo cilindro encontrado através do algoritmo coincidirá com a posição da própria peça a ser medida e informará seus desalinhamentos angular e linear em relação aos eixos do interferômetro.



**Figura 44** (a) Intersecção do cilindro virtual ideal, em preto, com a peça, em azul, produzindo uma região de intersecção, em vermelho. (b) Perspectiva planificada das franjas intersecção.

A espessura das franjas de interferência indica o grau de desalinhamento da peça. Franjas muito finas significam um desalinhamento intenso. À medida que o alinhamento se aproxima do ideal, as franjas ocupam uma região maior da imagem. O algoritmo utiliza as franjas geradas pela intersecção entre o cilindro virtual e a peça, associadas com o valor do raio do cilindro virtual, para encontrar o desalinhamento da peça em todos os quatro eixos. O processo é realizado da seguinte maneira:

- A partir no raio nominal da peça a ser alinhada é realizada uma varredura, movendo-se o espelho de referência através do intervalo compreendido por  $r-\Delta l$  e  $r+\Delta l$ , com um passo  $\Delta p$ , onde  $r$  é o valor do raio nominal,  $\Delta l$  e  $\Delta p$  são valores inseridos pelo usuário, geralmente 0,25 mm e 0,01 mm;

- Dessa varredura serão retornados dois valores, o primeiro representa a posição do espelho de referência que indica o início da intersecção entre cilindro virtual (o cilindro em preto representado na figura 44); o segundo representa o fim da intersecção. O início e o fim da intersecção serão identificados respectivamente pelo surgimento e desaparecimento das franjas de interferência;
- Adquirem-se três imagens dentro da faixa de interferências, movimentando-se o espelho de referência com passos iguais e conhecidos;
- As três imagens de interferência serão segmentadas para extrair apenas os pontos onde há interferência (franjas claras na imagem do quadrado da diferença);
- Aplica-se o método dos mínimos quadrados, utilizando os pontos anteriores, para encontrar o cilindro que melhor se encaixa nos pontos;
- O algoritmo retornará valores de raio, deslocamento linear horizontal e vertical e deslocamento angular em  $\emptyset X$  e  $\emptyset Y$ ;
- Os valores são inseridos em um sistema de equações de calibração e convertidos em valores de deslocamento para cada motor do sistema de alinhamento;
- O sistema de alinhamento é ajustado e repete-se todo o processo até que a peça se encontre suficientemente alinhada.

O algoritmo acima descrito é iterativo. A cada iteração se percebe o aumento da espessura das franjas de interferência. O número de iterações necessárias é dependente da qualidade, da visibilidade das franjas e da intensidade de desalinhamento inicial. O critério de terminação será baseado no número de pontos, de uma imagem da superfície da peça, com a presença de franjas de interferência. Se esse número atingir aproximadamente 120.000 pontos o algoritmo irá considerar a peça alinhada. O algoritmo de detecção de franjas poderá não identificar corretamente a posição de início e fim das mesmas. Isso poderá ocorrer em casos de peças muito desgastadas.

A fim de se identificar as posições iniciais e finais da intersecção entre os cilindros, foi utilizado como parâmetro de análise a quantidade de *pixels* onde há presença de interferência. Para facilitar a identificação desses *pixels* na imagem foi

empregado um algoritmo de subtração de imagens. Nesse método, toda a imagem adquirida é subtraída de uma imagem de referência. Essa imagem de referência é obtida deslocando-se suficientemente o espelho de varredura de forma a não conter nenhuma figura de interferência na imagem. Com a subtração de duas imagens e o cálculo do quadrado da diferença, se não houver interferência o resultado será uma imagem preta. Caso exista interferência na imagem atual, ela será revelada por um conjunto de *pixels* brancos, formando franjas. O resultado pode ser visto na figura 24. Em (b) e (c) estão representadas duas imagens da peça: a primeira com iluminação normal e a segunda resultante da subtração de imagens. Em (b) não se identificam franjas, já em (c) elas são claramente visíveis.

Realizada a varredura é possível gerar o gráfico do número de pontos claros em função da posição do espelho de referência. As figuras 45, 46 e 47 mostram os perfis de um cilindro de raio igual a 10,5 mm nas seguintes situações: alinhamento, baixo desalinhamento e desalinhamento intenso. O primeiro gráfico mostra um pico com um valor de 150000 pontos na região próxima ao raio nominal; o segundo mostra três picos de aproximadamente 45000 pontos, em regiões próximas ao raio nominal; o terceiro gráfico indica dois picos com intensidade de 25000 pontos em posições mais distantes do raio nominal.

Nota-se que o número de pontos com interferência diminui à medida que a peça se desalinha. Com exceção do primeiro caso, onde a peça se encontrava alinhada, não há um ponto bem determinado para se indicar onde de fato as franjas de interferência se iniciam e terminam. Para tornar essa tarefa mais simples, foi definido um limiar. Os primeiros pontos acima desse limiar indicarão as devidas posições limites. O limiar proposto foi calculado como sendo a média do perfil de pontos brancos adicionado a um desvio padrão. Esse valor de limiar evitou que ruídos atrapalhassem o algoritmo, fazendo-o retornar falsas posições.

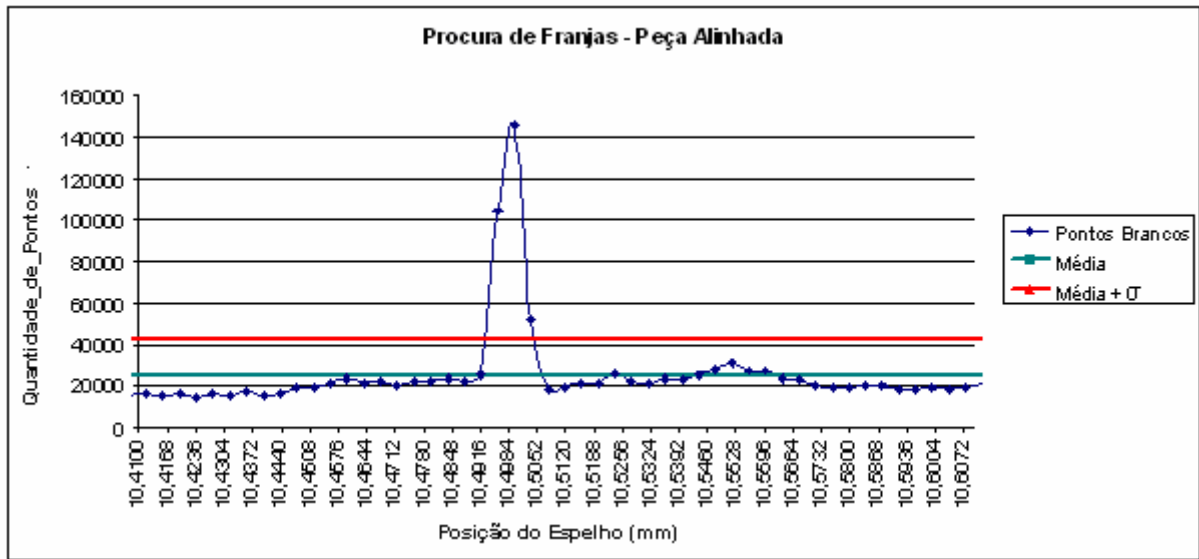


Figura 45 Número de *pixels* brancos em relação a posição do espelho de referência para uma peça alinhada.

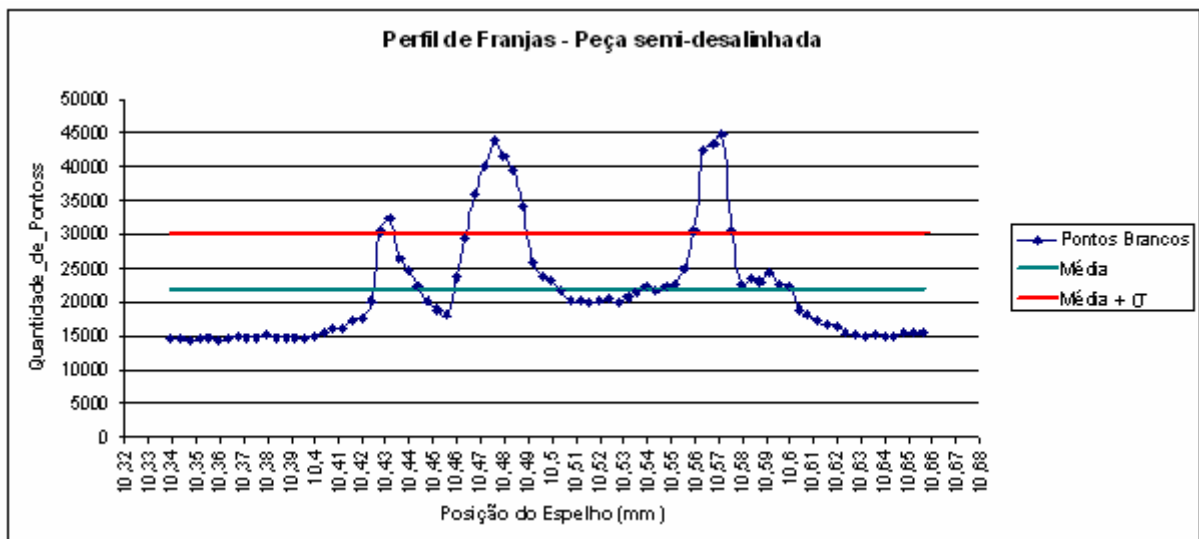


Figura 46 Número de *pixels* brancos em relação à posição do espelho de referência para uma peça pouco desalinhada.

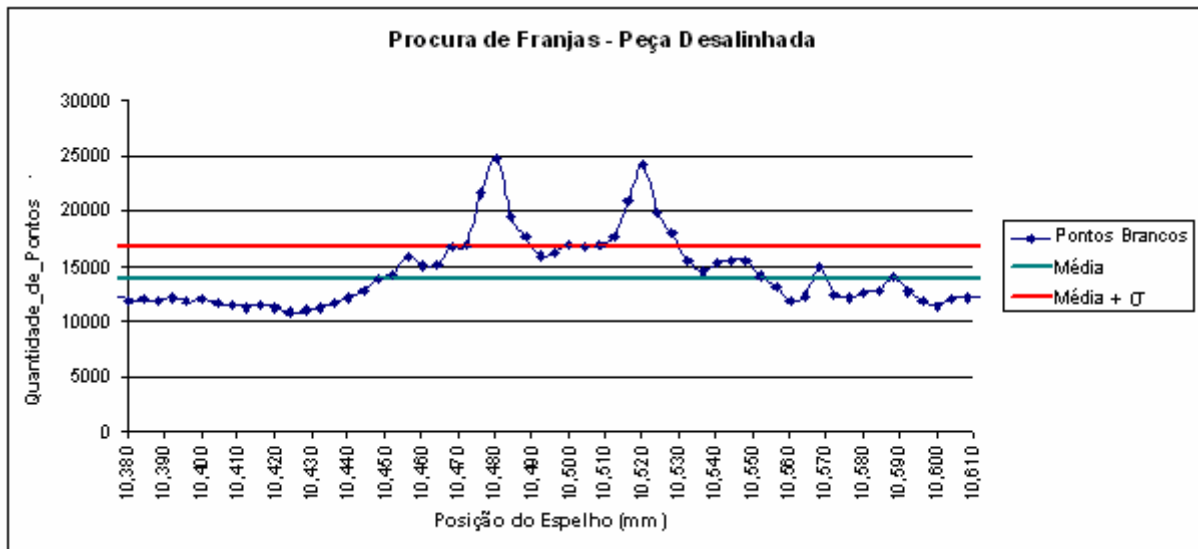


Figura 47 Número de *pixels* brancos em relação a posição do espelho de referência para uma peça muito desalinhada.

As classes desenvolvidas para o módulo de alinhamento fino são:

- *Step5*: implementa interface gráfica;
- *phStep5Controller*: implementa funções de comunicação com controles de *hardware*, o algoritmo de procura de franjas de intersecção, subtração de imagens;
- *phAlignCylinder*: implementa o algoritmo de alinhamento do cilindro utilizando mínimos quadrados.
- *phKeyPadScanner* e *phHwScanningControl*: implementam funções de controle de interface gráfica e de *hardware* para acionamento do motor de movimentação do espelho de referência.

Na figura 48 é ilustrado o diagrama de classes simplificado do módulo de alinhamento fino.



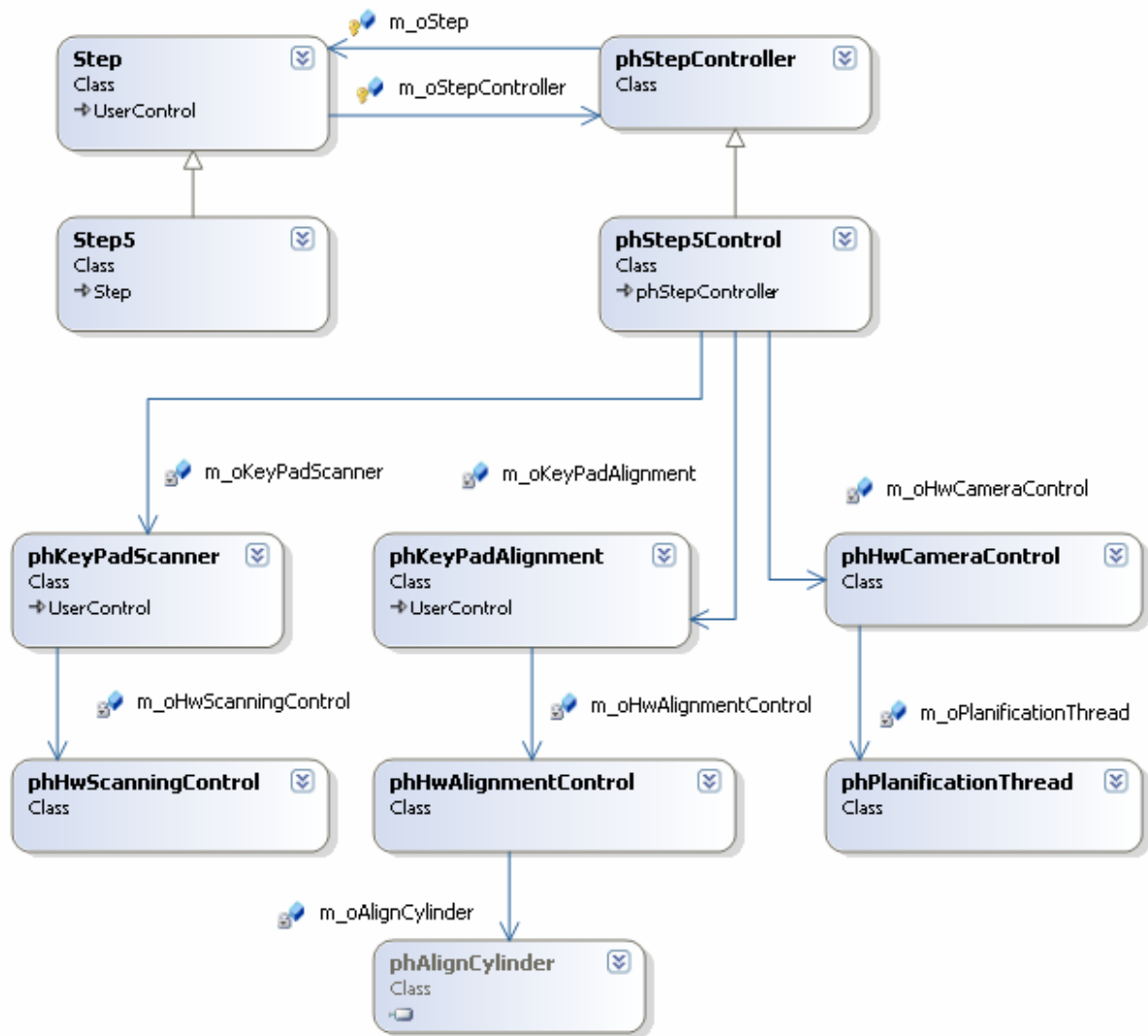
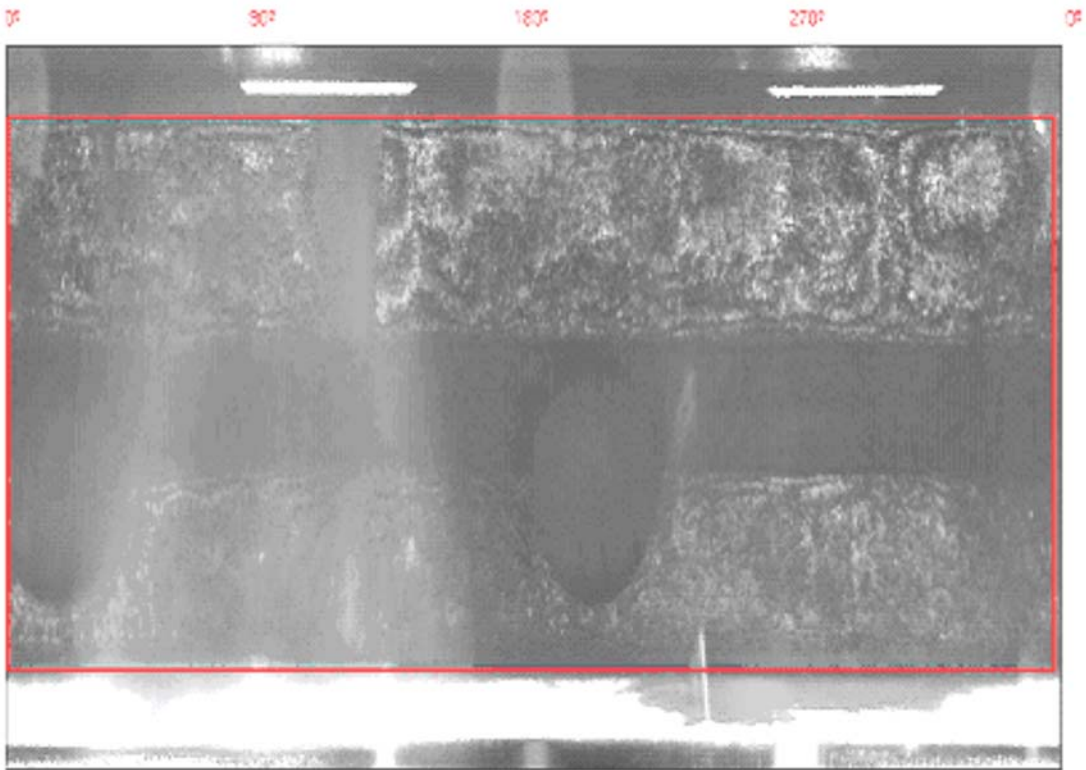


Figura 48 Diagrama de classes simplificado do módulo de alinhamento fino

#### 4.1.6 Seleção de Superfície de Medição

Muitas vezes a medição completa da superfície da peça não é necessária. Para atender a esses casos foi desenvolvido um módulo para seleção da área efetiva de medição. Essa área será selecionada pelo próprio usuário e de maneira simples e rápida, na própria imagem da peça. A figura 49 ilustra a interface gráfica do módulo desenvolvido. Na imagem planejada da peça o usuário irá determinar um retângulo que delimitará a região de medição.



**Figura 49** Determinação da área de medição. O retângulo vermelho delimita os *pixels* da imagem que serão varridos no processo de medição.

#### 4.1.7 Ajuste de Iluminação com Dois Níveis

A imagem digital (10 bits) é composta por *pixels* de valores que podem atingir até 1024 níveis de cinza. Quanto mais claro o *pixel*, maior será o valor. Muitas vezes 1024 níveis não são suficientes para representar pontos muito claros. O valor desses *pixels* acaba sendo limitado em 1024, pois ocorre a saturação do sensor da câmera. A minimização dos pontos saturados e escuros é muito importante, visto que nesses pontos não se consegue realizar nenhuma medição. Quanto menos pontos saturados e escuros estiverem na imagem mais pontos serão medidos. Muitas vezes o histograma de iluminação de uma peça é muito largo, fazendo com que muitos pontos fiquem fora da região ideal para a medição. Uma solução possível é a utilização alternada de dois níveis diferentes de iluminação, uma moderada e outra intensa. O programa seleciona para cada *pixel* a iluminação mais apropriada. Os *pixels* que ficam saturados com a iluminação intensa serão medidos com a iluminação branda.

Um novo módulo foi proposto com o objetivo de auxiliar o operador quanto à tomada de decisão sobre a utilização do tipo de iluminação e também de ajustar automaticamente os dois níveis de intensidade de iluminação.

Existem duas maneiras de se alterar a iluminação da peça: alterando o tempo de exposição da câmera (*shutter*) ou alterando a corrente elétrica da fonte de iluminação. O processo de medição utilizando dois níveis de iluminação é feito da seguinte forma: em cada passo dado pelo motor do espelho de referência são adquiridas duas imagens; uma para cada nível de iluminação. É de conhecimento que o ajuste do *shutter* da câmera requer um tempo maior do que o ajuste do valor da corrente do LED. Utilizando o segundo método haverá uma economia significativa de tempo, pois o ajuste é praticamente instantâneo.

Para otimizar o ajuste de iluminação, foi adicionado um controle para a corrente do LED, a fonte luminosa do interferômetro. O controle em questão consiste em um dispositivo de *hardware* que funciona como uma fonte programável de corrente entre 0 e 500 mA. Possui interface de comunicação USB (*Universal Serial Bus*) e a saída de corrente pode ser programada por *software*. O *hardware* foi desenvolvido pela empresa Photonita LTDA.

O algoritmo de ajuste automático de iluminação é semelhante ao algoritmo ilustrado na figura 28 para o caso de iluminação simples. Após ser executado, o algoritmo irá calcular a porcentagem de pontos não saturados e não nulos. Caso a porcentagem de pontos saturados e nulos seja representativa, é aconselhável executar-se um algoritmo equivalente ao de alinhamento duplo. Esse algoritmo é dividido em duas partes. Na primeira parte, o tempo de exposição da câmera é levado a zero e o nível de corrente do LED é maximizado. Com essa configuração o histograma estará concentrado em zero, pois apesar do nível máximo do LED, não há captação de luz pela câmera. O tempo de exposição será aumentado até que a metade do histograma ultrapasse o valor superior do limite ideal (nível de cinza 500). Depois de realizado esse ajuste, seu valor é mantido constante e reduz-se gradualmente a intensidade da corrente do LED. No início da segunda parte seu valor é máximo. O algoritmo reduzirá seu valor gradativamente até que 50% do histograma se encontre abaixo do limite mínimo do intervalo ideal (nível de cinza 200).

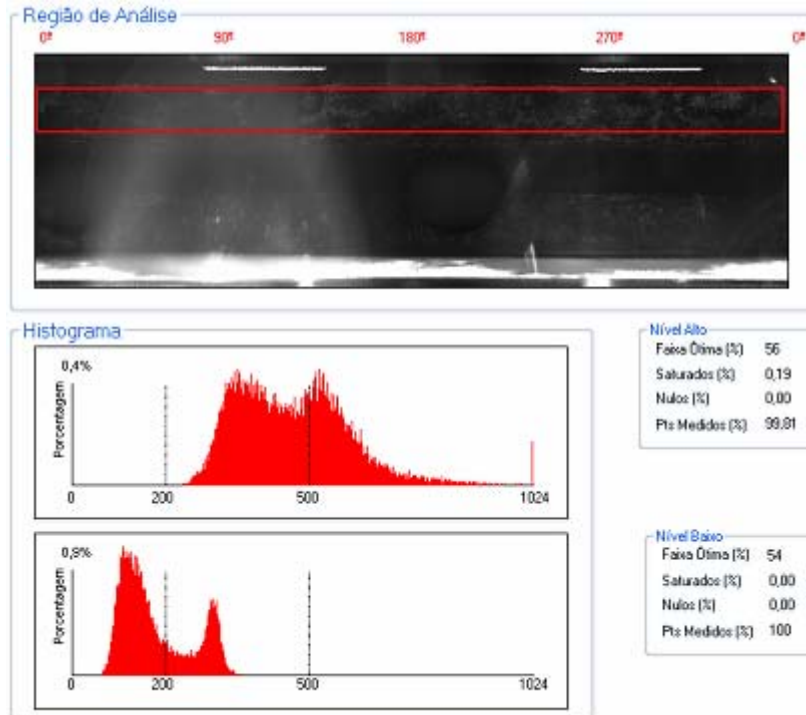


Figura 50 Histograma da imagem utilizando iluminação com dois níveis.

A figura 50 ilustra o resultado do algoritmo de iluminação com dois níveis. O primeiro processo ajustou o espectro de iluminação com 56% dentro do intervalo ótimo de 200 e 500 níveis. Entretanto há presença de alguns pontos saturados. No segundo processo, esses pontos saturados são deslocados para o intervalo ótimo, possibilitando sua medição.

Foram desenvolvidas as seguintes classes para o módulo de ajuste de iluminação, que podem ser vistos na figura 51:

- *Step7*: implementa a interface gráfica do módulo;
- *phStep7Control*: implementa as funções de comunicação com os controladores de dispositivos de *hardware*.

*phHwLedControl*: implementa comunicação com o *hardware* de controle de corrente, juntamente com a classe *phHWGPB*.

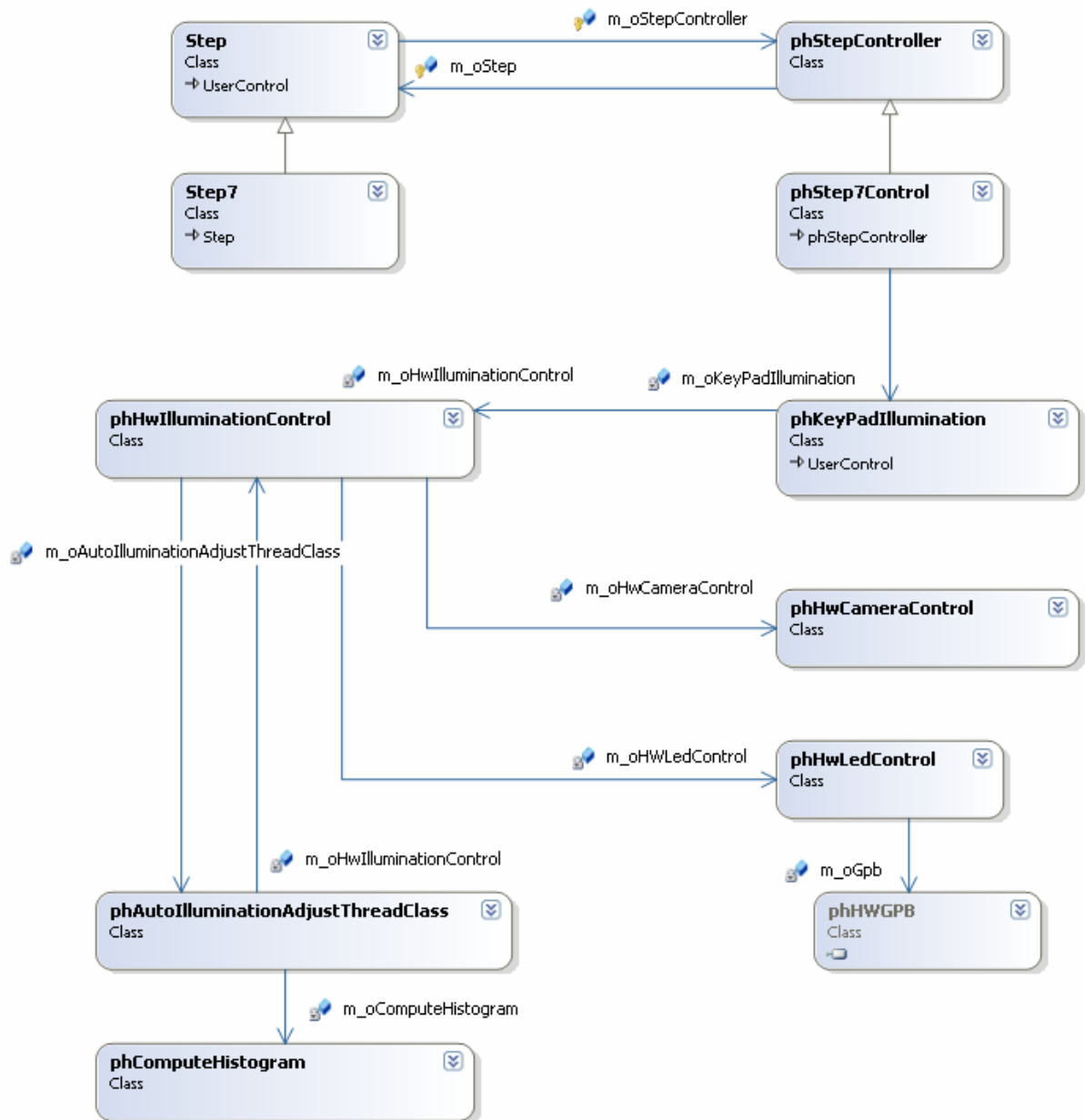


Figura 51 Diagrama de classes simplificado para o módulo de ajuste de iluminação

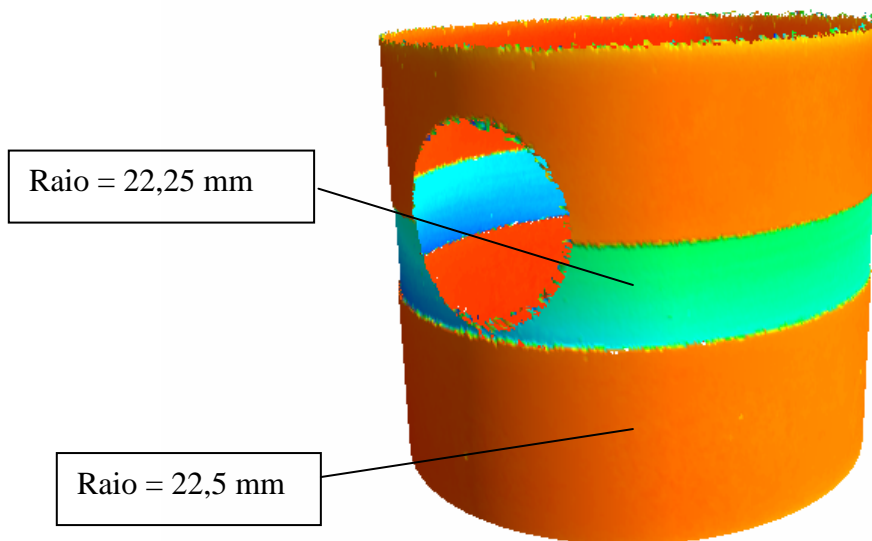
#### 4.1.8 Determinação das Faixas de Medição

Realizados todos os passos de alinhamento e de ajuste de área de medição e ajuste de iluminação é preciso definir a faixa varredura para a medição.

O próximo módulo desenvolvido tem a finalidade de detectar automaticamente os limites de varredura para a medição. Para realizar essa tarefa foi utilizado o mesmo algoritmo de busca de franjas, desenvolvido para o módulo de alinhamento fino. Neste caso, como a peça já estará alinhada, o perfil de pontos

onde há interferência será semelhante ao caso ilustrado pela figura 45. Portanto a faixa de varredura poderá ser bem menor.

Existe uma demanda de medição de pistões com rebaixos. No primeiro protótipo, a medição de pistões com tais características era realizada aumentando a faixa de varredura. Dependendo da diferença entre o raio nominal e raio do rebaixo, a medição consumirá muito tempo varrendo inclusive regiões sem a presença de franjas de interferência.



**Figura 52** Medição de cilindro com rebaixo. Valores de raios diferentes. Faixa de medição: 11,11867 mm até 11,26067 mm. Tempo de medição = 49 min e 13 s.

Para possibilitar mais agilidade nesse processo, foi prevista a varredura de mais de uma faixa de medição em uma mesma peça. No presente módulo foi desenvolvida uma interface para permitir o usuário entrar com valores dos raios nominais que deseja medir. Cada valor de raio representará uma nova faixa de medição, que será varrida seqüencialmente.

#### 4.1.9 Varredura

O último módulo desenvolvido é o da varredura. Esse módulo concluirá todo o processo. Ao chegar neste passo, todas as configurações já estarão ajustadas. O operador só irá iniciar a varredura da peça. Os parâmetros que foram ajustados nos

passos anteriores serão gravados no banco de dados, como descrito no primeiro módulo (4.1.1). As imagens da peça e das franjas são mostradas durante a varredura. Ao final da medição, será atribuída a cor cinza aos pixels da imagem que foram medidos, indicando seu término. Aqueles que por algum motivo não foram medidos permanecerão com a cor preta.

As seguintes classes foram desenvolvidas para o módulo de medição:

- *Step9*: implementa a interface gráfica do módulo;
- *phStep9Control*: implementa as funções de comunicação com os controladores de dispositivos de *hardware*;
- *phScanner*: implementa as funções de varredura, o algoritmo de extração do correlograma e o cálculo do centróide para determinação do pico do sinal de modulação;
- *phCylindricCloudOfPoints*: essa classe, desenvolvida por Dal Pont, foi utilizada para construir cilindros a partir dos valores medidos pelo algoritmo de varredura das peças.

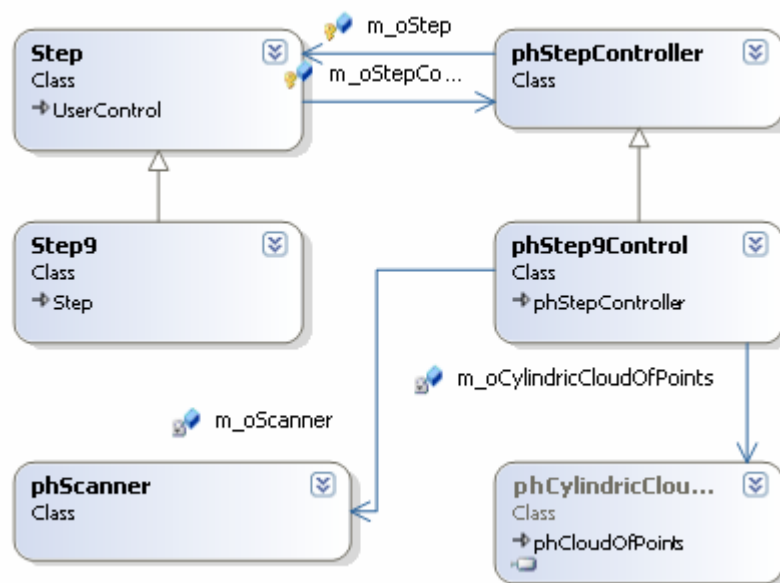


Figura 53 Diagrama de classes simplificado do módulo de medição.

#### 4.1.10 Classes

O desenvolvimento de todos os módulos gerou uma quantidade consideravelmente grande de classes. Cada módulo contém um conjunto de classes e objetos que podem ser independentes ou compartilhados entre várias outras estruturas. Para que o gerenciamento dessas estruturas se desse de forma eficiente,

foram desenvolvidas classes com níveis hierárquicos mais elevados. Estas classes irão gerenciar o seqüenciamento de módulos e o compartilhamento de componentes e objetos, evitando o acesso múltiplo aos vários componentes, como câmera motores e fonte luminosa. Para isso foram criadas as seguintes classes:

- `phHWI_RadControl`: essa classe implementa funções de gerenciamento da comunicação entre dispositivos de *hardware* e os módulos;
- `phHW_IRadGUI`: essa classe irá implementar funções para o gerenciamento de troca de interfaces;
- `phSystemData`: essa classe grava os estados finais da configuração de cada dispositivo após ser utilizado por um módulo. Com isso o próximo módulo que utilizar aquele *hardware* poderá utilizar as mesmas configurações.

A figura 54 ilustra o diagrama global, contendo as principais classes que implementam os módulos descritos no capítulo e as classes de gerenciamento dos passos compreendidos no processo de medição.



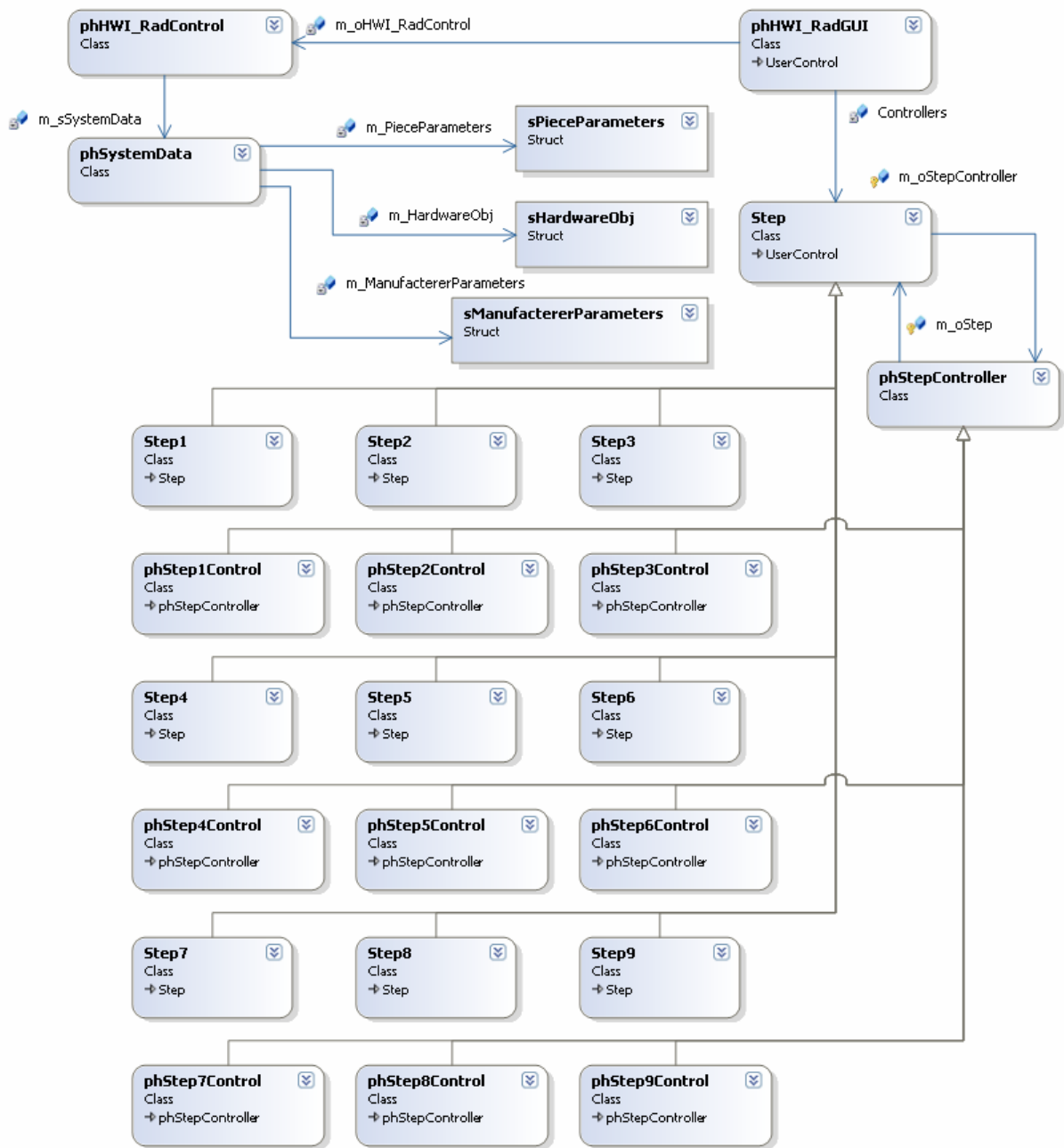


Figura 54 Diagrama de classes simplificado mostrando a hierarquia e o controle de gerenciamento dos módulos implementado.

## 4.2 Interface de Calibração

O interferômetro de luz incoerente realiza medições se baseando na posição do espelho de referência. Como discutido no segundo capítulo, o pico da envoltória do correlograma indicará que o caminho óptico entre a fonte luminosa e o ponto medido é igual ao caminho óptico entre a mesma fonte e o espelho de referência. Isso não possibilita uma medição absoluta de cada ponto, a menos que a posição do

espelho seja relacionada com o raio do cilindro medido. Para isso é necessário realizar uma calibração do sistema. Para realizar essa tarefa foi desenvolvido um módulo especial. O módulo de calibração irá auxiliar o operador a realizar os ajustes necessários para se obter a menor incerteza de medição possível. Para realizar a calibração é necessário utilizar um cilindro padrão como peça a ser medida. As funções que estão implementadas no módulo de calibração são:

- Referenciamento do motor de movimentação do espelho de referência: esse processo é necessário, pois a posição do motor utilizado para deslocar o espelho de referência não está atrelada ao valor do raio do cilindro. Para isso é necessário adicionar um valor de correção à posição retornada pelo motor. Uma falta de energia elétrica também irá causar a perda da referência da posição do motor, portanto é importante existir uma forma de recuperar esse valor de referência. A referência é feita da seguinte forma. Primeiramente é preciso introduzir, alinhar e encontrar a faixa de medição de cilindro padrão de raio conhecido. Será realizada a medição e calculado, através do método dos mínimos absolutos, um cilindro ideal que melhor se ajuste nos pontos do medido. O raio desse cilindro certamente terá um valor diferente do valor do padrão. A diferença de valor será associada com o valor da posição do motor de movimentação do espelho e será corrigida nas medições subseqüentes. O processo estará terminado;
- Definição da nuvem de correção: a definição da nuvem de correção está diretamente relacionada com a calibração das faixas radiais medidas pelo interferômetro. Ela irá corrigir o erro sistemático do sistema. A obtenção da nuvem de correção é realizada segundo os procedimentos descritos por Dal Pont. O padrão é alinhado uma única vez e as varreduras são executadas no mesmo sentido. O cilindro padrão é medido N vezes. As medições são guardadas em um arquivo para cálculo da média e desvio padrão. Do cálculo da média se constrói uma nuvem de pontos que pode ser definida como a nuvem de correção. O cálculo da média é realizado através da equação:

$$M_k = \frac{\sum_1^N r_i^{(k)}}{N}$$

Equação 39

onde:

$M_k$  = média do raio no ponto k;

N = número de medições;

$\sum_1^N r_i^k$  = somatório das N medições do raio no ponto k.

- Definição do centro do espelho: o método utilizado foi o mesmo usado por Dal Pont <sup>[15]</sup>. Consiste em obter o perfil de duas linhas, vertical e horizontal, posicionadas no centro da imagem. Em cada perfil é realizado o cálculo do centróide seqüencialmente. As coordenadas do centro do espelho serão dadas pelos valores de cada centróide, respectivamente. O centro do espelho é utilizado para a planificação dos pontos e por isso precisa ser bem determinado.

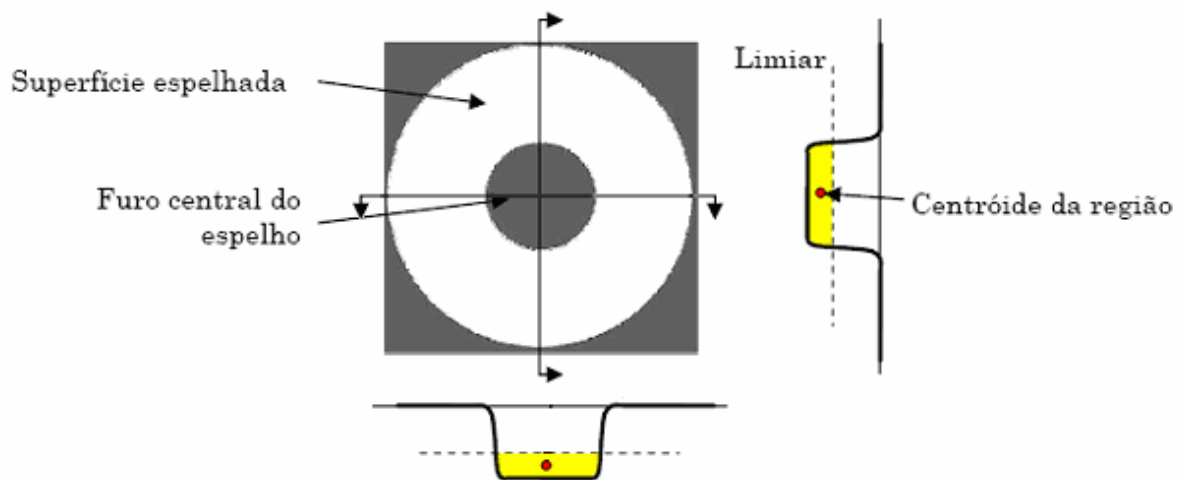


Figura 55 Cálculo do centróide para determinação do centro do espelho côncavo <sup>9</sup>.

<sup>9</sup> Imagem extraída e modificada de [15]

# Capítulo 5

## Avaliação de Desempenho

Neste capítulo será realizada a avaliação da eficiência dos módulos que foram implementados. Dividiu-se a análise em duas partes. Na primeira parte foram realizadas medições dos tempos de execução dos principais módulos. Na segunda parte foi feita uma comparação qualitativa entre o primeiro protótipo e o novo IRAD, utilizando a técnica de matriz de decisão.

Dois experimentos adicionais foram realizados para avaliar a medição de peças com rebaixos e para testar a medição de peças desgastadas.

### 5.1 Medições de Tempos de Execução dos Módulos

Na primeira parte da análise foram executadas seis medições, todas utilizando cilindros diferentes. Em cada medição foram tomados os tempos dos alinhamentos automáticos e de varredura para cada peça. Isso possibilitou a comparação com os tempos tomados do protótipo do IRAD, como mostrado no terceiro capítulo. Os resultados encontram-se na tabela 6.

Tabela 6 Tabela de tempos e resultados dos módulos automáticos implementados

	Nome Peça	Tipo	Altura (mm)	Diâmetro (mm)	Desgaste?
1	Longo Preto	Longo	52,00	19,50	não
2	Pistão não tratado	De Linha	21,00	22,50	sim (bastante)
3	Pino	Pino	21,85	7,49	não
4	Pistão tratado	De linha	21,00	22,50	não
5	Pistão desgastado	De linha	21,00	22,50	sim
6	Pistão desgastado	De linha	21,00	26,50	sim

	Alinhamento grosso	Alinhamento fino	Resultado	Tipo de iluminação (1 ou 2 níveis)	Limite inferior (mm)	Limite superior (mm)	Tempo de Medição
1	2 min e 27s	1 min e 50 s	Ok	1	9,7302	9,7640	11 min e 07 s
2	2 min e 53s	2 min e 28 s	Ok	1	11,1303	11,2610	33 min e 21 s
3	2 min e 51s	1 min e 49 s	Ok	1	3,7206	3,7430	7 min e 51 s
4	2 min e 22 s	2 min e 45 s	Mal alinhado	1	11,2199	11,2512	10 min e 15 s
5	2 min e 04 s	2 min e 41 s	Ok	1	11,2212	11,2525	10 min e 17 s
6	1 min e 50s	2 min e 41 s	Ok	1	12,9795	13,0024	7 min e 55 s

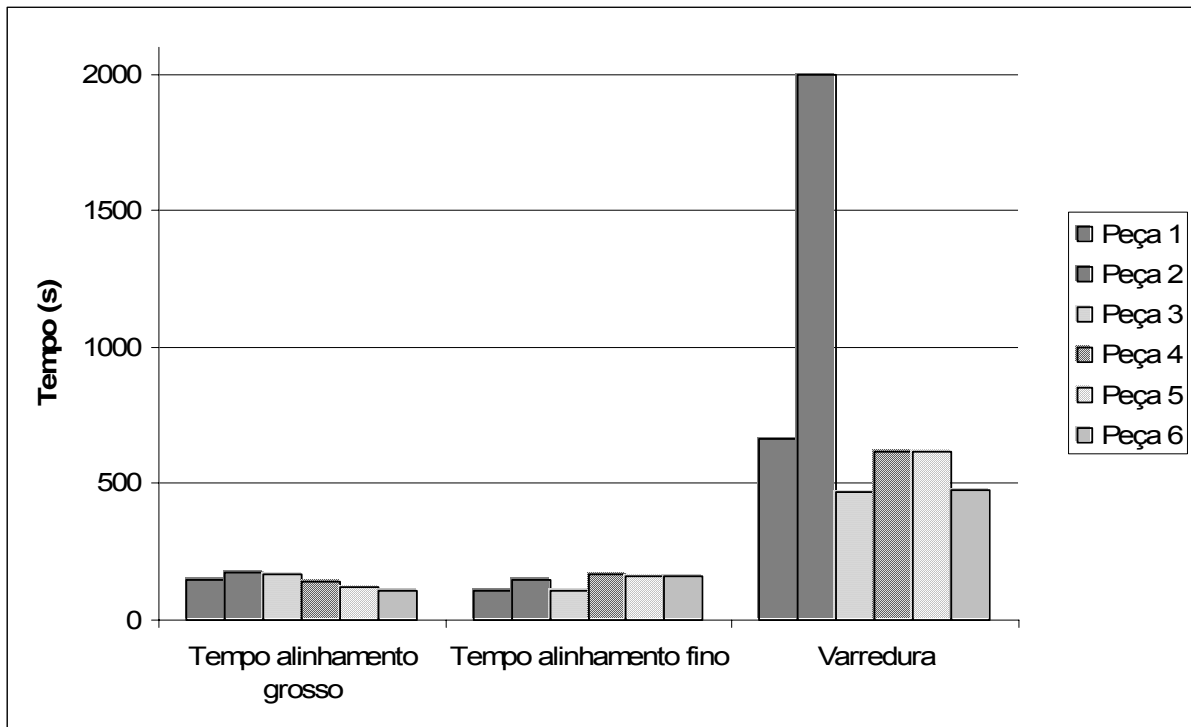


Figura 56 Tempos medidos para cada processo. Nota-se que o tempo de varredura do cilindro 2 destoa da média. Isso é devido à presença de desgaste excessivo que aumentou a faixa de varredura, e não de um possível mau alinhamento.

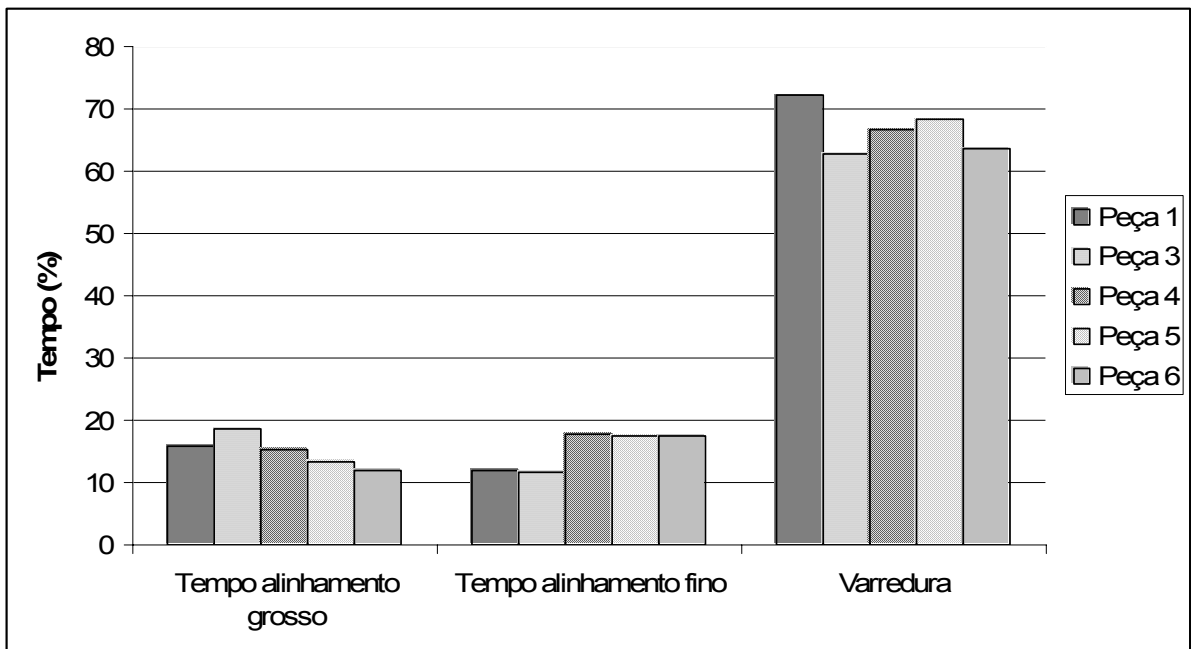
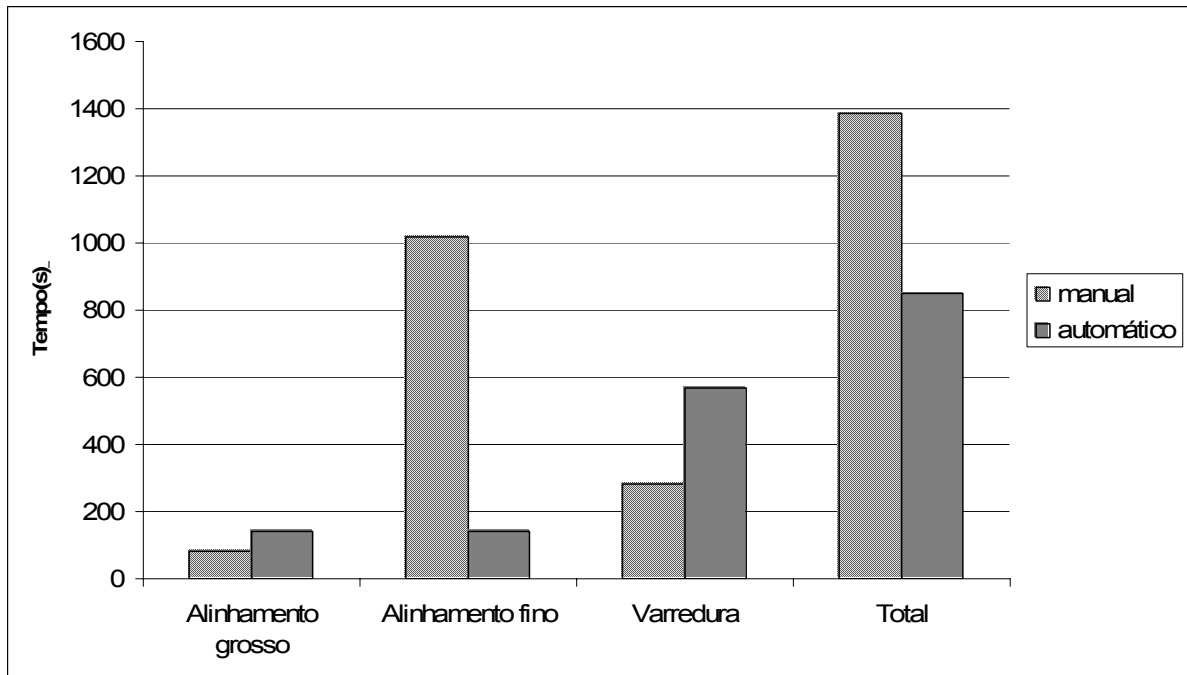


Figura 57 Porcentagens dos tempos referentes aos módulos de alinhamento automático e de varredura. Agora a varredura representa o gargalo do processo de medição.



**Figura 58** Comparação entre os tempos dos processos de medição manual e automático.

Com os dados obtidos na tabela 6, foram gerados três gráficos. O primeiro (figura 56) contém os tempos dos módulos em segundos. A figura 57 contém os tempos dos módulos em termos percentuais. Os tempos da peça 2 foram desconsiderados, pois nela havia a presença de desgaste excessivo, o que elevou muito o tempo de sua medição. Por ser um caso especial e para não prejudicar a escala do gráfico ela foi excluída. O terceiro gráfico (figura 58) realiza uma comparação entre os tempos do sistema automatizado e o manual.

Através da tabela 6 e dos gráficos nas figuras 56, 57 e 58 é possível tirar conclusões sobre os processos. Os resultados indicam que tanto o alinhamento grosseiro como o fino funcionam adequadamente. Comparando-se os tempos dos módulos automáticos com os métodos manuais, verifica-se que:

- O tempo médio para o alinhamento grosseiro automático é ligeiramente maior que o processo manual. Houve um aumento no tempo de 82 s no método manual para 144 s no processo automático. Um acréscimo de 76 % do tempo médio;
- O tempo médio de alinhamento automático fino (142 s) é muito menor que o alinhamento fino manual (1020 s). Um decréscimo de 86 % no tempo médio do processo. O tempo, que representava 60 a 85% do tempo de medição, agora assume uma porcentagem de 10 a 20%;

- O tempo total de varredura no sistema automatizado tornou-se maior que o tempo do sistema manual, indo de em média 283 para 569 s. Um aumento de 102 % no tempo médio. A explicação para tal fato está na determinação automática dos limites de medição. Como pode ser percebido nas figuras 45, 46 e 47, o surgimento das franjas nem sempre é muito bem definido. Para assegurar que elas se encontrem dentro do intervalo de varredura, viu-se a necessidade de um pequeno aumento desses limites após o resultado do algoritmo, a saber,  $\pm 0,006$  mm. Nota-se também, em termos relativos, que o tempo de varredura no sistema automático agora passa a representar 64% do tempo total da medição, enquanto que o tempo de varredura do sistema manual representava 20% em média. O aumento do tempo de varredura para o processo automático se deve à inclusão dos limites de segurança durante a determinação da faixa radial de medição. A figura 59 ilustra a distribuição dos tempos dos processos de ambos os sistemas;

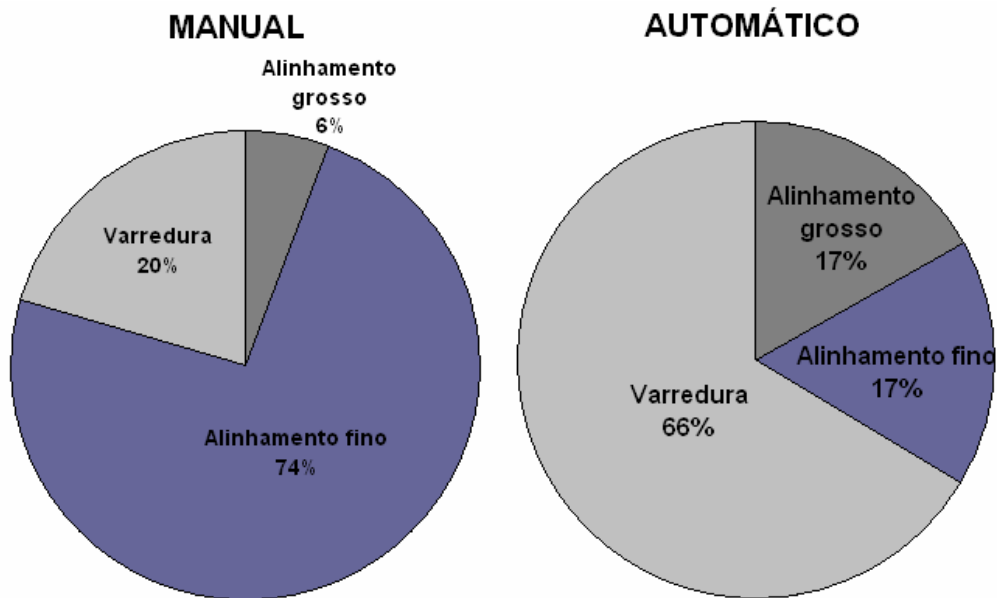


Figura 59 Distribuição média dos tempos dos processos envolvidos na medição.

- O tempo total médio de medição do sistema automatizado, de 849 s (14 min e 9 s) é menor que o tempo total do sistema não automatizado que era de 1384 s (23 min e 4 s). Uma diferença de 535 s, representando uma diminuição média de 39 % no tempo de medição da peça.

## 5.2 Comparações entre os Sistemas

A comparação entre os tempos dos sistemas manual e automatizado é um elemento muito importante, mas não é suficiente para se avaliar os módulos implementados neste trabalho. Algumas vantagens de se ter um sistema automatizado não foram evidenciadas. Por isso, nesta segunda parte, foi realizada uma comparação qualitativa. Essa avaliação será baseada na percepção do usuário que necessariamente já tenha utilizado os dois sistemas. Normalmente é complicado traduzir essa avaliação em números. A técnica de matriz de decisão é um meio de se obter uma comparação numérica para termos qualitativos. Neste trabalho foi utilizada a mesma metodologia como forma de avaliação. Para isso foram estabelecidos alguns critérios, que podem ser traduzidos em tempo, modo de operação (custo) e resultados (ganho). A avaliação considerou pesos diferentes para cada módulo. Os critérios criados se encontram nas tabelas 8 e 9. O nono módulo (de medição) não foi analisado por realizar o processo exatamente da mesma forma como é realizado pelo protótipo do IRAD.

Para se avaliar o peso de cada módulo foram utilizados critérios relacionados com a varredura das peças, que consiste efetivamente na medição. Os critérios estão relacionados a conceitos que por sua vez podem ser traduzidos em notas entre 0 e 10. Quanto maior a influência do módulo sobre processo de varredura, maior será seu peso. Esses critérios estão detalhados na tabela 7.

**Tabela 7 Critérios para avaliação de influência no processo de medição.**

Conceito	Critério	Nota
Muito Importante	O resultado do módulo influenciará o processo de varredura, podendo inviabilizá-la caso não realizado.	10 - 8
Importante	O resultado do módulo influencia o processo de varredura, mas não chega a inviabilizá-la caso não apresente um bom resultado.	8 - 6
Razoavelmente Importante	O resultado do módulo não influencia diretamente o processo de varredura, mas sim outro processo importante ou muito importante.	6 - 4
Pouco Importante	O resultado do módulo causa pouca influência em um processo importante ou muito importante.	4 - 2
Desnecessário	O resultado do módulo não causa diferença em nenhum processo.	2 - 0



Os critérios de avaliação de resultados foram determinados de forma a associar o que se espera do módulo confrontado com o que ele em média retorna. Quanto mais próximo do esperado, maior será a nota. A tabela 8 define os critérios, conceitos e notas da avaliação de resultados.

**Tabela 8 Critérios para avaliação de resultados atingidos.**

Conceito	Critério	Nota
Ótimo	O resultado atingido pelo módulo foi melhor que o esperado.	10 - 8
Bom	O resultado atingido pelo módulo atingiu as exigências mínimas.	8 - 6
Regular	O resultado atingido pelo módulo foi um pouco abaixo do que as exigências mínimas.	6 - 4
Ruim	O resultado atingido pelo módulo foi abaixo das exigências mínimas.	4 - 2
Péssimo	O resultado atingido pelo módulo é pior que o estado inicial (sistema anterior).	2 - 0

O tempo e o tipo de operação representam o custo de cada módulo, ou seja, o que é preciso para se obter um resultado bom ou ótimo. A tabela 9 detalha os critérios estabelecidos.

**Tabela 9 Critérios de avaliação de tempo e modo operação.**

Conceito	Critério	Nota
Rápido e Automático	O módulo realiza o processo automaticamente num intervalo de tempo baixo entre 30 s e 3 min.	10 - 8
Igualmente lento e Automático	O módulo realiza o processo automaticamente dentro de um intervalo de tempo entre 3 e 5 min.	8 - 6
Lento e automático	O módulo realiza o processo automaticamente, mas em um tempo maior que 5 min.	6 - 4
Rápido e Manual	Processo é realizado manualmente e leva menos que 3 min.	4 - 2
Lento e Manual	Processo é manual e leva mais que 10 min.	2 - 0

A partir dos critérios estabelecidos nas tabelas 7, 8 e 9 foram atribuídas notas para cada processo dos dois sistemas: o manual e o automatizado (ver anexo C). A

tabela 10 compila todas essas avaliações calculando a nota média para cada um e permitindo a comparação entre eles.

**Tabela 10 Tabela de avaliação**

Módulo	Indicador	Influência		Sistema			
				Automatizado		Não Automatizado	
		Peso	%	Nota	Pontos	Nota	Pontos
Seleção de Peças	Resultado	7	12,72	10	0,63	1	0,06
	Tempo e Op.			10	0,63	0	0
Inserção de Peças	Resultado	4	7,27	8	0,29	5	0,18
	Tempo e Op.			6	0,22	5	0,18
Ajuste de Iluminação	Resultado	6	10,90	8	0,44	6	0,32
	Tempo e Op.			4	0,22	5	0,27
Alinhamento Grosso	Resultado	7	12,72	9	1,15	9	0,57
	Tempo e Op.			7	0,45	7	0,44
Alinhamento Fino	Resultado	10	18,18	9	0,82	7	0,63
	Tempo e Op.			8	0,73	2	0,18
Determinação da Superfície de Medição	Resultado	3	5,45	10	0,27	10	0,27
	Tempo e Op.			10	0,27	9	0,24
Iluminação com Dois Níveis	Resultado	9	16,36	8	0,65	9	0,73
	Tempo e Op.			8	0,65	7	0,57
Determinação das Faixas de Medição	Resultado	9	16,36	9	1,47	10	0,81
	Tempo e Op.			7	0,57	8	0,65
Total					<b>9,47</b>		<b>6,16</b>

Segundo a avaliação, o sistema composto pelos módulos automatizados é mais eficiente. Ele permite realizar medições com menor esforço do usuário e com qualidade semelhante à do sistema não automatizado.

### 5.3 Medição de Pistões com Rebaixo

Um estudo de caso foi realizado com uma peça de raio nominal igual a 22,5 mm, contendo um rebaixo com raio de 22,25 mm (figura 52). Primeiramente a peça foi medida com apenas uma faixa de medição englobando os dois raios. Em seguida esta peça foi medida com duas faixas de medição: uma para seu raio nominal e outra para o raio do rebaixo. Os tempos de cada procedimento se encontram na tabela 11.

Tabela 11 Tempos de medição de um pistão com rebaixo <sup>10</sup>.

Nº de Faixas	Limite Superior (mm)	Limite Inferior (mm)	Tamanho da Faixa (µm)	Tempo
1	11,26067	11,11867	142,0	49 min e 13 s
2	11,25994	11,2439	55,37	20 min e 39 s
	11,158	11,11867		

Analisando a tabela acima, nota-se a grande economia de tempo alcançada pelo novo método para medição de peças com rebaixo (4.1.8 Determinação das Faixas de Medição). Com a divisão da faixa de medição em duas menores evita-se que o sistema meça faixas que não interessam para o resultado da medição.

#### 5.4 Medição de Pistões Utilizando Iluminação com Dois Níveis

Nesse experimento foram selecionados quatro pistões contendo regiões de desgaste em sua superfície, mostrados na figura 60. As peças foram medidas utilizando iluminação simples, ou seja, com um mesmo nível durante toda a varredura, e iluminação dupla, onde se alternam dois níveis durante a medição. O número de pontos medidos em cada cilindro foi utilizado para realizar a comparação entre os métodos. Cada procedimento foi realizado três vezes. Os resultados se encontram na tabela 12.

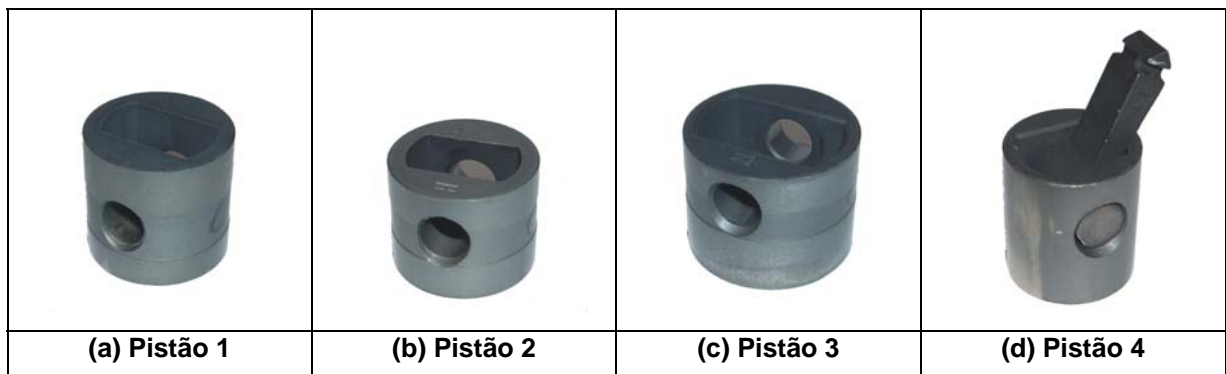


Figura 60 Pistões com desgaste

<sup>10</sup> As medições foram realizadas utilizando um computador com processador de 1500 GHz, com 512 MBytes de memória RAM. A média de tempo obtida para cada micrometro foi neste caso de 20,15 s.

Tabela 12 Número de pontos medidos em função do tipo de iluminação

Medição	Pistão 1		Pistão 2		Pistão 3		Pistão 4	
	1 Nível	2 Níveis	1 Nível	2 Níveis	1 Nível	2 Níveis	1 Nível	2 Níveis
1,00	185686	242627	237541	257373	162224	203559	347247	389050
2,00	182300	245650	235380	258938	163599	202334	345933	389783
3,00	183223	245492	238609	257463	161341	204826	346302	389450
Média	183736	244590	237177	257925	162388	203573	346494	389428
$\sigma$	1750	1702	1645	879	1138	1246	678	367
Diferença	60853 pontos		20748 pontos		41185 pontos		42934 pontos	
<b>Ganho Percentual utilizando 2 Níveis</b>	33%		9%		25%		12%	

Observando a tabela 12 se pode concluir que a iluminação com dois níveis exerce influência positiva na medição de pistões que apresentam desgaste. Em todos os casos houve aumento da quantidade de pontos medidos.

# Capítulo 6

## Considerações Finais

Neste trabalho foram propostos e implementados módulos de automatização para tornar mais prático, rápido e confiável o processo de medição de cilindros em um interferômetro radial de luz incoerente. A medição foi sistematizada em nove etapas seqüenciais. Dentro dessas nove etapas, a mais crítica e difícil consistia no alinhamento das peças com o eixo óptico do interferômetro. Esses objetivos foram plenamente atingidos.

### 6.1 Conclusões

Depois de realizados os testes, chegaram-se às seguintes conclusões sobre os módulos implementados:

- O cadastramento de peças em banco de dados possibilitou maior organização e agilidade na utilização do IRAD. Normalmente são medidos diversos tipos de peças, com diâmetros e acabamentos diferentes. Esse cadastro possibilitou um ajuste de iluminação imediato e determinação da faixa de varredura de forma mais ágil para peças de tipos já cadastrados;
- O módulo de centralização automática demonstrou-se muito eficiente, fornecendo um bom ponto de partida para o alinhamento e evitando choques entre peça e espelho cônico;
- O módulo de iluminação com ajuste automático mostrou-se eficaz, pois seus resultados são próximos dos ideais para realizar o alinhamento grosseiro automático, independentemente do acabamento da peça;
- O alinhamento grosseiro automático forneceu resultados muito satisfatórios em um tempo também dentro das expectativas. A utilização da média dos valores dos pixels da imagem como parâmetro de ajuste tornou o processo robusto;

- O alinhamento fino automático atingiu as exigências, resultando em alinhamentos sensivelmente mais rápidos, possibilitando inclusive a realização do processo por operadores que desconhecem os procedimentos manuais de alinhamento. Seu resultado é muito próximo daquele obtido com o alinhamento manual realizado por um profissional experiente, incluindo um excelente ganho em tempo, correspondendo a apenas 14 % da média obtida com o método manual, levando em média 2 min e 30 s para alinhar uma peça;
- O módulo de seleção de área de medição não representou uma melhoria impactante ao sistema. Sua principal contribuição está associada com a sistematização do processo. Esse módulo evita um possível esquecimento da seleção de uma área de medição;
- A medição com dois níveis de iluminação demonstrou ser eficiente em casos de peças apresentando desgaste. Para os casos experimentados o número de pontos medidos, utilizando a técnica, aumentou consideravelmente;
- O tempo de medição de pistões com rebaixos foi otimizado através da divisão da faixa de varredura. Esse método evitou que regiões intermediárias fossem medidas, levando o sistema a varrer apenas as regiões de interesse;
- O módulo de determinação da faixa de varredura apresentou bons resultados, localizando limites superiores e inferiores sempre fora do intervalo onde se encontram as franjas de interferência. Permitiu também uma grande economia de tempo na medição de peças com rebaixos ao permitir a divisão da faixa de medição;

Em síntese os principais benefícios da versão automatizada do IRAD são:

- A operação do interferômetro se tornou muito mais fácil e sistematizada, exigindo níveis de treinamento muito menos exigentes do seu operador;
- O alinhamento de peças, que exigia muito tempo e habilidade do operador, agora pode ser executado automaticamente, em um tempo 86% menor do que o procedimento manual;

- O tempo médio total de medição de uma peça foi reduzido em 20% para os casos avaliados;
- A incerteza de medição do sistema não foi alterada significativamente a menos dos ganhos decorrentes do melhor alinhamento da peça medida.

## 6.2 Sugestões para os Próximos Trabalhos

Para dar continuidade ao desenvolvimento do interferômetro, são dadas algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Para realizar a medição de pistões com altura maior que 21 mm pode ser acoplado um estágio de deslocamento motorizado que movimenta o sistema de alinhamento para dentro e para fora do espelho cônico. Peças com altura maior que 21 mm serão medidas em partes, mas de forma automática e suas nuvens de pontos concatenadas, resultando em um único volume de medição;
- A varredura das peças atualmente não é realizada de forma contínua. O espelho de referência é deslocado em passos de igual distância. A oscilação do espelho causada pela desaceleração do motor obriga o sistema a aguardar pela estabilização do mesmo para só então prosseguir para o próximo passo. Isso torna o processo muito lento. Entretanto, na literatura existem métodos que utilizam a teoria de transformadas e filtragem de sinais que possibilitam a medição contínua. O sinal será processado posteriormente à varredura para se encontrar o ponto de máximo do envelope do correlograma. Uma nova sugestão para o próximo trabalho é a implementação e avaliação desses métodos <sup>[18]</sup> <sup>[24]</sup> para tornar o IRAD ainda mais rápido.

# Referências Bibliográficas

- [1] ALBERTAZZI, Armando; DAL PONT, Alex. Preliminary measurement performance evaluation of a new white light interferometer for cylindrical surface. 2004.
- [2] HECHT, Eugene. **Óptica**. Tradução de José Manuel N. V. Rebordão. 2ª ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2002. 73 p. Título original: Óptics.
- [3] HECHT, Eugene. **Óptica**. Tradução de José Manuel N. V. Rebordão. 2ª ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2002. 435-440. Título original: Óptics.
- [4] GASVIK, K.J. **Optical Metrology**. 2ª ed., John Wile & Sons, 1995. 28-41.
- [5] ALBERTAZZI, Armando. Notas de Aula da Pós-MCI. Óptica.
- [6] DE GROOT, Peter; DECK, Leslie. **Three-dimensional imaging by sub-Nyquist sampling of white-light interferograms**. Optics Letters. 1993.
- [7] DE GROOT, Peter; DECK, Leslie. **Surface profiling by frequency-domain analysis of white light interferograms**. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers. 1994.
- [8] Encyclopedia of Laser Physics and Technology. **White light interferometers**. Disponível em <[http://www.rp-photonics.com/white\\_light\\_interferometers.html](http://www.rp-photonics.com/white_light_interferometers.html)> Acesso em: 28 set, 2007.
- [9] WANG, D.N et al. **Three-Wavelength Combination Source for White-Light Interferometry**. IEEE Photonics Technology Letters Vol. 5, NO. 11. Nov 1993.
- [10] LIN, C.; SULLIVAN, R. F. **An Application of White Light Interferometry in Thin Film Measurements**. IBM Journal of Research and Development. 1972. Disponível em: <<http://domino.watson.ibm.com/tchjr/journalindex.nsf/600cc5649e2871db852568150060213c/33dd9da4ac724e2885256bfa00684154?OpenDocument>>. Acesso em: 28 set, 2007.
- [11] BREITMEIER. **Technical Data of The White Light Interferometer**. Disponível em: <<http://www.breitmeier.com/produkte/wli/techdat.htm>>. Acesso em: 29 set, 2007.
- [12] POLYTEC. **White Light Interferometers**. Disponível em: <[http://www.polytec.com/usa/158\\_5082.asp](http://www.polytec.com/usa/158_5082.asp)> . Acesso em: 29 set, 2007.



- [13] Corning Tropel, Disponível em: Tropel **ThetaForm**. <[http://www.corning.com/docs/specialtymaterials/pisheets/ThetaForm\\_Sell\\_Sheet.pdf](http://www.corning.com/docs/specialtymaterials/pisheets/ThetaForm_Sell_Sheet.pdf)>. Acesso em: 29 set, 2007.
- [14] ROTHE-NEVES, M.; **Técnica Opto-Eletrônica de Medição de Geometria 3D com Interferometria de Luz Não-Coerente**. 2001.
- [15] DAL PONT, Alex. **Desenvolvimento de um Interferômetro de Luz Incoerente para Medição de Formas de Cilindros**. 2004.
- [16] Siemens. **SFH 426 Data Sheet**. Disponível em: <[http://www.tranzistoare.ro/dtasheets/70/486555\\_DS.pdf](http://www.tranzistoare.ro/dtasheets/70/486555_DS.pdf)>. Acesso em: 03 out, 2007.
- [17] SADOULET, Samuel; JEFF, Harvey. Edmund Optics. **Using Telecentric Lenses**. Disponível em: <<http://www.edmundoptics.com/techSupport/DisplayArticle.cfm?articleid=239>>.
- [18] FLEISCHER, Mattias et al. **Theoretical Limits os Scannig White-Light Interferometry Signal evaluation Algorithms**. Optical Society of America. 2001.
- [19] Newport. **New Step Single-Axis Low-Power Motion Controller/Driver System**. Disponível em: <<http://www.newport.com/store/product.aspx?id=403190&lang1033#>>. Acesso em: 13 out, 2007.
- [20] Wikipédia. **SQL**. Disponível em <<http://pt.wikipedia.org/wiki/SQL>>. Acesso em: 16 out, 2007.
- [21] Página oficial do SQL. **Tutorial SQL**. Disponível em <<http://www.sql.org>>. Acesso em 16 out, 2007.
- [22] PRESS, Willian H. et al. Numerical Recipies in C: The Art of Scientific Computing. 2<sup>a</sup> ed., Cambridge University Press. 2002. 394-455.
- [23] GONZALES, Rafael; WOODS, Richard. Processamento de Imagens Digitais. 2001.
- [24] FLEISCHER, Mattias et al. Fast Algorithms for Data Reduction in Modern Optical Three-Dimensional Profile Measurement Systems with MMX Technology. Optical Society of America. 2000.

## Anexos

### Anexo A – Histogramas da Subtração de Nuvens de Pontos

#### A.1 Histograma da Diferença entre Nuvem Alinhada e Pouco Desalinhada.

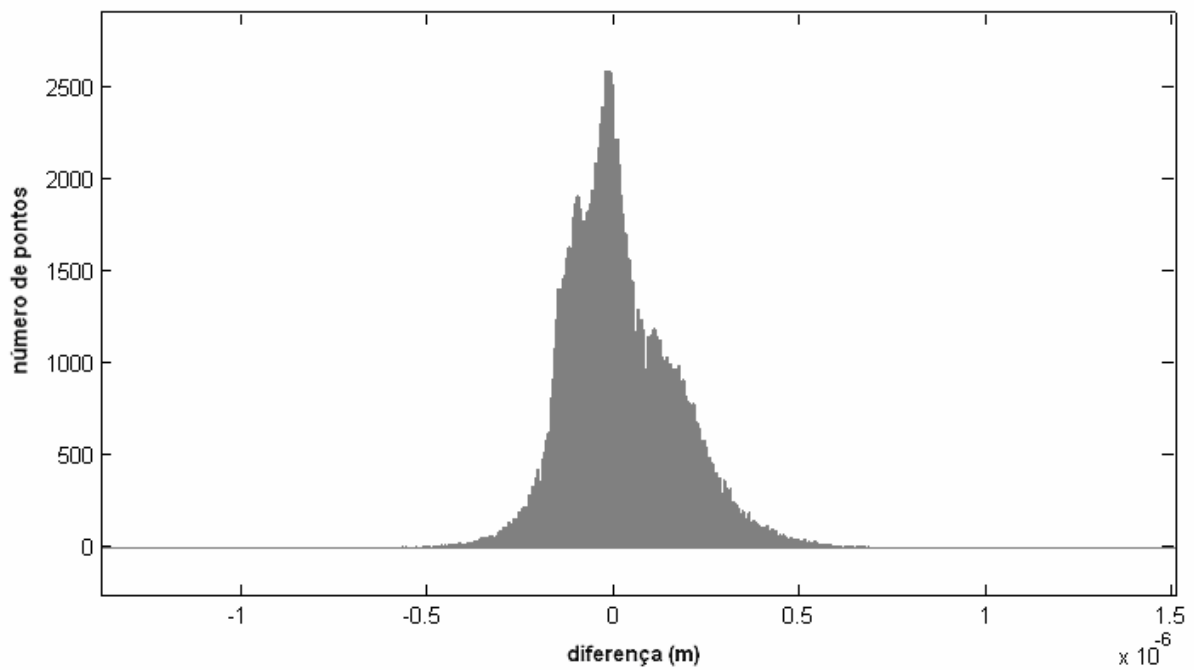


Figura 61 Diferença entre os pontos de uma nuvem alinhada ( $\emptyset X$  e  $\emptyset Y = 0$  mm) e uma nuvem pouco desalinhada ( $\emptyset X$  e  $\emptyset Y = 0,05$  mm).

## A.2 Histograma da Diferença entre Nuvem Alinhada e Muito Desalinhada.

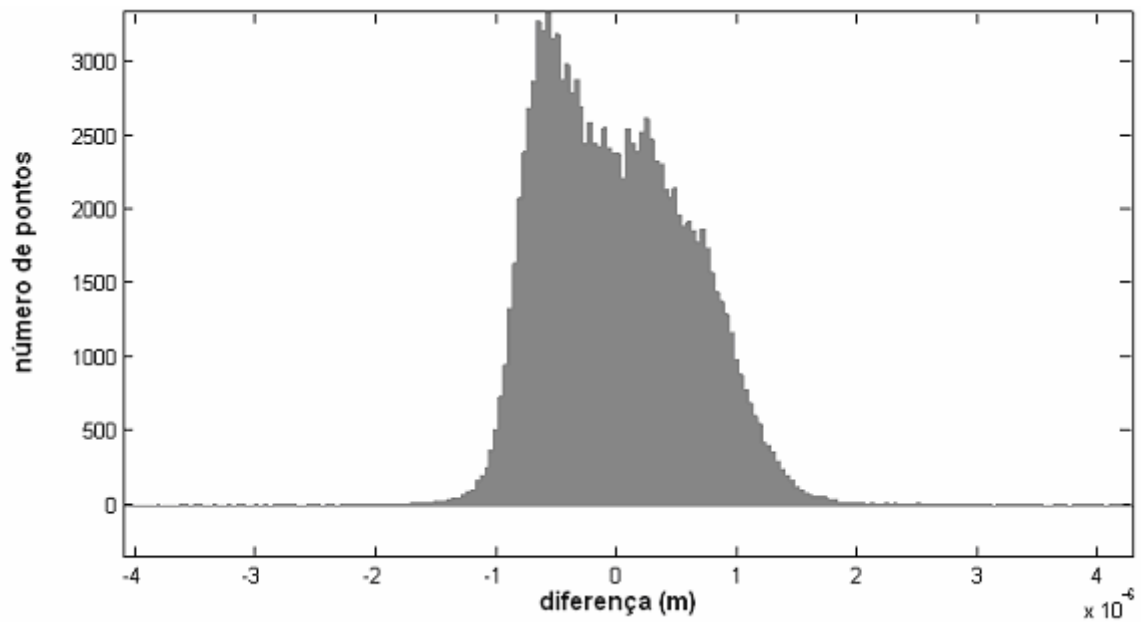


Figura 62 Diferença entre os pontos de uma nuvem alinhada ( $\emptyset X$  e  $\emptyset Y = 0$  mm) e uma nuvem muito desalinhada ( $\emptyset X$  e  $\emptyset Y = 0,1$  mm).

## A.2 Histograma da Diferença entre Nuvem Desalinhada e Muito Desalinhada.

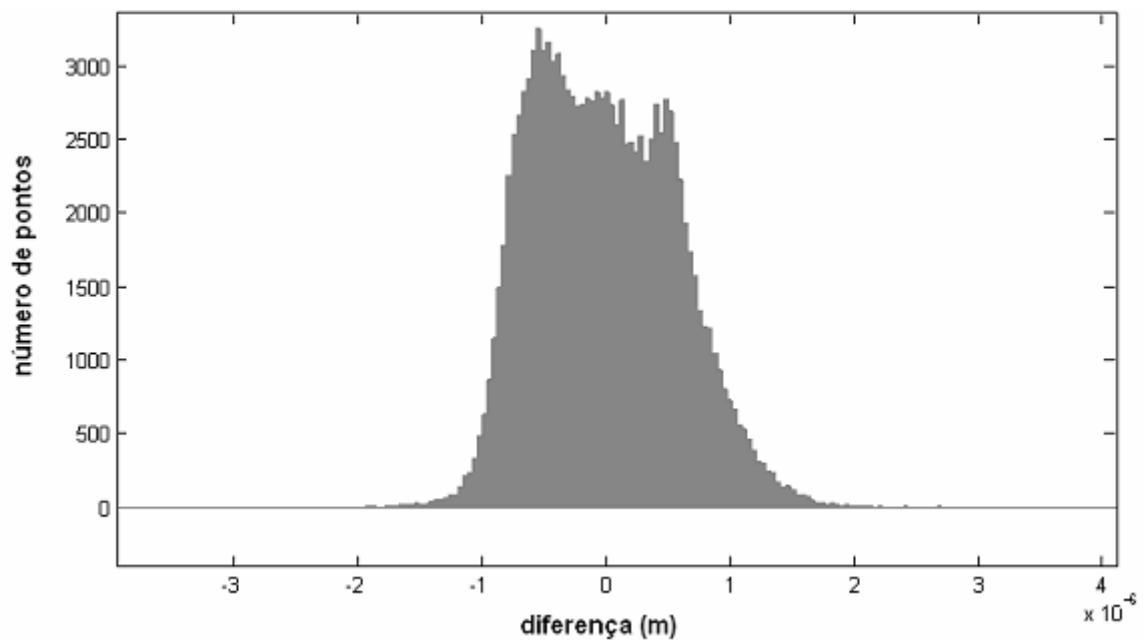


Figura 63 Diferença entre os pontos de uma nuvem pouco desalinhada ( $\emptyset X$  e  $\emptyset Y = 0,05$  mm) e uma nuvem muito desalinhada ( $\emptyset X$  e  $\emptyset Y = 0,1$  mm).

## Anexo B – Avaliação

### B.1 Resultados de Avaliação

#### B.1.1 Avaliação do Módulo de Seleção de Peças

Tabela 13 Avaliação do módulo 1

Critério	Nota	Justificativa
Influência no Processo de Medição	7	Este processo irá determinar o ponto de partida da faixa de busca para os módulos 5 e 8 (alinhamento fino e determinação das faixas de medição)
Resultado Médio Atingido	10	O risco de ocorrência de erros é baixo. Irá depender basicamente do usuário no momento da escolha do tipo de peça a ser medida.
Tempo e Operação	10	O tempo levado pra executar as tarefas deste módulo é de no mínimo 3 s.

Tabela 14 Avaliação do processo manual equivalente ao módulo 1

Critério	Nota	Justificativa
Influência no Processo de Medição	7	Este processo irá determinar o ponto de partida da faixa de busca para os módulos 5 e 8 (alinhamento fino e determinação das faixas de medição)
Resultado Médio Atingido	1	A ausência de um procedimento para determinar o raio nominal da peça cilíndrica a ser medida irá dificultar a busca por franjas.
Tempo e Operação	0	Como não existe tal processo no protótipo do sistema, não se aplica nota.

### B.1.2 Avaliação do Módulo de Inserção de Peças

**Tabela 15 Avaliação do módulo 2**

Critério	Nota	Justificativa
Influência no Processo de Medição	4	O resultado desse processo não influenciará diretamente o processo de alinhamento grosseiro. Entretanto, caso não executado, a chance de colisão da peça com o espelho cônico aumenta.
Resultado Médio Atingido	8	A centralização do sistema de alinhamento evita que a peça seja posicionada muito próxima ao espelho cônico.
Tempo e Operação	6	O tempo levado para o usuário inserir a peça e alinhar o sistema de suporte é de no mínimo 8 s. A operação de inserção é manual. A centralização do suporte é automática.

**Tabela 16 Avaliação do processo manual equivalente ao módulo 2**

Critério	Nota	Justificativa
Influência no Processo de Medição	4	O resultado desse processo não influenciará diretamente o processo de alinhamento grosseiro. Caso não executado poderá causar danos no espelho cônico, com uma probabilidade baixa.
Resultado Médio Atingido	5	O processo resulta em uma peça mal posicionada. Não há centralização do suporte.
Tempo e Operação	5	A de inserção e centralização da peça é manual e leva no mínimo 15 s

### B.1.3 Avaliação do Módulo de Ajuste de Iluminação para o Alinhamento Grosseiro

**Tabela 17 Avaliação do módulo 3**

Critério	Nota	Justificativa
Influência no Processo de Medição	6	O resultado desse processo influenciará diretamente o processo de alinhamento grosseiro. Caso a peça esteja inadequadamente iluminada, o alinhamento grosseiro pode não encontrar um bom resultado, com uma probabilidade alta.
Resultado Médio Atingido	8	O processo de iluminação automática resultou em 100% das vezes um ajuste como o esperado. Algumas vezes ainda resultam alguns pontos saturados, mas não influenciam negativamente o alinhamento grosseiro.
Tempo e Operação	4	O tempo levado pelo usuário selecionar a área de análise e do algoritmo de ajuste automático de iluminação é no mínimo 20 s.

**Tabela 18 Avaliação do processo manual equivalente ao módulo 3**

Critério	Nota	Justificativa
Influência no Processo de Medição	6	O resultado desse processo influenciará diretamente o processo de alinhamento grosseiro. Caso a peça esteja inadequadamente iluminada, o alinhamento grosseiro pode não encontrar um bom resultado, com uma probabilidade alta.
Resultado Médio Atingido	6	O processo de ajuste manual baseia na experiência do usuário que nem sempre pode ser confiável.
Tempo e Operação	5	O tempo levado pelo usuário selecionar a área de análise e ajustar manualmente a iluminação. Mínimo 15 s.

### B.1.4 Avaliação do Módulo de Alinhamento Grosseiro

**Tabela 19 Avaliação do módulo 4**

Critério	Nota	Justificativa
Influência no Processo de Medição	7	O resultado desse processo influenciará diretamente o processo de alinhamento fino.
Resultado Médio Atingido	9	O processo de alinhamento grosseiro automática resultou em 100% das vezes uma imagem homogênea como o esperado (considerando a execução correta de todos os passos anteriores).
Tempo e Operação	7	O tempo levado pelo algoritmo para alinhar a peça. Entre $(144 \pm 25)$ s. O processo é totalmente automático.

**Tabela 20 Avaliação do processo manual equivalente ao módulo 4**

Critério	Nota	Justificativa
Influência no Processo de Medição	7	O resultado desse processo influenciará diretamente o processo de alinhamento fino.
Resultado Médio Atingido	9	O processo de alinhamento grosseiro manual resulta em 100% das vezes uma imagem homogênea como o esperado (considerando a execução correta de todos os passos anteriores).
Tempo e Operação	7	O tempo levado pelo algoritmo para alinhar a peça. Entre $(85 \pm 36)$ s. O processo é totalmente manual e portanto cansativo.

### B.1.5 Avaliação do Módulo de Alinhamento Fino

**Tabela 21 Avaliação do módulo 5**

Critério	Nota	Justificativa
Influência no Processo de Medição	10	O resultado desse processo influenciará diretamente o processo de medição.
Resultado Médio Atingido	9	O risco envolvido é grande, mas os resultados são satisfatórios na maioria das vezes. Os alinhamentos realizados pelo algoritmo resultam em faixas de medição pouco maiores do que as obtidas manualmente por um operador experiente.
Tempo e Operação	8	O tempo levado pelo algoritmo para alinhar a peça. Entre $(142 \pm 26)$ s. O processo é totalmente automático.

**Tabela 22 Avaliação do processo manual equivalente ao módulo 5**

Critério	Nota	Justificativa
Influência no Processo de Medição	10	O resultado desse processo influenciará diretamente o processo de medição.
Resultado Médio Atingido	7	Os alinhamentos realizados pelo usuário resultam em faixas de medição justas, evitando perda de tempo durante a varredura de medição. Dependerá muito da habilidade do operador.
Tempo e Operação	2	O tempo levado pelo usuário para alinhar a peça. Entre $(1020 \pm 203)$ s. O processo é totalmente manual. Muito lento e penoso para o usuário.



### B.1.6 Avaliação do Módulo de Seleção da Superfície de Medição

**Tabela 23** Avaliação do módulo 6

Critério	Nota	Justificativa
Influência no Processo de Medição	3	O resultado desse processo influenciará diretamente o processo de medição.
Resultado Médio Atingido	10	O resultado será a área medida pelo sistema. Não envolve riscos grandes.
Tempo e Operação	10	O tempo levado pelo usuário para selecionar a área de medição. Média de 10 s. O processo é totalmente manual. A imagem é plana, o que facilita a definição da área.

**Tabela 24** Avaliação do processo manual equivalente ao módulo 6

Critério	Nota	Justificativa
Influência no Processo de Medição	3	O resultado desse processo influenciará diretamente o processo de medição.
Resultado Médio Atingido	10	O resultado será a área medida pelo sistema. Não envolve riscos grandes.
Tempo e Operação	9	O tempo levado pelo usuário para selecionar a área de medição. Média de 10 s. O processo é totalmente manual.

### B.1.7 Avaliação do Módulo de Ajuste de Iluminação com Dois Níveis

**Tabela 25** Avaliação do módulo 7

Critério	Nota	Justificativa
Influência no Processo de Medição	9	O resultado desse processo influenciará diretamente o processo de medição, otimizando o número de pontos medidos.
Resultado Médio Atingido	8	O resultado do ajuste possibilita a medição de 100% dos pontos para a maioria das peças, salvo peças muito desgastadas.
Tempo e Operação	8	O tempo levado pelo algoritmo em realizar os ajustes. Entre 15 e 60 s. O processo é semi-automático, pois a decisão sobre o tipo de iluminação a ser utilizado é do usuário.

Tabela 26 Avaliação do processo manual equivalente ao módulo 7

Critério	Nota	Justificativa
Influência no Processo de Medição	9	O resultado desse processo influenciará diretamente o processo de medição, otimizando o número de pontos medidos.
Resultado Médio Atingido	9	Muitas vezes a iluminação com apenas um nível não é adequada e muitos <i>pixels</i> não são medidos.
Tempo e Operação	7	Ajuste totalmente manual. Apenas o tempo de exposição da câmera era alterado. Resultados piores se comparado ao módulo automático.

### B.1.8 Avaliação do Módulo de Determinação de Faixas de Medição

Tabela 27 Avaliação do módulo 8

Critério	Nota	Justificativa
Influência no Processo de Medição	9	O resultado desse processo influenciará diretamente o processo de medição, definindo a faixa radial de varredura.
Resultado Médio Atingido	9	O algoritmo define corretamente as faixas de medição. É dada uma margem de segurança de $\pm 0,0006$ mm à faixa de varredura encontrada pelo módulo automatizado.
Tempo e Operação	7	O tempo levado pelo algoritmo automático varia entre 30 e 40 s.

Tabela 28 Avaliação do processo manual equivalente ao módulo 8

Critério	Nota	Justificativa
Influência no Processo de Medição	9	O resultado desse processo influenciará diretamente o processo de medição, definindo a faixa radial de varredura.
Resultado Médio Atingido	10	Manualmente é possível definir de maneira otimizada a faixa de varredura.
Tempo e Operação	8	Manualmente se leva entre 25 e 35 s.