

Universidade Federal de Santa Catarina
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

**Otimização de um Medidor Portátil
de
Tensões Residuais**

Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina
para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Maikon Ronsani Borges

Florianópolis
Santa Catarina – Brasil
Março de 2000

OTIMIZAÇÃO DE UM MEDIDOR PORTÁTIL DE TENSÕES RESIDUAIS

MAIKON RONSANI BORGES

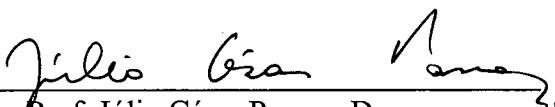
Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de

“MESTRE EM ENGENHARIA”

Especialidade ENGENHARIA MECÂNICA – Área de Concentração
METROLOGIA E INSTRUMENTAÇÃO e aprovada em sua forma final pelo
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

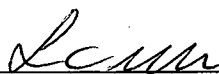


Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr. Eng.
ORIENTADOR

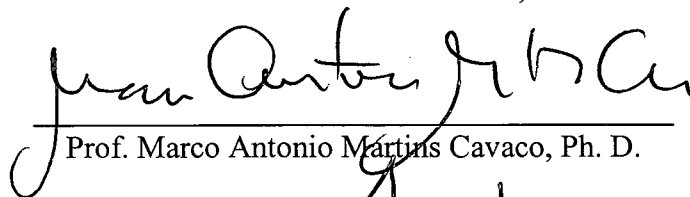


Prof. Júlio César Passos, Dr.
COORDENADOR DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

BANCA EXAMINADORA



Luís Cláudio de Marco Meniconi, Ph. D.



Prof. Marco Antonio Martins Cavaco, Ph. D.



Prof. Nelson Back, Ph. D.

À Dona Rosa e Seu Manoel

À Carla

Pela presença, apoio e incentivo
sempre presentes

AGRADECIMENTOS

- Aos meus pais, Rosa e Manoel, pela energia, dedicação e atenção a mim dispensados desde a infância até os dias de hoje e também pelos sacrifícios realizados para que eu tivesse acesso à melhor educação possível;
- Ao meu irmão Altamir, minha irmã Claudia e minha tia Iza, que sempre me deram o apoio necessário à consumação de meus objetivos;
- À amiga Carla Raimundo, que se mostrou grande companheira de jornada e com quem muito aprendi e cresci como ser humano;
- Ao Professor Armando, pela infinita paciência e dedicação com que orientou o trabalho, sempre olhando as coisas do ponto de vista positivo e fazendo com que sua perseverança me guiasse nos momentos de desânimo e angústia;
- À Rosana Magali Vieira, secretária do Labmetro, pessoa de grande sensibilidade e competência profissional, pela disponibilidade, boa-vontade e prestatividade sempre marcantes;
- Ao Dionísio, profissional altamente competente, pelo tempo e paciência disponibilizados durante todas as etapas do trabalho, desde a revisão dos desenhos até a fabricação e montagem do sistema;
- Ao colega engenheiro Michael Zürn, que, mesmo estando a milhares de quilômetros, prestou grande auxílio no desenvolvimento do trabalho;
- À Banca Examinadora, composta pelo Professor Nelson Back, Professor Marco Antonio Martins Cavaco e Eng. Luiz Cláudio de Marco Meniconi, pelas contribuições muito úteis ao trabalho;
- Aos amigos Eduardo Kubo, Alexandre, Marcos e Gilva, que sempre tiveram uma palavra de ânimo e alegria para trocar comigo nos bons e maus momentos, tornando mais agradável minha vida;
- À amiga Hirna Terezinha Martendal, pelo tempo, apoio e compreensão dispensados durante o período de montagem e testes do medidor, assim como no período de ensaios para a apresentação da dissertação;

- Às amigas Lui, Têre, Mari e Lisa, pelas horas disponibilizadas nos ensaios da apresentação e pela amizade durante o período em que desenvolvi o trabalho;
- Ao Frank, pela disponibilidade, paciência e companheirismo ao longo das horas mais difíceis desse trabalho;
- Aos engenheiros Ledo Vendruscollo e Daniel Pedro Willemann, pela suas atuações tão dinâmicas e competentes durante o decorrer dos trabalhos;
- Aos então estudantes de graduação, Fernanda Assuiti e Jean Pierre Piva, pelo companheirismo, dedicação e competência mostrados durante a execução das mais diversas tarefas;
- Ao Professor Gustavo Donatelli, pelas voluntárias e inestimáveis contribuições dadas ao projeto do sistema de medição MTRES;
- Ao Danilo (Dadá), pela paciência, amizade e por todos os conhecimentos adquiridos no decorrer destes seis anos em que trabalhei em sua companhia, no Laboratório de Holografia Eletrônica do Labmetro.
- Aos engenheiros Marcos Lichtblau, Walter Antônio Kapp, Antônio Carlos Zimmermann, André Roberto de Souza e Cesar Kanda e aos professores Carlos Alberto Flesch e Edson Bazzo que, com grande boa-vontade, deram várias contribuições relevantes ao trabalho;
- Ao colega engenheiro Celso Luiz Nickel Veiga, homem de grande paciência e conhecimento, que foi companheiro de laboratório e de discussões sempre muito produtivas sobre o trabalho desenvolvido;
- Aos colegas de mestrado, Flávia Castelo Cordovil, Luiz Augusto Rodrigues Neroski, Vicente Machado Neto e Alexandre Moraes Barp, pelas valiosas contribuições recebidas;
- Aos então estudantes de graduação, Alex Dal Pont e Joel Devigili, pela ajuda e companheirismo;

- Ao povo brasileiro, que, com seu trabalho, permitiu à FINEP e ao PADCT financiar o projeto no qual este trabalho se insere;
- Às empresas Petrobrás S.A, Embraco S.A e Lactec/COPEL, pelo apoio financeiro e logístico recebido;
- A todos os colaboradores da Fundação CERTI e do Labmetro, pela amizade e apoio no trabalho;
- À UFSC e ao Labmetro, pela disponibilização de sua infra-estrutura;
- A todas as demais pessoas que estiveram ao meu redor nesse período, que minha memória esquece, mas que meu coração lembra com carinho.

SUMÁRIO

Relação de símbolos e variáveis utilizadas.....	ix
Resumo.....	xi
Abstract.....	xii
Capítulo 1 - Introdução.....	1
Capítulo 2 – Tensões Residuais.....	4
2.1 Definição.....	4
2.2 Origem.....	5
2.3 Medição de Tensões Residuais.....	5
2.3.1 Métodos Não Destrutivos.....	5
2.3.1.1 Difração de Raios-x.....	5
2.3.1.2 Difração de Raios de Nêutrons.....	8
2.3.1.3 Efeito Barkhausen.....	8
2.3.1.4 Ultra-Som.....	9
2.3.2 Métodos Destrutivos.....	10
2.3.2.1 Propagação de Trinca.....	10
2.3.2.2 Seccionamento.....	10
2.3.2.3 Remoção de Camadas.....	10
2.3.3 Métodos Semi-destrutivos.....	11
2.3.3.1 Fundamentos do Método do Furo.....	13
2.3.3.2 Furo Passante.....	14
2.3.3.3 Furo Cego.....	15

2.3.4 Tensões Residuais Variáveis.....	16
Capítulo 3 – Medição de Deslocamentos com Holografia Eletrônica.....	17
3.1 Holografia Eletrônica.....	17
3.1.1 Princípios.....	17
3.1.2 Iluminação.....	18
3.1.3 Deslocamento de Fase.....	21
3.1.4 Remoção de Salto de Fase.....	22
3.2 Medição de Tensões Residuais com Holografia Eletrônica.....	22
Capítulo 4 – O Medidor Portátil de Tensões Residuais – MTRES.....	25
4.1 Metodologia de Projeto.....	25
4.2 Requisitos a atender.....	26
4.3 Concepção e Implementação das Soluções.....	27
4.3.1 Iluminação.....	27
4.3.2 Fixação e Ajuste.....	30
4.3.3 Visualização das Imagens.....	34
4.3.4 Deslocamento de Fase.....	36
4.3.5 Furação.....	37
4.3.6 Medição do diâmetro do furo.....	41
4.4 Operacionalização.....	46
4.4.1 Alinhamento dos Espelhos Cônicos.....	46
4.4.2 Colagem do Espelho Furado.....	47
4.4.3 Alinhamento dos Componentes Ópticos.....	47
4.4.4 Alinhamento do Conjunto de Furação.....	47
4.4.5 Remoção do Cavaco.....	48

4.4 Algoritmo para Quantificação de Tensões Residuais.....	49
Capítulo 5 – Avaliação do Medidor de Tensões Residuais e do Medidor de Diâmetros de Furos.....	53
5.1 Medidor de Tensões Residuais.....	53
5.1.1 Medições em Laboratório.....	53
5.1.1.1 Procedimento de Ensaio.....	55
5.1.1.2 Resultados Obtidos.....	58
5.1.2 Ensaios em Campo.....	64
5.1.2.1 Procedimento de Ensaio.....	64
5.1.2.2 Resultados Obtidos.....	65
5.2 Avaliação Operacional do Medidor.....	69
5.3 Medidor do Diâmetro do Furo.....	73
Capítulo 6 – Conclusões.....	77
Capítulo 7 – Referências Bibliográficas.....	81
Anexo A – Descrição Geral da Eletrônica do MTRES.....	86
Anexo B – Especificações do MTRES.....	99
Anexo C – Relação de Equipamentos e Fornecedores.....	110

Relação dos Principais Símbolos e Variáveis Utilizados

Símbolo	Significado	Unidade
λ	Comprimento de onda do raio-x	[μm]
ψ	Ângulo dado pela normal à superfície e o plano formados pelos feixes incidente e difratado	[$^{\circ}$]
ϕ	Ângulo de posicionamento do difratômetro no plano da superfície da peça	[$^{\circ}$]
ν	Coefficiente de Poisson do material	-
E	Módulo de elasticidade	[MPa]
σ_{ϕ}	Tensão no plano na direção de ϕ	[MPa]
$\sigma_{1,2}$	Tensões principais no plano	[MPa]
r	Raio normalizado	-
R_0	Raio do furo	[mm]
R	Raio arbitrário a partir do centro do furo realizado (coordenada polar)	[mm]
β	Ângulo entre a direção principal de σ_1 e o eixo de referência	[rad]
θ	Ângulo entre uma direção qualquer e o eixo de referência	[$^{\circ}$]
\bar{A}	Coefficiente de correção	-
\bar{B}	Coefficiente de correção	-
δ_1	Defasagem	[rad]
δ_2	Defasagem	[rad]
$\Delta\phi$	Varição de fase	[rad]
I_n	Intensidade do padrão de speckle para cada passo	[nível de cinza]
f	Comprimento focal	[mm]
n_i	Índice de refração do vidro	-
R1	Raio de curvatura da primeira superfície da lente	[mm]

R2	Raio de curvatura da segunda superfície da lente	[mm]
Re	Repetitividade	[mm]
t	Coefficiente t de Student	-
s	Desvio padrão experimental	[mm]
$\phi_{\text{médio}}$	Diâmetro médio dos furos	[mm]

RESUMO

A quantificação de tensões residuais é um problema complexo, cuja importância vem crescendo cada vez mais na indústria metal-mecânica mundial.

Diversos métodos vêm sendo utilizados na determinação de tensões residuais. A Extensometria, aliada ao Método do Furo, ainda é a técnica mais empregada atualmente. Entretanto, acredita-se que, num futuro breve, este método possa ser superado por técnicas ópticas de medição de tensões residuais.

Este trabalho apresenta uma contribuição nessa direção. O protótipo de um novo sistema de medição, cujo princípio combina a Holografia Eletrônica com o Método do Furo, é concebido, construído e avaliado. Tal sistema foi projetado com o objetivo de tornar possível e prática a medição de tensões residuais com Holografia Eletrônica em campo.

Combinando robustez e praticidade, o medidor apresenta elevado grau de automação e miniaturização, o que viabiliza sua utilização na medição de peças de geometrias diversas, tanto em laboratório quanto em ambientes industriais.

Os detalhes construtivos dos dois módulos constituintes do sistema são descritos. A análise dos resultados de medição obtidos e também a avaliação operacional do sistema são efetuadas, e são apontadas sugestões para futuras melhorias no sistema.

Palavras-chave: [Holografia Eletrônica], [ESPI], [Análise Experimental de Tensões], [Óptica], [Projeto de Sistemas de Medição], [Mecânica de Precisão], [Ensaio semi-destrutivo]

ABSTRACT

Residual stress determination is a complex problem with an increasing importance to all industries worldwide.

Nowadays several methods are being used to evaluate residual stresses. The Strain Gage Method combined with the Hole-drilling Technique is still the most used technique for measuring residual stresses, despite of some operational problems. However, there is a strong possibility that in the future this method will be overcome by optical techniques.

This work presents one contribution in this direction. The prototype of a new measurement system, whose principle combines Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI) and the Hole-drilling Method is conceived, built and evaluated. Such a system was designed to make possible and practical the measurement of residual stresses with ESPI in the field.

Combining stiffness and flexibility the system shows a high level of automation and miniaturization, making possible to use it to measure parts from several geometries, in the laboratory as well as in industrial environments.

The steps for construction of the system are shown.

The analysis of results from different measurements and a comprehensive operational evaluation of the system are performed. Some suggestions for future improvements on the system are also given.

Capítulo 01

Introdução

Atualmente, o interesse a respeito de como tensões residuais interferem nas propriedades mecânicas e na estrutura dos materiais é crescente. Tensões residuais constituem um fator importante não somente no que diz respeito a falhas de componentes mecânicos, mas também em relação à melhoria do desempenho dos materiais em condições de trabalho, sendo frequentemente levadas em conta em projetos das indústrias automotiva, aeroespacial e nuclear. Os efeitos provenientes da existência de tais tensões podem ser positivos ou negativos, dependendo da configuração em que se apresentam.

A medição de tensões residuais tem sido objeto de estudo desde décadas atrás, tanto no meio industrial quanto no científico. Sua determinação com exatidão é de elevada importância no projeto e otimização de componentes críticos ou de responsabilidade, assim como na inspeção de estruturas e peças sujeitas à ação de tensões residuais e de seus efeitos.

Os métodos de quantificação de tensões residuais hoje disponíveis não asseguram baixa incerteza de medição, além de, em sua maioria, não serem adequados para medições em campo, exceção feita ao método do furo combinado com extensometria, que, mesmo envolvendo tempos de execução relativamente elevados, permite a realização de ensaios fora do ambiente de laboratório.

Diante desse cenário, o desenvolvimento de um caminho mais rápido e eficiente para a quantificação de campos de tensão residual torna-se uma proposta muito atraente. Nesse sentido, o primeiro protótipo de um medidor portátil de tensões residuais (Mater) foi desenvolvido em conjunto com algumas empresas interessadas, com o apoio financeiro do

PADCT (Programa de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico) do CNPq. Terminados os trabalhos, o protótipo final mostrou desempenho global aceitável, apresentando algumas limitações de ordem construtiva, como por exemplo, a necessidade de utilização de uma fibra óptica para a transmissão da luz do laser, pouca flexibilidade do sistema de fixação e uso restrito em ambiente de laboratório.

Objetivando otimizar este protótipo, uma segunda fase deste projeto foi iniciada, contando novamente com o apoio do PADCT e de quatro empresas: Petrobrás/CENPES, Usiminas, Embraco e Copel. O resultado dessa etapa de trabalhos foi o sistema MTRES, a segunda versão do medidor portátil de tensões residuais, que apresenta melhorias em diversos aspectos construtivos, como iluminação, fixação, avanço motorizado da turbina pneumática, ajuste da altura e medição do diâmetro do furo cego realizado.

Esta dissertação apresenta todas as fases do trabalho de reprojeto e otimização do medidor, dando ênfase à parte de projeto mecânico e funcionalidade do mesmo, apesar de atividades na área de eletrônica e software terem sido desenvolvidas pelo autor.

O trabalho se inicia com um pequeno embasamento teórico sobre tensões residuais e holografia eletrônica, cujos principais elementos são apresentados nos capítulos 2 e 3. Diversos métodos de medição de tensões residuais foram sumariamente apresentados, tendo suas vantagens e desvantagens delineadas. O conceito do método do furo e sua formulação matemática foram destacados, assim como o princípio básico utilizado nas medições com holografia eletrônica com um interferômetro radial.

No quarto capítulo, a metodologia de projeto adotada é descrita brevemente. As soluções implementadas nos diversos subsistemas foram detalhadas com profundidade. As atividades relacionadas ao alinhamento dos componentes ópticos empregados foram brevemente salientadas, por se tratarem de procedimentos secundários a serem seguidos durante a montagem do medidor.

No capítulo cinco, os resultados das medições em campo e em laboratório realizadas com o MTRES são apresentados, bem como sua análise. Resultados de medições efetuadas com o Mede-Furo e a sua devida análise estatística são também destacados. A avaliação operacional dos dois módulos constituintes do sistema é realizada.

As conclusões finais sobre o trabalho, comparando os objetivos iniciais e os resultados alcançados, além de sugestões para o aperfeiçoamento do medidor, são mostradas no sexto capítulo.

Por fim, as referências bibliográficas citadas ao longo do texto são apresentadas, assim como os anexos que visam, principalmente, a documentação de detalhes específicos do projeto.

Capítulo 02

Tensões Residuais

2.1 Definição

Tensões residuais são tensões internas existentes em corpos que, na ausência de quaisquer carregamentos externos, estão em repouso, em estado de equilíbrio e em condições uniformes de temperatura [1].

Em geral, pode-se distinguir três tipos principais de tensões residuais, de acordo com a extensão analisada: tensões macroscópicas, que se estendem por vários grãos do material; tensões microscópicas, que cobrem a área de um grão ou parte de um grão; e por fim, submicroscópicas, que cobrem áreas subatômicas dentro do grão.

Tensões residuais podem ser muito perigosas, pois combinam-se às tensões provocadas pelo carregamento, levando o componente ao colapso por carregamento estático ou mesmo por fadiga, além de poderem acelerar processos de corrosão sob tensão. Entretanto, tensões residuais podem ser de grande utilidade quando introduzidas intencionalmente e de forma controlada no material, gerando um estado compressivo de tensões. Essa situação colabora para a elevação da vida útil do componente, quando as tensões residuais introduzidas se contrapõem às tensões de trabalho, diminuindo o esforço resultante no material. Em situações de corrosão sob tensão, a introdução de campos de tensões residuais compressivos pode elevar a vida de peças em cerca de 1000 vezes em relação às peças não tratadas.

2.2 Origem

Tensões residuais podem ser originadas por diversos processos de fabricação: estampagem, laminação, embutimento, extrusão, dobramento, forjamento e granalhamento. A usinagem convencional, o recobrimento, a soldagem, a brasagem e a deposição química de vapor, assim como processos superficiais térmicos, também são fontes originárias de tensões residuais em componentes mecânicos [2]. Operações de manutenção podem originar tensões residuais. Como exemplo, pode-se citar o processo de manutenção de pás turbinas hidráulicas submetidas à cavitação. O material depositado com o objetivo de reconstruir a área afetada pelo fenômeno cria uma nova configuração de tensões locais, favorecendo a ocorrência de novos campos de tensões residuais. Da mesma forma, a montagem de peças individuais em sistemas de maior porte, assim como a existência de eventuais sobrecargas ou deformações plásticas na estrutura, também podem originar campos de tensões residuais.

2.3 Medição de Tensões Residuais

Nas últimas décadas, várias técnicas quantitativas e qualitativas para a determinação de tensões residuais têm sido aperfeiçoadas. Tais métodos de medição podem ser divididos em três classes distintas: métodos não destrutivos, destrutivos e semi-destrutivos.

2.3.1 Métodos Não Destrutivos

2.3.1.1 Difração de Raios-X

Baseia-se na medição do espaçamento interplanar da rede cristalina dos materiais, usando feixes estreitos e colimados de raios-x. A grandeza é indiretamente medida através da posição angular da linha de difração (figura 2.1).

O método utiliza-se da Lei de Bragg: [1]

$$n\lambda = 2d\sin(\theta) \quad (2.1)$$

onde:

λ = comprimento de onda do raio-x

d = distância entre planos da rede cristalina

θ = ângulo das linhas de difração

n = número inteiro

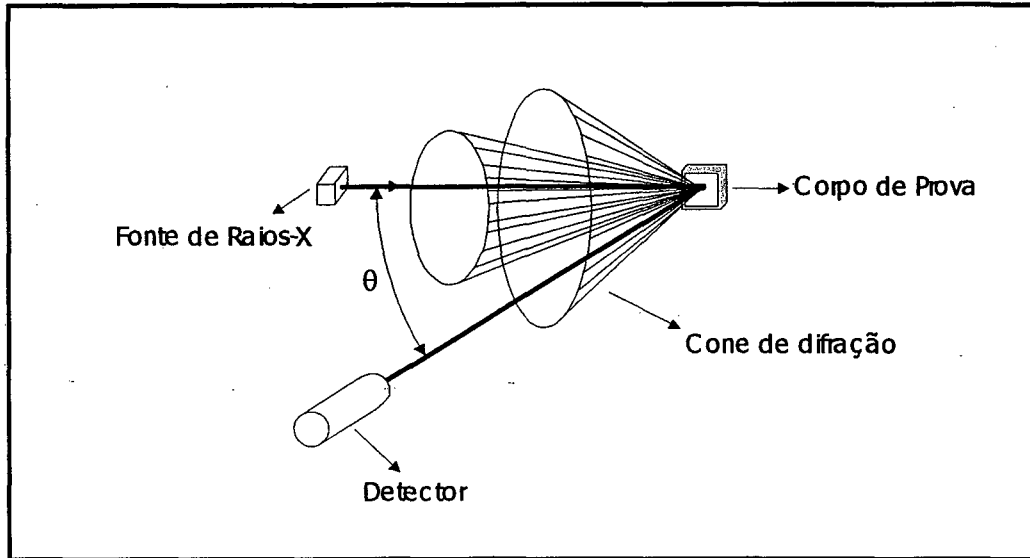


Figura 2.1 – Método de Difração de Raios-X

Tendo-se conhecimento do ângulo da linha de difração para uma peça livre de tensões residuais, pode-se calcular o valor das tensões residuais presentes em uma região qualquer de um mesmo material. O valor da deformação da rede cristalina, em função da variação das distâncias interplanares, pode ser calculado através da equação [1]:

$$\varepsilon_{\phi,\psi} = \frac{(d_{\phi,\psi} - d_o)}{d_o} = \frac{(\theta_{\phi,\psi} - \theta_o)}{\tan(\theta)} \quad (2.2)$$

onde:

$\varepsilon_{\phi,\psi}$ = deformação específica;

2θ = ângulo entre o feixe incidente e o difratado;

$d_{\phi,\psi}$ = distância interplanar na peça;

d_o = distância interplanar no material livre de tensões residuais;

$\theta_{\phi,\psi}$ = ângulo do pico de difração na peça;

θ_o = ângulo do pico de difração no material livre de tensões residuais;

Ψ = ângulo dado pela normal à superfície e o plano formado pelos feixes incidente e difratado (figura 2.2);

ϕ = ângulo de posicionamento do difratômetro no plano da superfície da peça (figura 2.2);

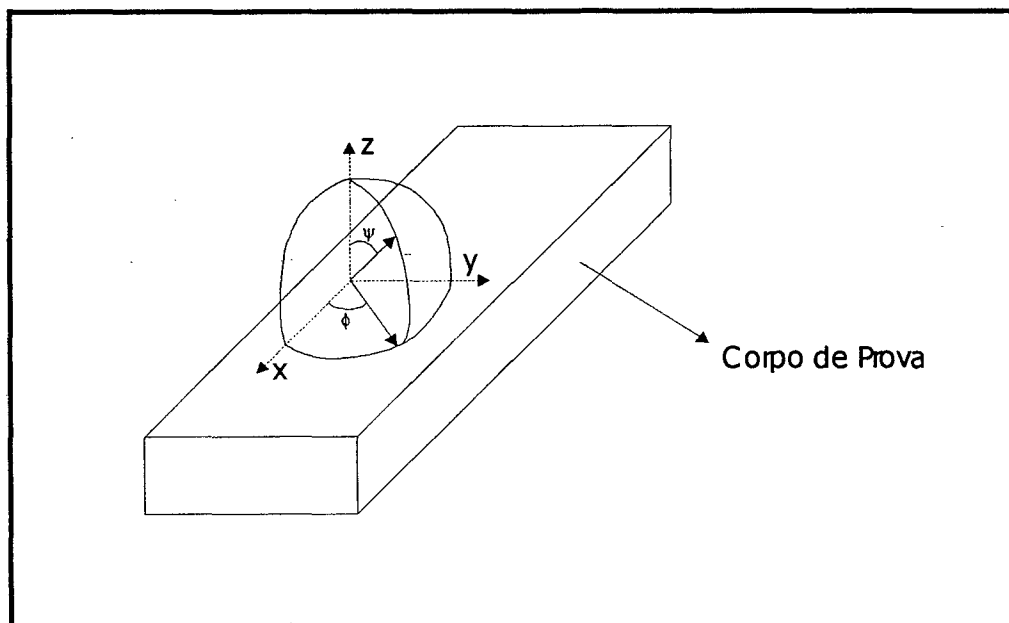


Figura 2.2 – Ângulos de Difração

A conversão entre deformação e tensão é dada por [1]:

$$\varepsilon_{\phi, \psi} = \left(\frac{1+\nu}{E} \right) \sigma_{\phi} \text{sen}^2(\psi) - \frac{\nu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2) \quad (2.3)$$

onde:

ν = coeficiente de Poisson do material;

E = módulo de elasticidade do material;

σ_{ϕ} = tensão no plano na direção de ϕ ;

$\sigma_{1,2}$ = tensões principais no plano.

Com este método, as medições são limitadas às camadas superficiais do material (5 μm), podendo ser essa uma limitação do mesmo. Quando utilizado em conjunto com a técnica de decapagem química, podem ser analisadas profundidades maiores (em torno de 0,1 mm) e também podem ser determinados gradientes de tensão ao longo da profundidade.

Os equipamentos para medição, chamados difratômetros, são de alto custo e requerem muito cuidado em sua operação. Consistem em uma fonte de raios-x e sensores para a determinação do ângulo θ e sua variação com diferentes orientações ψ .

A incerteza do método é afetada por várias variáveis, como microestrutura, orientação dos grãos, vazios e discordâncias e experiência do operador. A incerteza atribuída ao método é da ordem de $\pm 20 \text{ MPa}$ a $\pm 35 \text{ MPa}$ [3].

2.3.1.2 Difração de Raios de Nêutrons

Os princípios físicos da medição de tensões residuais por raios de nêutrons e raios-x são idênticos. Entretanto, as informações obtidas através desse método não estão limitadas à camada superficial do material, devido à penetração mais profunda dos raios de nêutrons no material. Utilizando-se este método, é possível determinar as três componentes principais de tensão residual presentes na estrutura. A determinação de tensões variando com a profundidade não pode ser feita com incerteza aceitável, apesar dos contínuos esforços no sentido de tornar o método uma opção mais barata e mais eficiente para uso em indústrias e laboratórios [4].

2.3.1.3 Efeito Barkhausen

O método do ruído magneto-elástico Barkhausen é baseado no conceito dos domínios ferromagnéticos.

Quando um campo magnético ou um carregamento é aplicado sobre um componente ferromagnético, ocorrem mudanças na estrutura dos domínios magnéticos, pela movimentação abrupta das paredes dos mesmos. Essas mudanças modificam a magnetização de toda a peça e também suas dimensões.

Quando as paredes de um domínio magnético se movimentam, geram uma mudança da magnetização, gerando, por sua vez, um pulso elétrico. Tal pulso pode ser captado quando um sensor feito de fio condutor enrolado é posicionado próximo à peça em estudo.

Quando os pulsos elétricos produzidos pelo movimento de todos os domínios são colocados juntos, um ruído é obtido. Tal ruído é conhecido como ruído de Barkhausen. Dessa forma, é possível caracterizar a resposta típica do padrão de ruído para uma peça livre de tensões e compará-lo com o obtido de uma peça da qual se deseja determinar as tensões residuais.

A sensibilidade do método à microestrutura do material exige padrões de calibração livres de tensões ou com tensões residuais conhecidas. A aplicação do método exige um conhecimento profundo do material em análise, pois, do contrário, pode apresentar péssimos resultados quando comparado com o raio-x ou o método do furo. Isto se deve à alta sensibilidade do método às características metalúrgicas do material da peça medida.

2.3.1.4 Ultra-Som

Técnicas ultra-sônicas empregadas na medição de tensões residuais têm como princípio básico a variação de velocidade de propagação das ondas sonoras, que podem ser conceitualmente descritas pela relação [1]:

$$V = V_0 + K\sigma \quad (2.4)$$

onde:

V_0 = velocidade de uma onda em um material livre de tensões;

K = constante acustoelástica do material;

σ = tensão residual.

O princípio do método baseia-se na emissão de ondas de ultra-som por um cabeçote emissor, propagadas através de uma região do material e captadas por um cabeçote receptor.

Como vantagens, podem ser citadas a possibilidade de obtenção de informações sobre tensões no interior do material (a variação de velocidade é proporcional à tensão média existente na região através da qual a onda se propaga) e a facilidade de operação e transporte do equipamento utilizado, que não apresenta nenhum perigo de radiação. Entretanto, o método apresenta diversas limitações, que o tornam pouco atraente no que se refere ao seu emprego na prática. Uma delas é a suscetibilidade à interferência causadas

por outras fontes sonoras e gradientes de temperatura, que, no ambiente industrial, constituem condição muito comum de trabalho.

2.3.2 Métodos Destrutivos

2.3.2.1 Propagação de Trinca

O método da propagação de trinca utiliza os conceitos da mecânica da fratura aplicada à medição da distribuição de tensões residuais bidimensionais em placas onde existem grandes gradientes de tensões residuais [4]. O princípio de cálculo das tensões residuais é baseado na teoria de fator de concentração de tensão de uma trinca em um campo de tensões e do princípio da superposição, o que torna a técnica semelhante ao método do furo cego. Apenas os deslocamentos ou deformações na borda da placa são medidos, sem a utilização de qualquer outro sensor. O método é aplicável a diferentes geometrias, desde que se possa realizar a análise através de elementos finitos.

2.3.2.2 Seccionamento

O método de seccionamento é utilizado como uma indicação visual do estado de tensão residual (figura 2.3).

A análise qualitativa é simples: quando a língua formada por dois cortes parciais paralelos se fecha, significa que há estado compressivo de tensões na direção axial. Quando a mesma se abre, significa estado de tração axial na parede externa do tubo. No entanto, quando nenhuma variação ocorre após a realização de cortes parciais é ainda possível que a peça não esteja livre de tensões, mas que os efeitos do estado de tensão interno possam estar sendo compensados pelos do externo. O empenamento produzido pelo seccionamento de chapas e blocos também pode ser aproveitado como um indicativo das tensões residuais presentes nestes tipos de peças. É possível empregar esta técnica em conjunto com extensômetros de resistência, permitindo quantificar valores de campos de tensão [1,4].

2.3.2.3 Remoção de Camadas

Basicamente, quando uma camada de material é removida, o balanço interno de tensões sofre mudanças, no sentido de restabelecer o equilíbrio de forças e momentos. Como consequência, a peça se deforma, mudando sua geometria. Utilizando-se de relações

constitutivas adequadas, e medindo-se essa variação de forma, é possível estimar valores para o campo de tensões residuais previamente existente na superfície do componente.

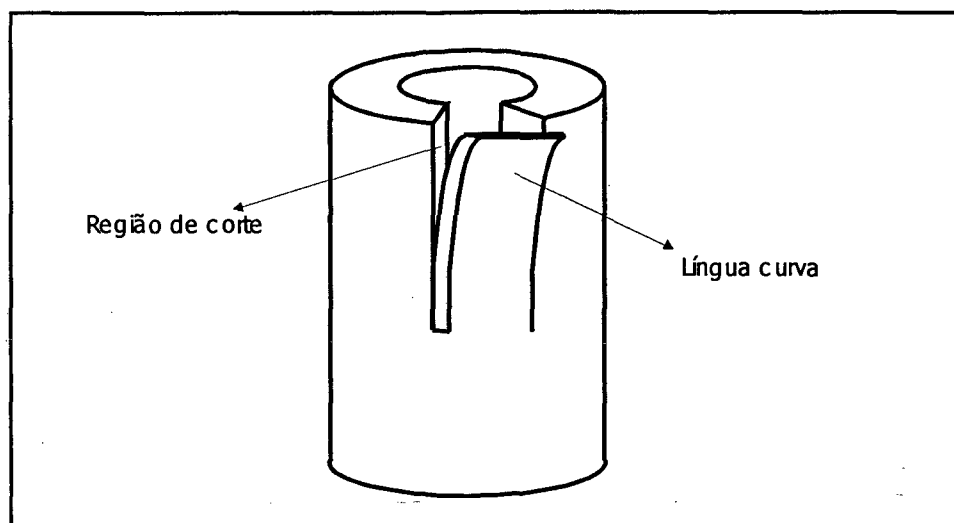


Figura 2.3 – Método de Seccionamento

O processo de remoção de material geralmente adotado com esta técnica é o ataque químico, devido ao fato de não serem introduzidas tensões residuais e possibilitar um bom controle da espessura da camada removida. A quantidade de material a ser retirada é controlada através do tempo de imersão na solução química, que em geral, é constituída de ácido clorídrico.

2.3.3 Métodos Semi-destrutivos

Dentre os métodos modernamente empregados na medição de tensões residuais, o mais difundido e amplamente utilizado é o método do furo. Tal método consiste na execução de um furo de pequenas dimensões na superfície da peça, provocando o alívio das tensões residuais normais à nova superfície criada com o furo [1]. A nova configuração de tensões e momentos internos, gerada pela remoção de material durante a furação, provoca uma movimentação da superfície do material nas proximidades do furo. Tal deslocamento relativo é o parâmetro monitorado durante o processo de medição, seja através da medição das deformações específicas, no caso da extensometria, ou através da medição dos campos de deslocamentos, como é o caso da holografia eletrônica.

A monitoração com extensometria convencional emprega conjuntos de extensômetros de resistência (figura 2.4), denominados rosetas extensométricas.

O equipamento utilizado na realização do furo geralmente trata-se de uma turbina pneumática de alta rotação, que emprega uma fresa de topo cônico-invertida (de uso odontológico) para a remoção do material. Fabricado pela empresa Micro Measurements Inc., o dispositivo RS-200 (figura 2.5), comporta três possíveis processos de furação: turbina pneumática de alta rotação, furadeira convencional e jato de ar abrasivo [5].

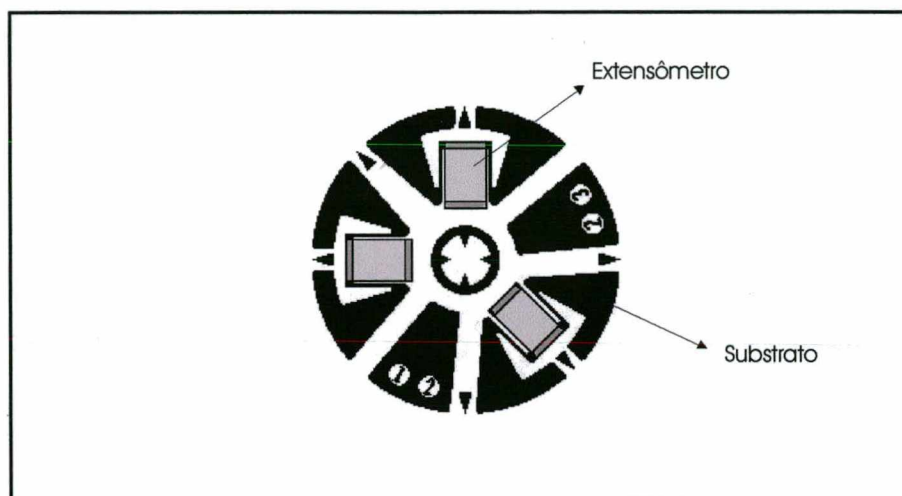


Figura 2.4 – Roseta extensométrica utilizada em medições de tensão residual

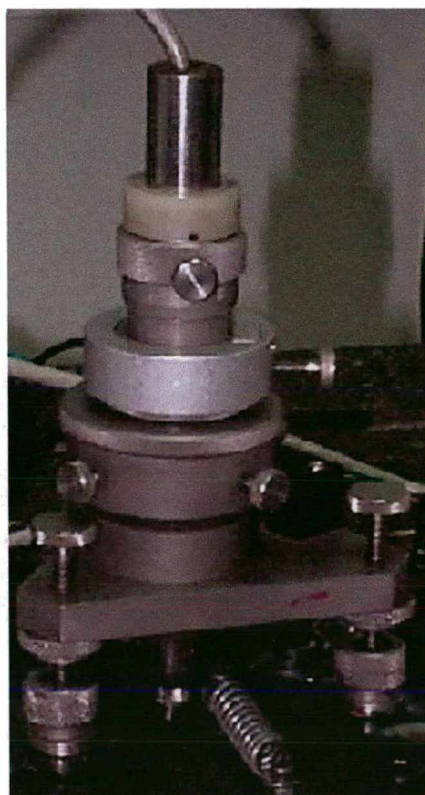


Figura 2.5 – O dispositivo RS-200

Apesar de ser uma das técnicas mais usadas na determinação de tensões residuais, a extensometria apresenta alguns aspectos críticos e limitações de ordem prática. A centragem do furo e relação à roseta extensométrica é crítica, pois um pequeno desalinhamento pode causar erros muito significativos nos resultados. Segundo Albertazzi [6] um erro de centragem de 0.1 mm pode causar erros de até 20% nas tensões residuais medidas. Outra limitação é o fato de a colagem da roseta ser uma tarefa meticulosa, que exige paciência e habilidade manual do operador. Caso a colagem não seja devidamente realizada, a roseta extensométrica é inutilizada, assim como todo o trabalho de preparação da superfície, colagem e alinhamento.

Apesar de apresentar algumas desvantagens, como a sensibilidade relativamente baixa, a grande suscetibilidade a erros de centragem e ao valor do diâmetro do furo e à eventual introdução de novas tensões residuais em função da furação, o método do furo é ainda o mais difundido, pois apresenta uma série de vantagens em relação a outros métodos:

- a) permite uma medição mais localizada, isto é, fornece o valor das tensões residuais que agem em uma região próxima ao furo;
- b) o dano provocado na superfície medida pode não comprometer o uso do componente;
- c) apresenta procedimento de medição de aplicação relativamente simples;
- d) o custo envolvido na aquisição dos equipamentos necessários é baixo em relação a outros métodos como, por exemplo, o método de difração de raios-x;
- e) a incerteza envolvida é aceitável para a maioria das aplicações, ficando em torno de 20%, além de ser um dos únicos métodos que permitem a medição em campo.

2.3.3.1 Fundamentos do Método do Furo

Na maioria dos casos, o furo executado para provocar o alívio de tensões é cego, isto é, não passante, com uma profundidade aproximadamente igual ao diâmetro; normalmente pequena quando comparada com a espessura do componente a ser medido.

Entretanto, a formulação do problema elástico associado ao furo cego é consideravelmente complexa e ainda não se conhece uma solução analítica explícita que possibilite o cálculo direto das tensões a partir das deformações ou dos deslocamentos resultantes. Assim sendo, é comum utilizar a solução analítica do modelo do furo passante

em placa infinita sob tensão constante e estendê-la por meio da aplicação de coeficientes de correção para o caso particular do furo cego.

2.3.3.2 Furo Passante

O campo radial de deformações gerado pela execução de um furo passante em uma peça uniformemente submetida a um estado biaxial de tensões pode ser representado por:

$$\varepsilon_{radial}(r, \theta) = \frac{-(1+\nu)}{2E} \left\{ \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{r^2} \right) - \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{r^2} \right) \left[\frac{3}{r^2} - \frac{4}{(1+\nu)} \right] \cos(2\theta - 2\beta) \right\} \quad (2.5)$$

onde:

$$r = \frac{R}{R_o} (R \geq R_o) \text{ é o raio normalizado;}$$

R_o = raio do furo;

R = raio arbitrário a partir do centro do furo realizado (coordenada polar);

ν = coeficiente de Poisson do material;

E = módulo de elasticidade do material;

$\sigma_{1,2}$ = tensões principais;

θ = ângulo entre uma direção qualquer e o eixo de referência (coordenada polar);

β = ângulo entre a direção principal de σ_1 e o eixo de referência.

A equação (2.5) pode ser reescrita como:

$$\varepsilon_{radial}(r, \theta) = A_\varepsilon(r)(\sigma_1 + \sigma_2) + B_\varepsilon(r)(\sigma_1 - \sigma_2) \cos(2\theta - 2\beta) \quad (2.6)$$

onde:

$$A_\varepsilon(r) = \frac{-(1+\nu)}{2E} \frac{1}{r^2}$$

$$B_\varepsilon(r) = \frac{-(1+\nu)}{2E} \frac{1}{r^2} \left[\frac{4}{(1+\nu)} - \frac{3}{r^2} \right]$$

O campo radial de deslocamentos, pode ser obtido integrando-se a equação (2.5) em relação ao raio [7]:

$$u_{radial}(r, \theta) = -\frac{(1+\nu)}{2E} r \left\{ \left[\left(\frac{R_o}{r} \right)^4 - \frac{4}{(1+\nu)} \left(\frac{R_o}{r} \right)^2 \right] (\sigma_1 - \sigma_2) \cos(2\theta - 2\beta) - (\sigma_1 + \sigma_2) \left(\frac{R_o}{r} \right)^2 \right\} \quad (2.7)$$

A equação (2.7) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$u_{radial}(r, \theta) = A_u(r) (\sigma_1 - \sigma_2) \cos(2\theta - 2\beta) + B_u(r) (\sigma_1 + \sigma_2) \quad (2.8)$$

onde:

$$A_u(r) = -\frac{(1+\nu)}{2E} r \left[\left(\frac{R_o}{r} \right)^4 - \frac{4}{(1+\nu)} \left(\frac{R_o}{r} \right)^2 \right]$$

$$B_u(r) = \frac{(1+\nu)}{2E} r \left(\frac{R_o}{r} \right)^2$$

Os deslocamentos resultantes do alívio de tensões diminuem com o aumento da distância ao centro do furo. Essa é a razão pela qual as medições devem ser realizadas em regiões próximas à borda do furo, aumentando a amplitude do sinal de medição obtido e conseqüentemente, melhorando os resultados da medição. Entretanto, é importante ressaltar que efeitos de borda podem se mostrar presentes nessas regiões, criando dificuldades adicionais à determinação das tensões. Estudos realizados demonstram que resultados razoáveis com extensometria são obtidos quando a região de medição encontra-se afastados da borda do furo entre os limites dados por $0,3 < r < 0,45$; onde $r = R_o/R$.

2.3.3.3 Furo Cego

Em situações práticas de medição, normalmente as hipóteses assumidas no modelo do furo passante não correspondem à realidade. Isso significa que não é possível, na maioria dos casos, considerar as peças e estruturas a serem medidas como placas finas, infinitas,

submetidas a um estado uniforme de tensões. Entretanto, é possível, devido às semelhanças existentes entre as distribuições de tensão do furo passante e do furo cego, empregar a mesma formulação básica, apenas utilizando-se de coeficientes de correção (\bar{A} e \bar{B}). Tais coeficientes são determinados por [8]:

$$\bar{A} = -\frac{1+\nu}{2E} \bar{a}$$

$$\bar{B} = -\frac{1}{2E} \bar{b}$$

onde:

\bar{a} e \bar{b} são coeficientes obtidos por elementos finitos.

2.3.4 Tensões Residuais Variáveis

Segundo a norma ASTM E-837 / 94 [8], o método do furo é adequado para perfis constantes de tensão e não é confiável para o caso de tensões que variam ao longo da profundidade do material. Entretanto, utilizando-se da combinação entre furação incremental e dados de elementos finitos, é possível inferir variações das tensões residuais em relação à profundidade, isto é, distância à superfície.

O processo de medição de tensões com furação incremental consiste no monitoramento sistemático das deformações ou deslocamentos resultantes nas proximidades do furo à medida que são executados passos de avanço na furação. De posse desses dados, é possível construir uma curva “Tensão x Profundidade”, permitindo quantificar e avaliar a uniformidade do campo de tensões presente na peça [9].

Capítulo 3

Medição de Deslocamentos com Holografia Eletrônica

3.1 Holografia Eletrônica

3.1.1 Princípios

A holografia eletrônica é uma técnica óptica utilizada na medição de microdeslocamentos, geometrias, deformações e tensões. A técnica envolve princípios interferométricos e utiliza luz monocromática e coerente de um laser.

Basicamente, quando tal tipo de luz incide sobre uma superfície opaca, pode-se visualizar uma fina granulação, com manchas claras e escuras sobre ela. Tal “granulado óptico” é referido na literatura técnica como **padrão de "speckle"** [10]. A explicação para este fenômeno encontra-se na interferência entre os múltiplos raios refletidos dos diversos pontos de uma superfície opticamente rugosa. A reflexão destes diversos raios cria um padrão de pontos luminosos e manchas escuras dispostas aleatoriamente, denominado padrão de "speckle" (figura 3.1).

Na medição com holografia eletrônica, dois padrões de "speckle" são opticamente superpostos e o novo padrão de "speckle", resultante da interferência entre ambos, é o elemento de interesse. A imagem do padrão de "speckle" pode ser adquirida através de uma câmera de TV. Neste caso, a imagem fornece a intensidade luminosa em cada ponto da região iluminada. Entretanto, a medição de algumas grandezas mecânicas por meio de holografia eletrônica requer o conhecimento da fase e a associação desta a cada ponto da superfície, resultante da interferência entre os dois padrões de "speckle" superpostos. Para determinar esta fase, são empregados alguns métodos, sendo um dos mais usados o método do deslocamento de fase ou, em inglês, "phase shifting" [10].

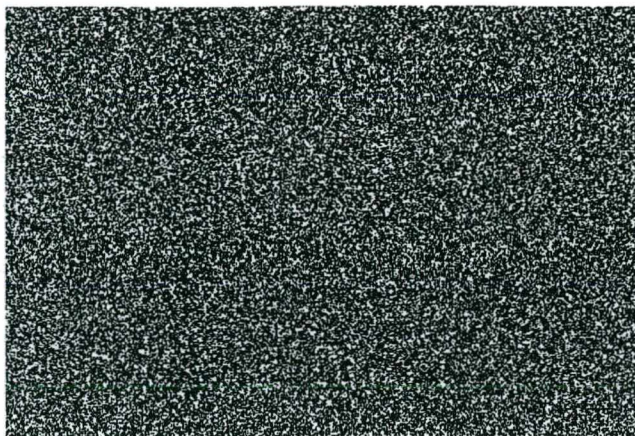


Figura 3.1 – Padrão de "speckles"

3.1.2 Iluminação

Há basicamente dois tipos de iluminação usadas na holografia eletrônica: iluminação simples e iluminação dupla. Nesse trabalho, o maior interesse reside na iluminação dupla.

Esta configuração é utilizada, em geral, para possibilitar a medição de deslocamentos paralelos à superfície a medir. A superfície é iluminada por dois feixes de luz que geram, cada um, um padrão de "speckle". Estes padrões interferem entre si, gerando um novo padrão [11].

Quando a superfície se move, os padrões de "speckle" relativos a cada feixe de iluminação sofrem uma defasagem, alterando assim, a intensidade luminosa captada pela câmera.

Para os feixes 1 e 2 (figura 3.2), as mudanças de fase provocadas pelo deslocamento da superfície (δ_1 e δ_2) são dadas por [11]:

$$\delta_1 = \frac{2\pi}{\lambda} \vec{P}_1 \cdot \vec{d} \quad (3.3)$$

$$\delta_2 = \frac{2\pi}{\lambda} \vec{P}_2 \cdot \vec{d} \quad (3.4)$$

onde:

$$\vec{P}_1 = \vec{n}_1 - \vec{n}_3$$

$$\vec{P}_2 = \vec{n}_2 - \vec{n}_3$$

\vec{d} = deslocamento sofrido pela superfície no ponto considerado;

λ = comprimento de onda da luz coerente e monocromática;

\vec{n}_1, \vec{n}_2 e \vec{n}_3 = vetores unitários apontando para os pontos de iluminação 1, 2 e para a direção do observador (câmera) respectivamente.

A fase inicial do padrão de “speckle” é dada por:

$$\varphi_i = \varphi_1 - \varphi_2 \quad (3.5)$$

onde:

φ_1 = fase aleatória da frente de onda proveniente do ponto 1;

φ_2 = fase aleatória da frente de onda proveniente do ponto 2;

Após o deslocamento da superfície, a fase final do padrão de interferência será:

$$\varphi_f = (\varphi_1 + \delta_1) - (\varphi_2 + \delta_2) \quad (3.6)$$

Reescrevendo a equação 3.6, tem-se:

$$\varphi_f = (\varphi_1 - \varphi_2) + (\delta_1 - \delta_2) \quad (3.7)$$

Subtraindo-se os valores de φ_f e φ_i , obtém-se a variação de fase:

$$\Delta\varphi = \varphi_f - \varphi_i = \delta_1 - \delta_2 \quad (3.8)$$

Substituindo as expressões de δ_1 e δ_2 na equação (3.8) obtém-se:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} [(\vec{P}_1 - \vec{P}_2) \cdot \vec{d}] \quad (3.9)$$

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} [\vec{P} \cdot \vec{d}] \quad (3.10)$$

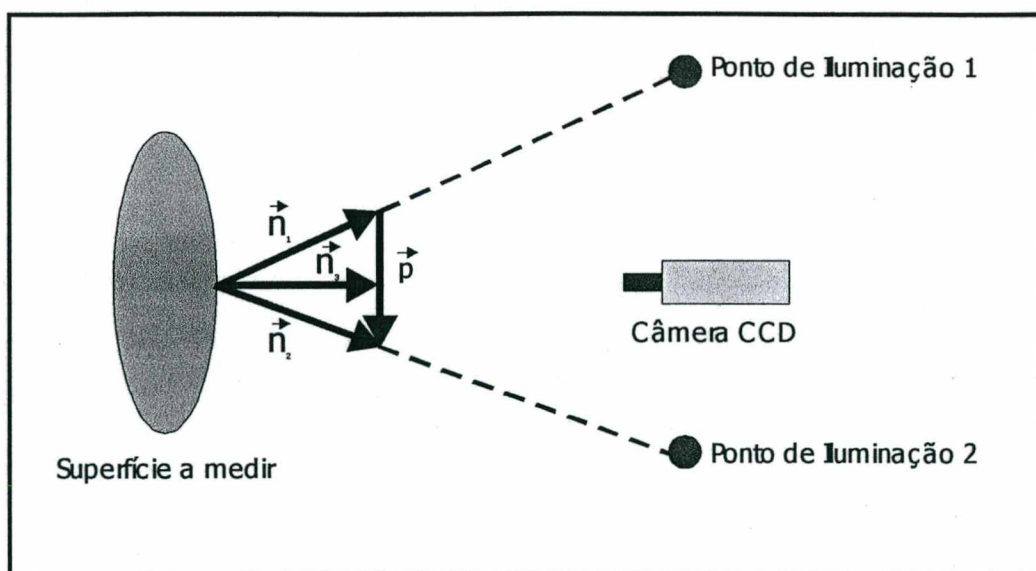


Figura 3.2 – Configuração de Dupla Iluminação

onde:

$$\vec{P} = \vec{P}_1 - \vec{P}_2 = \vec{n}_1 - \vec{n}_2 \quad (3.11)$$

Ao se analisar o mapa de franjas obtido com esta configuração, chega-se à equação 3.12.

$$\vec{P} \cdot \vec{d} = \lambda \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \quad (3.12)$$

Pode-se reescrever a equação 3.12, obtendo-se então a equação 3.13:

$$\vec{P} \cdot \vec{d} = \lambda OF \quad (3.13)$$

Onde OF é a ordem de franja. A ordem de franja é um número associado à defasagem sofrida pelo "speckle", definido por [38]:

$$OF = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \quad (3.14)$$

O vetor \vec{P} é denominado vetor sensibilidade. No caso particular em que \vec{n}_1 e \vec{n}_2 são orientados simetricamente em relação à normal à superfície, o vetor \vec{P} aponta numa direção paralela à superfície da peça. Neste caso, apenas a componente do deslocamento na direção do vetor sensibilidade provoca mudança de fase, dando origem às franjas de interferência. Ainda neste caso, se o objeto se mover na direção normal ao plano que passa

pela superfície da peça, os dois feixes que interferem vão sofrer as mesmas alterações de caminho óptico, de forma que o padrão de "speckle" interferométrico não se altera.

3.1.3 Deslocamento de Fase

O método do deslocamento de fase tem sido um dos mais empregados para a quantificação de mapas de franjas e consiste em introduzir, artificialmente, alterações conhecidas na fase de uma das ondas luminosas que atingem a superfície e medir as intensidades correspondentes. Em termos físicos, tal variação de fase é obtida pela modificação do caminho óptico seguido por um dos feixes que geram os padrões de "speckle". Essa modificação pode ser feita pelo deslocamento de um espelho colocado no caminho do feixe de luz. Tal espelho pode aumentar ou diminuir o caminho percorrido pela luz, modificando assim, a fase de cada ponto do padrão de "speckle". O deslocamento é feito em passos, geralmente em número de quatro. Cada passo gera um padrão de "speckle" com diferente intensidade.

A equação de Carré é aqui utilizada para a determinação do ângulo de fase [12]:

$$\varphi = \arctg \frac{\sqrt{[(I_1 - I_4) + (I_2 - I_3)][3(I_2 - I_3) - (I_1 - I_4)]}}{(I_2 + I_3) - (I_1 + I_4)} \quad (3.15)$$

onde:

φ = ângulo de fase

I_n = intensidade do padrão de "speckle" para cada passo

O princípio básico da medição com holografia eletrônica é a alteração de fase no padrão de "speckle", associada à mudança do caminho óptico percorrido pela luz. Tal mudança é provocada pelos deslocamentos da superfície da peça, resultantes da ação de um carregamento externo sobre a peça medida. A variação de fase é captada pela câmera de TV em função da modulação de intensidade luminosa do padrão de "speckle". É comum medir o valor da fase de cada ponto do padrão de "speckle" em dois momentos: antes e depois do carregamento a ser aplicado. Pela subtração, obtém-se o mapa da diferença de fase, que contém a parte fracionária da ordem de franja [13]. O aspecto visual do mapa da diferença de fase pode ser visto na figura 3.3.



Figura 3.3 – Mapa da diferença de fase

3.1.4 Remoção de Salto de Fase

Após a realização da operação denominada **remoção de salto de fase**, obtém-se a parte inteira da ordem de franja [3]. Para a determinação da parte inteira da ordem de franja, é empregado um algoritmo específico, no qual são usadas as partes fracionárias da ordem de franja. Estas são obtidas a partir dos mapas de diferença de fase e certas propriedades dos pontos vizinhos de um mapa de franja.

A ordem de franja é uma informação quantitativa correspondente à resposta do sistema ao efeito externo que provocou alterações no estado da superfície. As franjas de interferência representam regiões cuja componente do deslocamento na direção do vetor sensibilidade é constante. É comum fazer uma analogia entre o mapa de franjas e um mapa topográfico, cujas linhas representam pontos de altitude constante.

A franja de ordem zero corresponde a pontos de deslocamento nulo. As demais franjas são referenciadas em relação à franja zero, podendo ter ordens positivas ou negativas.

3.2 Medição de Tensões Residuais com o Método do Furo e Holografia Eletrônica

Métodos objetivando medir deslocamentos em superfícies através da holografia eletrônica vêm sendo desenvolvidos há duas décadas, com uma crescente busca pela praticidade e redução da incerteza de medição. Para a determinação de tensões residuais com o método do furo, é necessário medir os deslocamentos existentes na região vizinha ao furo, que servirão como dados de entrada das relações constitutivas adequadas, fornecendo assim, os valores de tensão. O procedimento de medição de tensões residuais com holografia através do método do furo envolve os seguintes passos:

- a) aquisição do mapa de fases de referência da região vizinha ao local onde será executado o furo;
- b) execução do furo;
- c) aquisição de um segundo mapa de fases da mesma região após a realização do furo;
- d) subtração dos dois mapas de fase e obtenção do mapa de diferenças de fase contendo a informação a respeito dos deslocamentos decorrentes da realização do furo;
- e) processamento do mapa de diferença de fases para a quantificação do campo de tensões e determinação de suas direções principais.

Até então, a medição de campos bidimensionais de deslocamentos vinha sendo realizada com holografia eletrônica em duas etapas, medindo uma componente cartesiana por vez e compondo o campo resultante. Entretanto, Albertazzi [6] desenvolveu recentemente uma técnica que envolve espelhos cônicos, possibilitando a medição da componente radial do deslocamento em uma única etapa (figura 3.4).

Um feixe colimado de laser incide sobre a superfície dos espelhos cônicos e é refletido em direção à peça a medir de forma a gerar uma região iluminada circular.

Idealmente, cada ponto dentro desta região circular é formado pela interferência de um único par de raios, refletidos por pontos diametralmente opostos na superfície dos espelhos cônicos, porém em alturas diferentes. Fica assim caracterizada uma configuração típica de dupla iluminação. É importante evitar que a luz não refletida pelos espelhos incida diretamente sobre a região de medição, o que levaria a uma situação de tripla iluminação.

O vetor sensibilidade é paralelo à superfície medida e aponta na direção do centro, definindo a sensibilidade radial do interferômetro. Mantendo constantes o comprimento de onda do laser e o índice de refração do meio, a sensibilidade pode ser alterada pela modificação do ângulo do espelho cônico e, conseqüentemente, de iluminação do interferômetro. Idealmente, as intensidades e as direções de polarização dos pares de raios que interferem devem ser iguais e a superfície da peça a medir deve estar perpendicular ao eixo óptico do interferômetro, de forma que apenas os deslocamentos radiais causem

alterações no padrão de interferência. Na superfície medida pelo interferômetro radial de dupla iluminação, cada ponto recebe dois feixes do laser, incidentes segundo ângulos de $+60^\circ$ e -60° em relação à normal, quando um espelho cônico, com ângulo de 30° em relação ao eixo óptico do interferômetro, é utilizado. O deslocamento de fase é conseguido fixando-se rigidamente um dos anéis e deslocando o outro através de um atuador piezoelétrico (o subsistema de deslocamento de fase será descrito em detalhes no capítulo 04). Esta configuração permite aplicar as mesmas técnicas de obtenção de mapas de fase da holografia eletrônica convencional.

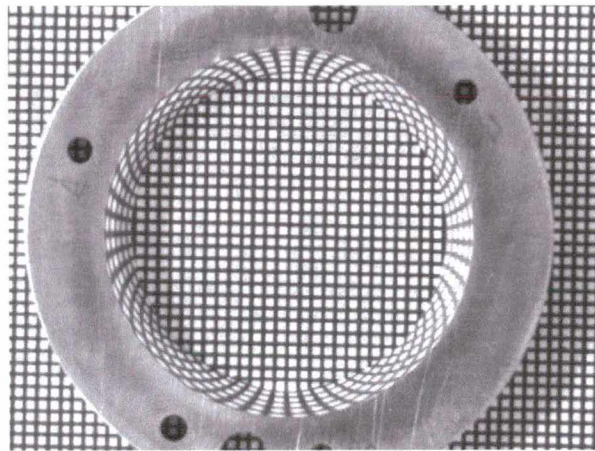


Figura 3.4 – Espelhos cônicos

Capítulo 04

O Medidor Portátil de Tensões Residuais – MTRES

4.1 Metodologia de Projeto

O desenvolvimento do presente protótipo do medidor de tensões residuais (figura 4.1), passou por uma seqüência de etapas, onde foram executadas diversas tarefas de planejamento, concepção, modelamentos, simulações e testes práticos. Tais etapas fazem parte da metodologia de projeto empregada [14] com o objetivo de tornar mais organizado e eficiente o trabalho de projeto do medidor. A metodologia se baseia em técnicas de QFD (quality function deployment), que consistem basicamente no detalhamento progressivo e sistemático do projeto, buscando a maximização da qualidade e funcionalidade do produto nas suas diferentes funções e características.

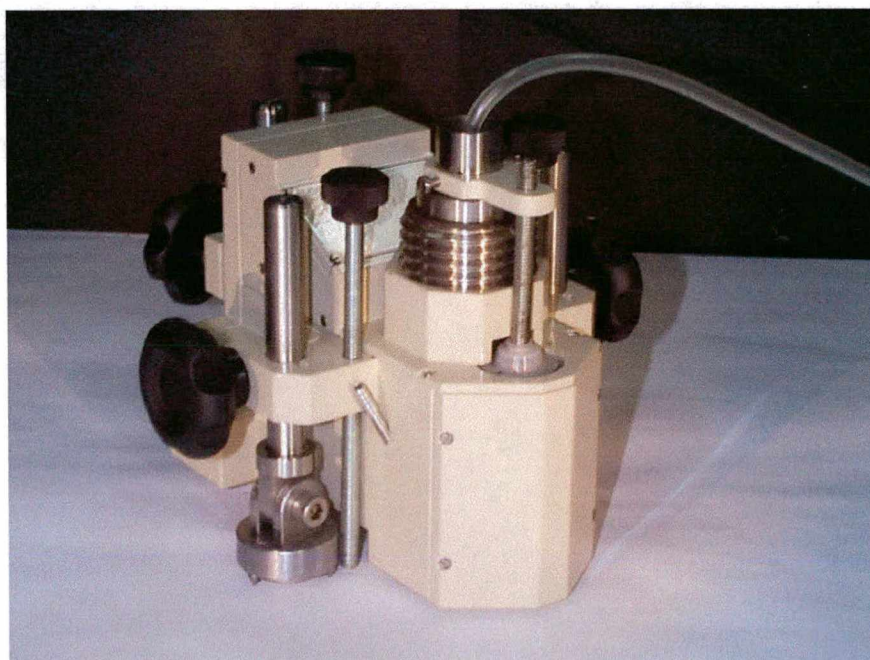


Figura 4.1 – MTRES - Medidor portátil de tensões residuais

Genericamente, tal metodologia apresenta as seguintes fases:

a) Planejamento do Produto;

Nesta etapa, o perfil do produto é definido: funções a exercer, mercado a que se destina, prazo para implantação, ciclo de vida que o produto deverá ter e o custo de desenvolvimento, implantação e fabricação. Uma das primeiras atividades consiste no levantamento das necessidades reais dos futuros usuários do produto. Tais informações vão permitir a montagem de um cenário, isto é, a inserção do produto num contexto global, visualizando vários aspectos ligados à concepção, projeto, comercialização, entre outros. O próximo passo é o detalhamento de todas as funções que devem ser executadas pelo produto, levando em conta as necessidades dos usuários em potencial.

b) Projeto Conceitual;

Estabelecidos os requisitos técnicos, são geradas as soluções possíveis e dentre elas, selecionadas as que são técnica e economicamente viáveis.

c) Projeto Preliminar;

Escolhida uma das soluções consideradas viáveis, são feitas análises sobre modelos que permitem a seleção dos valores ótimos dos parâmetros principais do projeto;

d) Projeto Detalhado;

Nesta etapa, os subsistemas que compõe o produto são desmembrados, definindo-se as dimensões, materiais e acabamentos de todos os componentes e peças.

As duas primeiras fases absorvem uma considerável parcela do tempo de desenvolvimento do produto, por abrangerem diversas tarefas muito importantes que envolvem pesquisa de mercado e concepção de idéias relacionadas ao projeto. Entretanto, o tempo investido reverte em tempo ganho nas duas últimas fases, uma vez que, quando o planejamento e o estudo de viabilidade são bem realizados, problemas de incompatibilidades futuras são evitados.

4.2 Requisitos a Atender

Uma fase importante do processo de desenvolvimento de um produto inovador é o levantamento de suas características desejáveis junto a potenciais usuários. No caso do

MTRES, tais características foram agrupadas em um conjunto de especificações, que norteou todo o projeto do sistema. Estas especificações se encontram detalhadas no anexo B.

4.3 Concepção e Implementação das Soluções

Tendo em vista as especificações de projeto (anexo B), diversos subsistemas foram idealizados e construídos, com o objetivo de permitir ao sistema executar todas as funções necessárias para o desenvolvimento das atividades metrológicas a que se destina. Cada subsistema apresenta detalhes construtivos e funções específicas, que serão abordados separadamente a partir de agora.

4.3.1 Iluminação

O subsistema de iluminação (figura 4.2) consiste em elementos ópticos e mecânicos que têm por função expandir, colimar e direcionar a luz coerente de um laser diodo. O feixe de luz colimado deve atingir o conjunto de espelhos cônicos, responsáveis pela criação da configuração de iluminação dupla sobre a superfície da peça a ser medida.

A luz coerente é emitida por um laser diodo Hitachi de potência nominal 40 mW, sob forma de um feixe elíptico, característico desse tipo de laser. Do ponto de vista óptico, tal perfil não é ideal, visto que a densidade luminosa não é tão uniforme quanto seria um perfil circular. Para corrigir o problema, um pequeno conjunto de duas lentes é empregado para transformar o feixe elíptico em circular. Tais lentes encontram-se inseridas na carcaça de fixação do laser diodo e foram adquiridas em conjunto com os mesmos.

O comprimento de onda da luz é de aproximadamente 785 nm (infravermelha).

O laser repousa no interior de uma bucha cilíndrica de cobre, cujo acabamento superficial possibilita o deslizamento e o conseqüente ajuste da posição em relação aos outros componentes.

O isolamento elétrico do laser em relação à carcaça é feito por meio da colocação de dois anéis de poliacetal em contato com a face frontal e posterior do mesmo. O restante da carcaça é pintado, o que torna dispensável qualquer preocupação com curto-circuitos.

A fixação é feita por meio de um anel de cobre rosqueável, que aperta os anéis de poliacetal, fixando o laser por pressão.

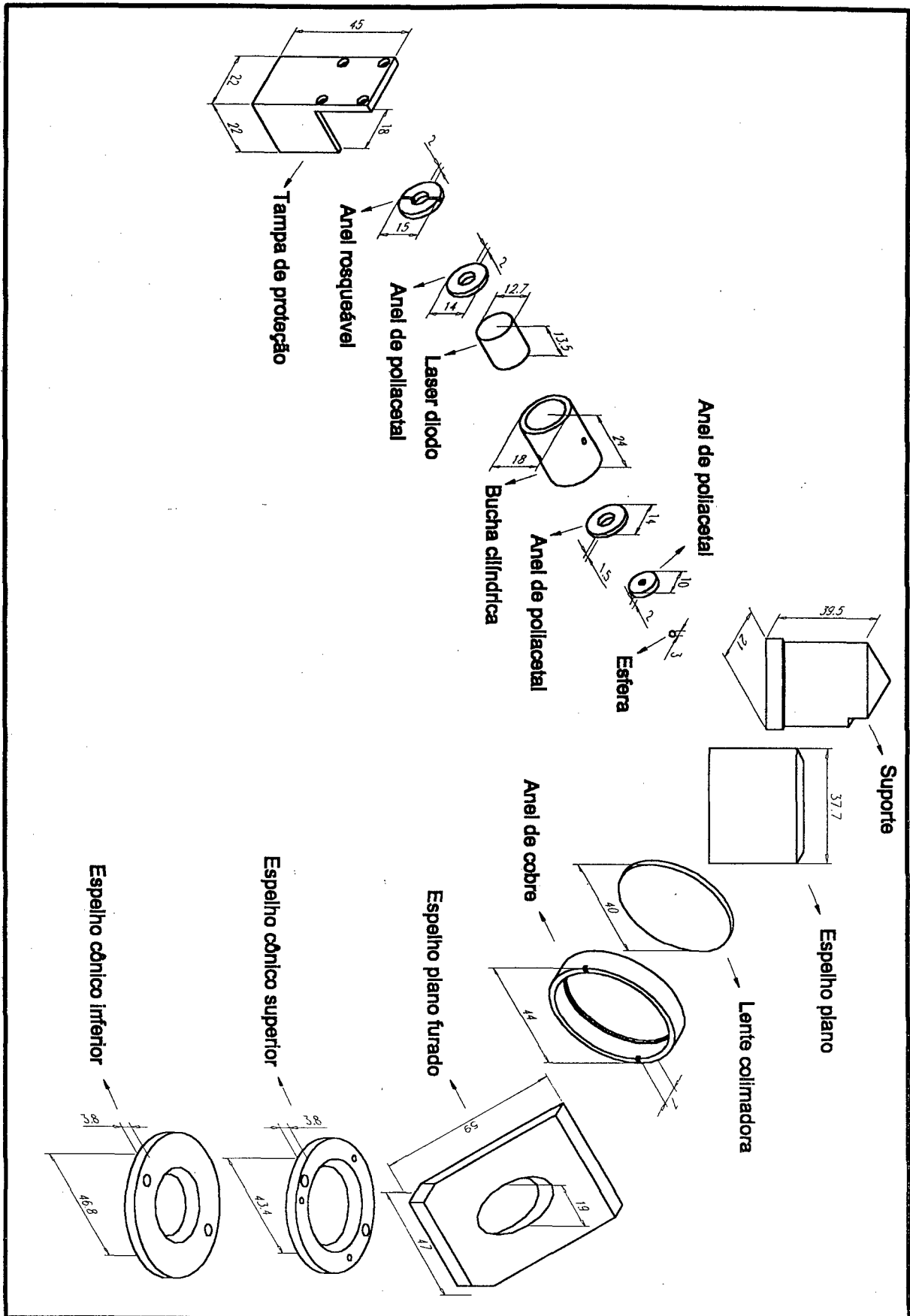


Figura 4.2 – Subsistema de iluminação

O feixe deve ser expandido em uma distância de aproximadamente 15 mm, de forma a não aumentar em demasia o comprimento final do sistema. Para tanto, utilizou-se de uma esfera de vidro BK-7 de diâmetro 2 mm, cujo comprimento focal é dado pela equação [15]:

$$\frac{1}{f} = (n_l - 1) \left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \left(\frac{n_l - 1}{n_l R_1 R_2} \right) \right] \quad (4.1)$$

onde:

f = comprimento focal;
 n_l = índice de refração do vidro;
 R_1 = raio de curvatura da primeira superfície da lente;
 R_2 = raio de curvatura da segunda superfície da lente.

Obs.: Para o caso da esfera, $R_1 = -R_2$

A esfera é fixa sob pressão no centro de um anel de nylon, encaixado à bucha cilíndrica de cobre.

Após a expansão, o feixe é refletido por um espelho plano inclinado a 45°. Tal espelho recebeu um recobrimento especial para o comprimento de onda e ângulo de reflexão em que opera. Para permitir a fixação ao bloco do MTRES, usinou-se uma peça suporte em alumínio, à qual o espelho foi colado.

A colimação do feixe é feita por uma lente plano-convexa de diâmetro 32 mm, posicionada a aproximadamente 14 mm do centro do espelho a 45°. A lente encontra-se colada a um anel de cobre, cujo deslizamento permite o ajuste da posição focal no interior da carcaça do MTRES. A construção mecânica do bloco garante um posicionamento satisfatório do eixo da lente em relação ao centro do feixe expandido, tornando mais rápido o processo de alinhamento.

O feixe já colimado é direcionado ao conjunto de espelhos cônicos através de um espelho plano furado, inclinado de 45°. Tal espelho apresenta um furo passante de 18 mm de diâmetro, que permite a passagem da furadeira pneumática durante a furação. Sua fixação ao bloco foi feita por meio de cola Araldite 24h. Da mesma forma que o primeiro espelho, este também apresenta um recobrimento especial objetivando otimizar seu comportamento para o comprimento de onda e ângulo de trabalho.

Nos espelhos cônicos, o feixe sofre reflexão e cria um círculo iluminado com aproximadamente 10 mm de diâmetro. Esse é o diâmetro da região de medição propriamente dita.

A cavidade onde o laser se encontra inserido é protegida por uma tampa de alumínio, que evita a entrada de poeira, além de isolar choques mecânicos originados por tensionamentos involuntários dos fios soldados ao laser.

4.3.2 Fixação e Ajuste

Manter-se rigidamente fixo à peça é uma função que o sistema deve executar com eficiência. Ao mesmo tempo, flexibilidade e facilidade de ajuste às diferentes formas geométricas das eventuais superfícies de medição são características indispensáveis.

No intuito de compatibilizar tais necessidades, projetou-se um conjunto de componentes (figura 4.3) que responde pela fixação e ajuste do sistema nas mais diferentes situações de medição. Tal conjunto mostrou-se versátil e de fácil manuseio e é constituído das seguintes partes:

- a) ímãs de terras-raras;
- b) garras de fixação;
- c) sapatas (magnéticas e simples);
- d) hastes;
- e) presilhas;
- f) barras roscadas;
- g)manípulos.

Os ímãs de terras-raras são responsáveis pela força de atração entre o sistema de medição e a peça em estudo. Tais ímãs foram escolhidos devido à maior intensidade de seu campo magnético em relação aos demais tipos disponíveis no mercado. Desse modo, com a mesma área de contato, é possível obter uma maior força de atração, melhorando a eficiência do dispositivo de fixação. Os ímãs cilíndricos utilizados apresentam 12 mm de diâmetro e 10 mm de altura.

As garras de fixação são pequenos cones pontiagudos que funcionam como punções de cravamento, penetrando a superfície do material quando da fixação do sistema e bloqueando grande parte dos movimentos na direção paralela à superfície. Tal movimentação é particularmente nociva aos resultados da medição, uma vez que induz franjas adicionais que se misturam às franjas de tensão residual [3]. As pequenas garras sofreram tratamento térmico superficial de têmpera e revenido, objetivando deixá-las resistentes ao impacto e, ao mesmo tempo, com uma dureza acima de 62 R_c. O comprimento total de cada peça é de 7 mm e o diâmetro 3 mm (figura 4.4).

As sapatas são as responsáveis diretas pelo assentamento e fixação do medidor. Apresentam-se em duas diferentes versões: a primeira se destina à utilização em materiais magnéticos e a segunda em materiais não magnéticos. A versão magnética apresenta uma cavidade cilíndrica, destinada a abrigar o ímã e mais três furos para posicionamento das garras de fixação.

Para maior flexibilidade de ajuste, há um sistema de rótulas (figura 4.5), geradas pela união das sapatas às hastes de fixação por meio de parafusos M5. Tais rótulas proporcionam um giro das sapatas de aproximadamente 180° em relação ao eixo do parafuso da união, proporcionando, ao mesmo tempo, flexibilidade e rigidez mecânica.

A versão não magnética apresenta uma superfície plana para colagem à peça de interesse. A colagem pode ser feita com cola à base de cianoacrilato ou mesmo adesivos mais resistentes, como Araldite. Também é possível ajustar a posição da sapata segundo a geometria da superfície a ser medida, graças ao mesmo sistema de rótulas presente nas sapatas magnéticas.

As hastes de fixação têm por função permitir o ajuste de altura do sistema e também garantir a rigidez mecânica necessária às medições com holografia eletrônica. Devido à diversidade de materiais e ambientes nos quais as medições podem ser feitas, o material escolhido para a usinagem das hastes foi aço inox 420, resistente à oxidação.

As presilhas são mecanismos de travamento existentes na carcaça do medidor, responsáveis pela fixação das hastes e do sistema como um todo. Para aumento da rigidez mecânica, as presilhas foram projetadas de forma a serem parte integrante da carcaça do

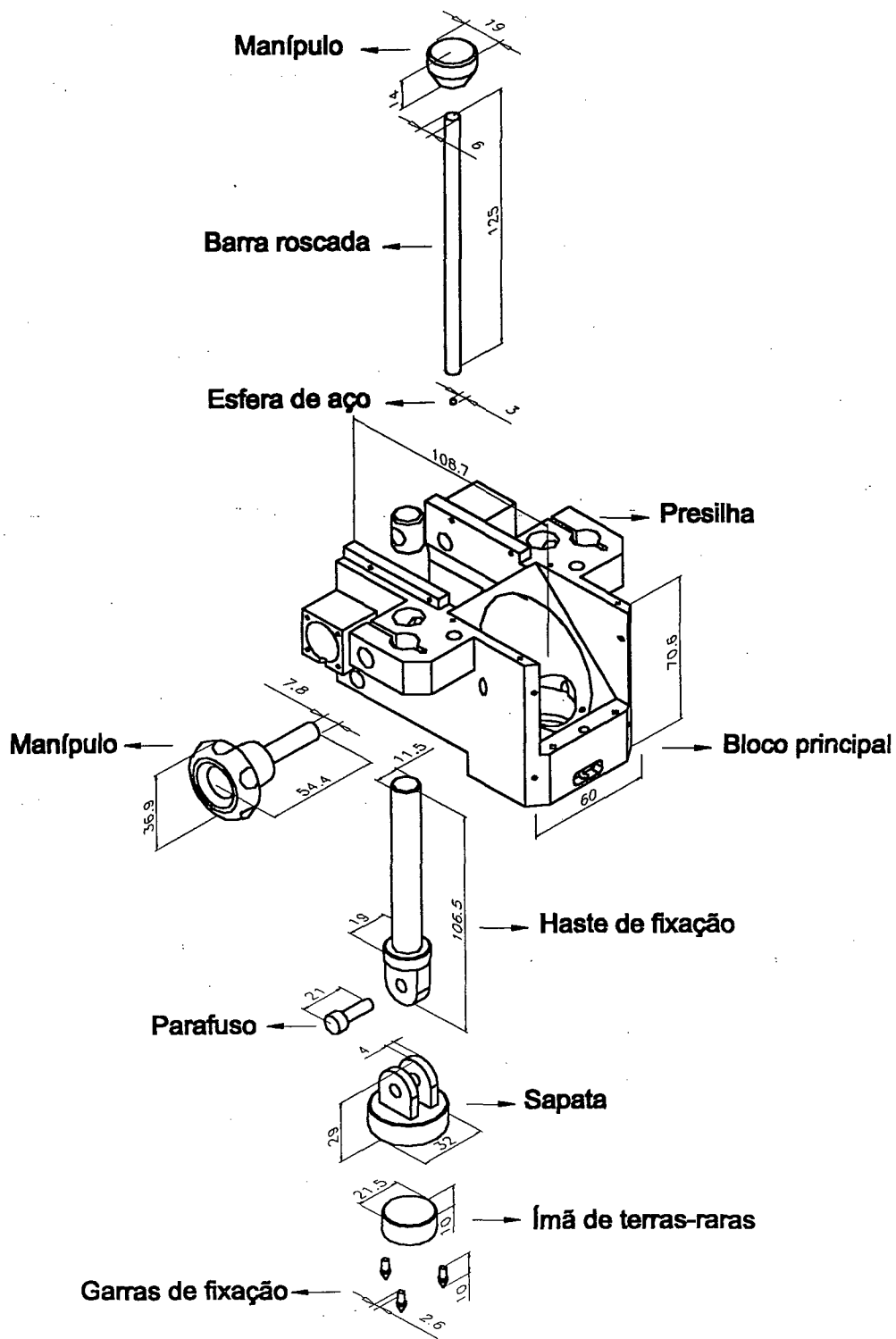


Figura 4.3 – Subsistema de fixação

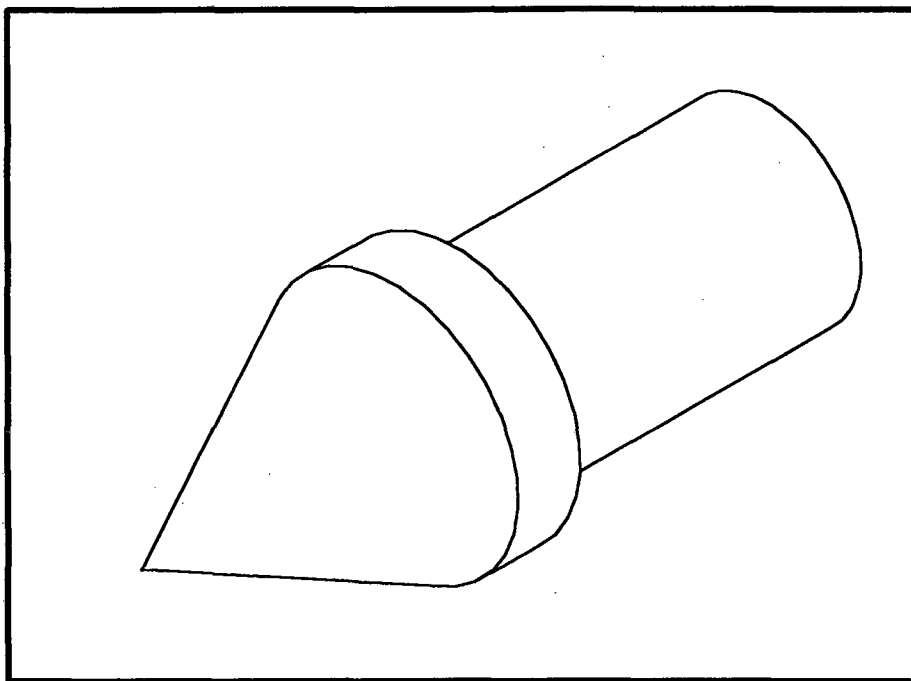


Figura 4.4 – Unha de fixação

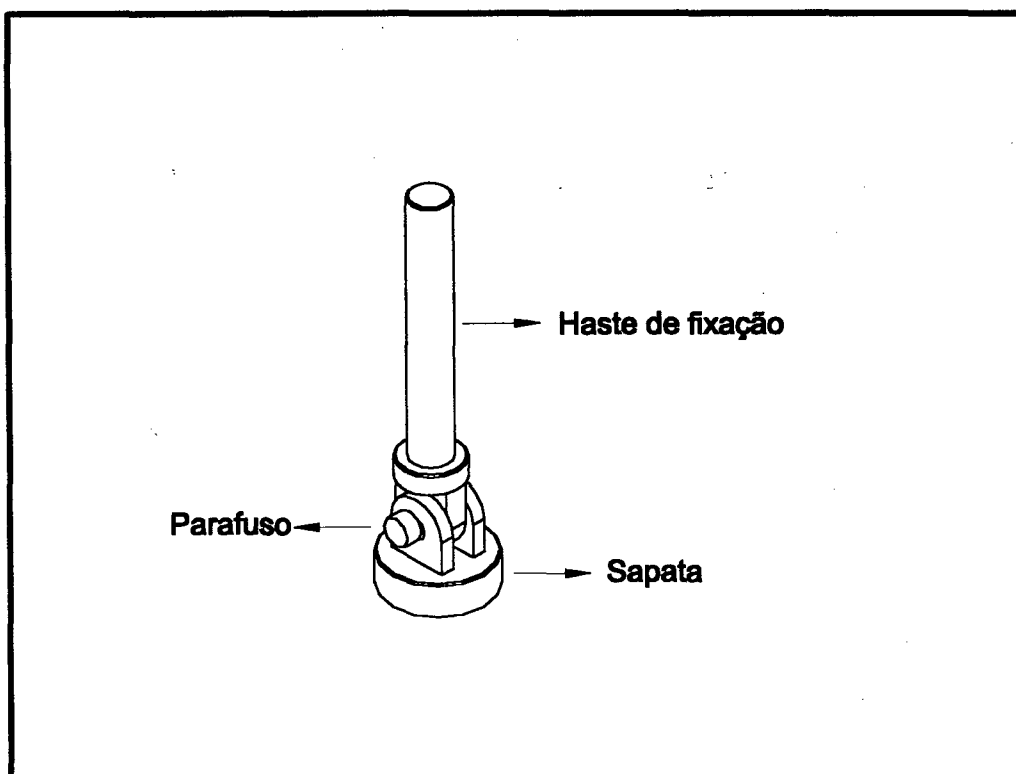


Figura 4.5 – Sistema de rótulas

MTRES. O travamento se dá através do rosqueamento de três manípulos de baquelite em insertos de aço presentes no bloco. Rosqueando-se os manípulos, provoca-se uma aproximação das duas arestas da presilha, pressionando a haste entre as duas. Tal efeito acaba por prender de maneira muito eficaz a haste de fixação, permitindo a realização das medições.

As barras roscadas são responsáveis pelo ajuste fino da altura e posição do medidor. Após a altura desejada ter sido atingida de modo mais grosseiro com as hastes de fixação, as barras roscadas são empregadas, possibilitando um ajuste mais fino, que é feito em conjunto com o computador, pela observação da imagem ao vivo. A altura ideal é obtida quando os dois círculos de luz gerados pelos espelhos cônicos estão concêntricos e a luz é igualmente distribuída ao longo do raio dos círculos.

4.3.3 Visualização das Imagens

As partes integrantes do subsistema de visualização estão representadas na figura 4.6.

O procedimento empregado na medição de tensões residuais consiste em captar duas imagens: uma referente ao estado inicial (peça sem furo) e outra correspondente ao estado final (após a realização do furo cego) e gravá-las no computador, para posterior utilização.

No caso da medição de gradientes de tensões residuais ao longo da profundidade, uma nova imagem é adquirida após cada passo da furação incremental.

A câmera CCD empregada apresenta dimensões reduzidas (32 mm x 32 mm x 29 mm). Trata-se de uma câmera “on board” com um CCD de 1/3” (3.6 mm de altura x 4.8 mm de largura), livre de qualquer encapsulamento externo. Tal modelo foi escolhido de forma a permitir a redução do volume do protótipo.

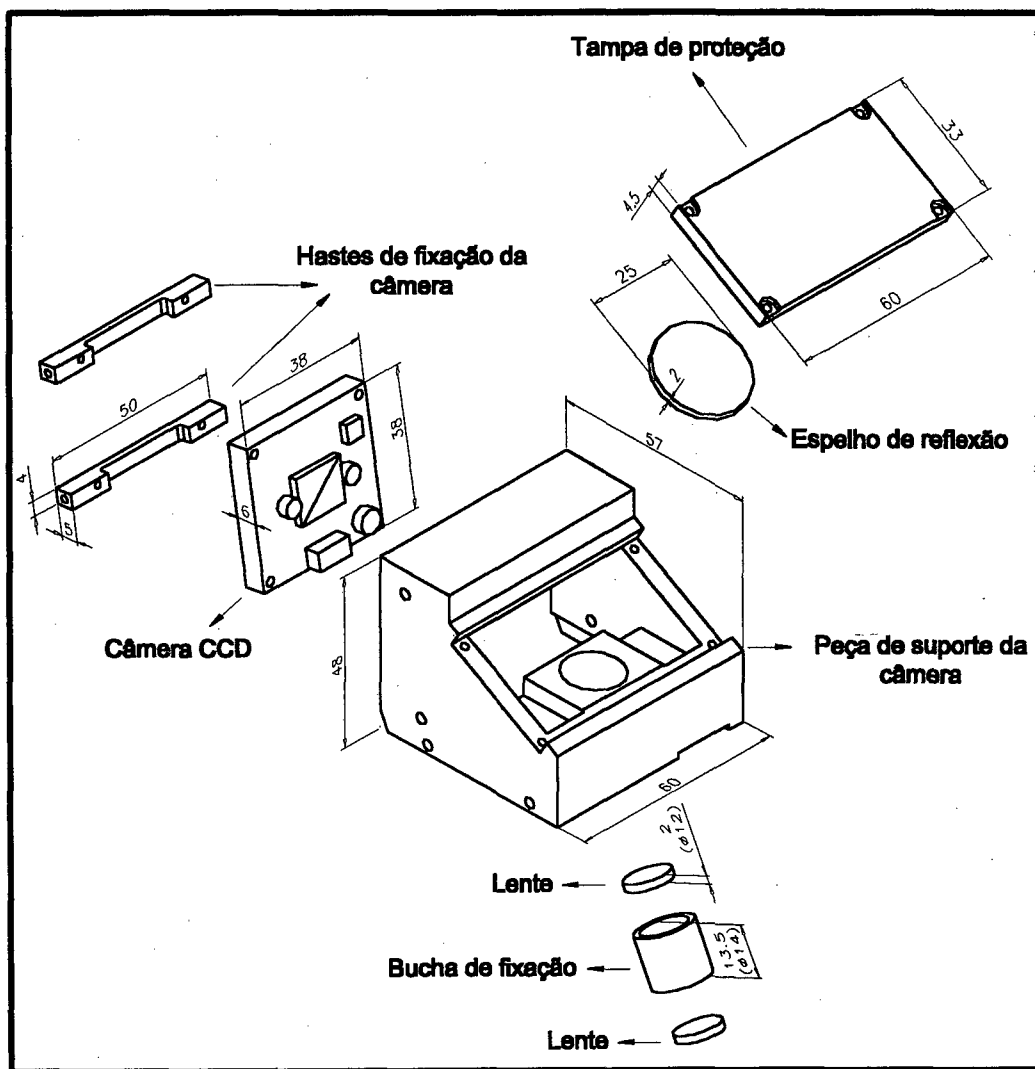


Figura 4.6 – Subsistema de visualização

O ajuste da posição angular e linear da câmera é efetuado através do deslizamento dos parafusos de fixação da mesma através de furos oblongos presentes na peça de suporte da câmera. Uma vez que a posição focal do conjunto é encontrada, o travamento é feito pelo aperto dos parafusos. O ajuste da posição angular é particularmente mais complicado, pois exige que o ângulo correto de inclinação do CCD seja encontrado. Caso isso não ocorra, não é possível manter toda a imagem em foco.

A ampliação e focalização da imagem é realizada através da utilização de duas pequenas lentes, coladas no interior de um tubo de cobre. A construção mecânica do suporte da câmera permite o deslizamento desse tubo no interior de um furo, possibilitando o ajuste do tamanho da imagem e da distância focal do conjunto. A redução teórica da imagem foi fixada em 0,3 vezes e a distância focal teórica é de 125 mm.

4.3.4 Deslocamento de Fase

O deslocamento de fase da luz é realizado através do emprego de três atuadores piezoelétricos e de quatro anéis usinados em Alumecc 89, material de propriedades muito parecidas com as do alumínio 7075. Esse material foi escolhido por apresentar algumas características interessantes. O Alumecc 89 apresenta grande uniformidade em sua estrutura e também em suas propriedades mecânicas, o que garante peças isentas de falhas ou defeitos oriundos de heterogeneidades intrínsecas do material, além de apresentar tempos de usinagem muito baixos, fornecendo um acabamento superficial excelente e reduzindo o desgaste da ferramenta.

O princípio empregado no deslocamento de fase da luz consiste em movimentar apenas uma das partes do conjunto de espelhos cônicos com o auxílio de piezoatuadores e manter a outra parte rigidamente fixada ao bloco do MTRES. Dessa forma, apenas a luz refletida pela parte móvel do conjunto tem o caminho óptico alterado.

A figura 4.7 mostra todos os componentes do subsistema de deslocamento de fase.

Os atuadores não são realimentados e encontram-se ligados em paralelo, sendo alimentados com uma tensão que varia de 0 a 65 V durante a aquisição de fase. A posição de cada atuador é definida por três rebaixos existentes num dos anéis de fixação, equidistribuídos a 120° um do outro. Os piezos são colados neste anel que, por sua vez, é aparafusado ao bloco. Um segundo anel é colado à outra extremidade dos piezos, constituindo um “sanduíche”. Esse segundo anel permite a união desse “sanduíche” com o espelho cônico móvel (espelho cônico superior), por meio de três parafusos M3.

O espelho cônico inferior apresenta ajuste fixo leve e é colado rigidamente à carcaça do MTRES com cola cianoacrilato. O espaçamento existente entre os dois espelhos é de aproximadamente 1 mm. Esse espaçamento tem por objetivo permitir a movimentação do espelho superior e evitar a criação de uma região de saturação luminosa no centro do círculo iluminado (devido à concentração de luz). O espelho superior, cuja folga diametral em relação à parede do bloco é de 1 mm, desloca-se de aproximadamente $2 \mu\text{m}$ quando da aplicação da tensão analógica, permitindo o deslocamento de fase.

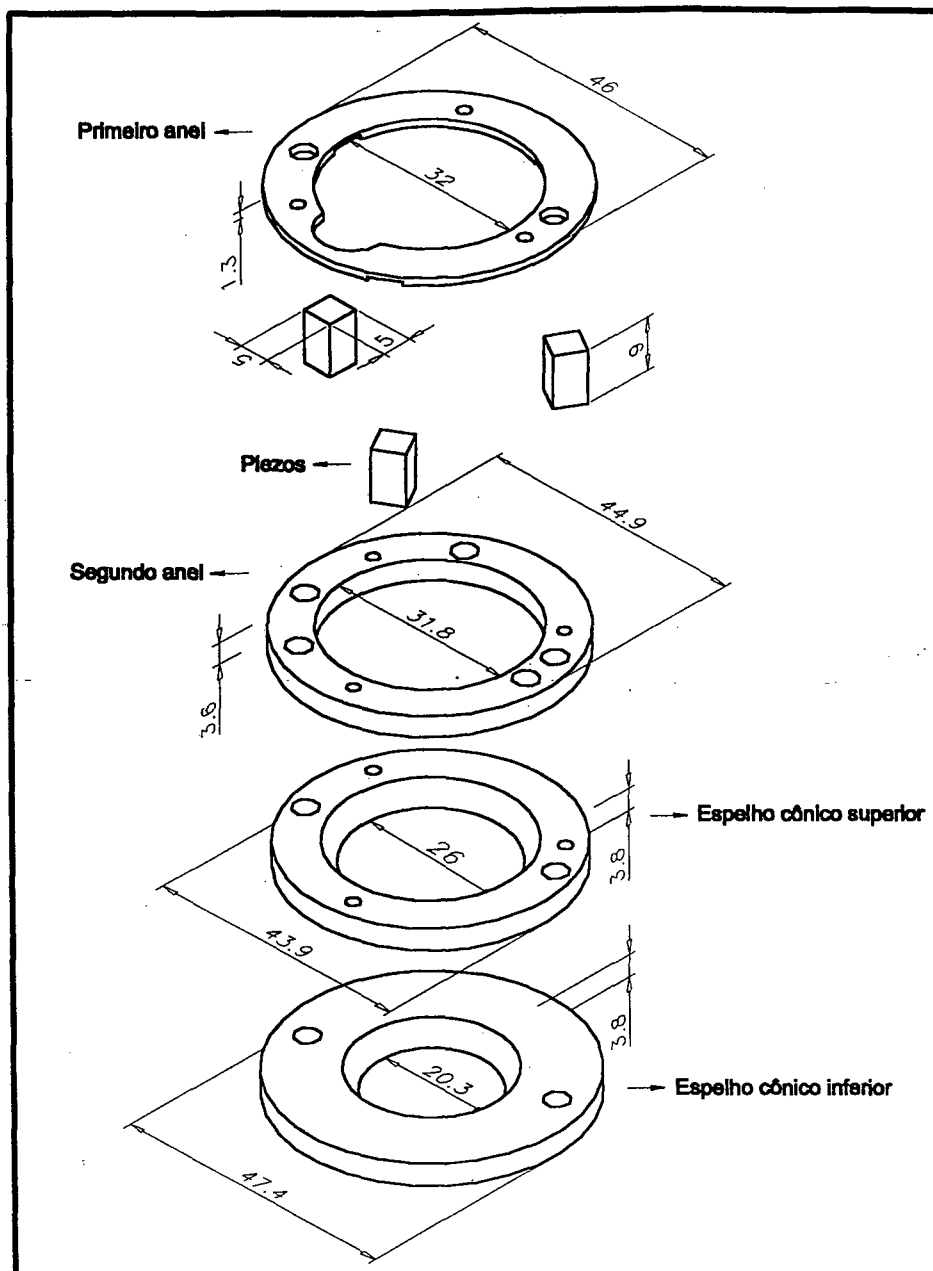


Figura 4.7 – Subsistema de deslocamento de fase

4.3.5 Furação

A furação é realizada com o auxílio de uma turbina pneumática de alta rotação (320.000 rpm) em conjunto com uma fresa de topo cônico-invertida de 1,6 mm de diâmetro, revestida com nitreto de titânio. Tal configuração permite a execução do furo com uma menor introdução de tensões residuais adicionais à peça analisada [4].

O subsistema de furação (figura 4.8) é constituído pelos seguintes elementos:

- a) turbina pneumática de alta rotação;

- b) bucha de deslizamento;
- c) guia linear de esferas;
- d) motor de passo e fuso;
- e) chave optoeletrônica.

A turbina pneumática está inserida no interior de uma bucha de deslizamento fabricada em aço ferramenta V6 e que apresenta uma dureza de aproximadamente 63 R_c. Tal bucha desliza no interior de uma guia linear de esferas¹, permitindo um deslocamento suave e contínuo do conjunto. A centragem da turbina em relação à bucha é feita com o auxílio de um relógio comparador e de uma base em forma de “V” (figura 4.9).

Utilizando a base em “V” como apoio, gira-se a turbina de 360°, enquanto o relógio comparador (devidamente fixado) indica a diferença entre os pontos de maior e menor afastamento da superfície cilíndrica da turbina em relação ao zero do relógio. Ajustando-se os parafusos de fixação da turbina existentes na bucha de deslizamento, é possível deslocar a turbina até que o comparador forneça indicações muito próximas de zero.

O motor de passo e seu fuso estão conectados à turbina por meio de um manípulo cuja função é permitir a troca da fresa a cada novo furo realizado. O motor de passo apresenta duas configurações possíveis de avanço: passo de 50 µm ou passo de 25 µm. Os testes preliminares indicaram que o passo de 25 µm é mais conveniente, no sentido de evitar travamentos da turbina ou mesmo lascamento do gume da ferramenta.

O primeiro estágio do processo de furação é dotar o motor de passo de uma referência eletrônica, para que seja possível identificar a posição em que o conjunto de furação se encontra em determinado momento. Para tanto, é necessário fazer com o que o fuso passe através de uma chave optoeletrônica existente na parte inferior do sistema. O sinal digital emitido pela mesma é monitorado e assim que o fuso interrompe o feixe de luz existente entre os led's emissor e o receptor presentes na chave, o sistema está apto a iniciar a furação. Essa etapa de “calibração” da posição do motor é feita sem a intervenção do usuário.

¹ A guia linear de esferas utilizada é fabricada pela INA Rolamentos e faz parte da linha comercial de produtos da empresa.

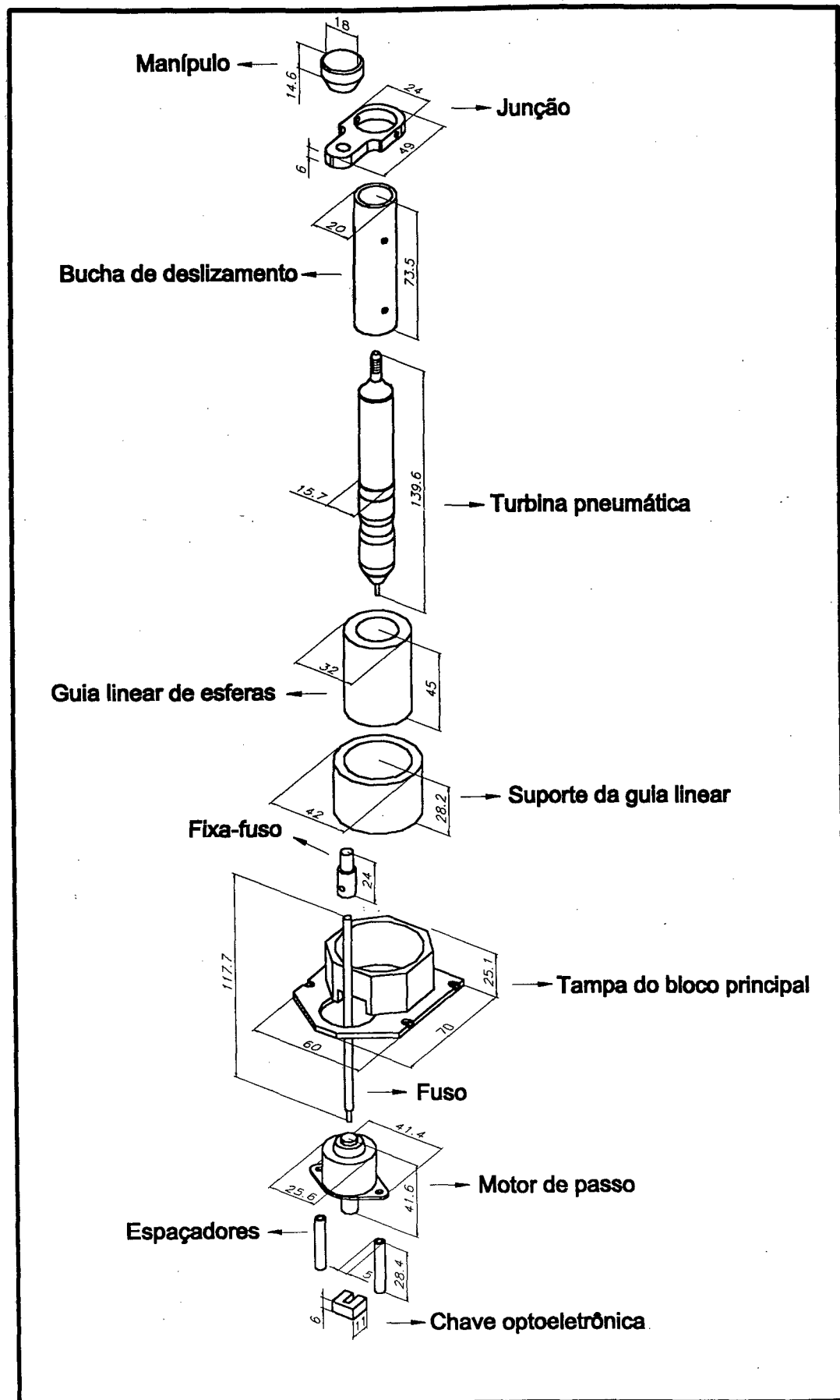


Figura 4.8 – Subsistema de Furação

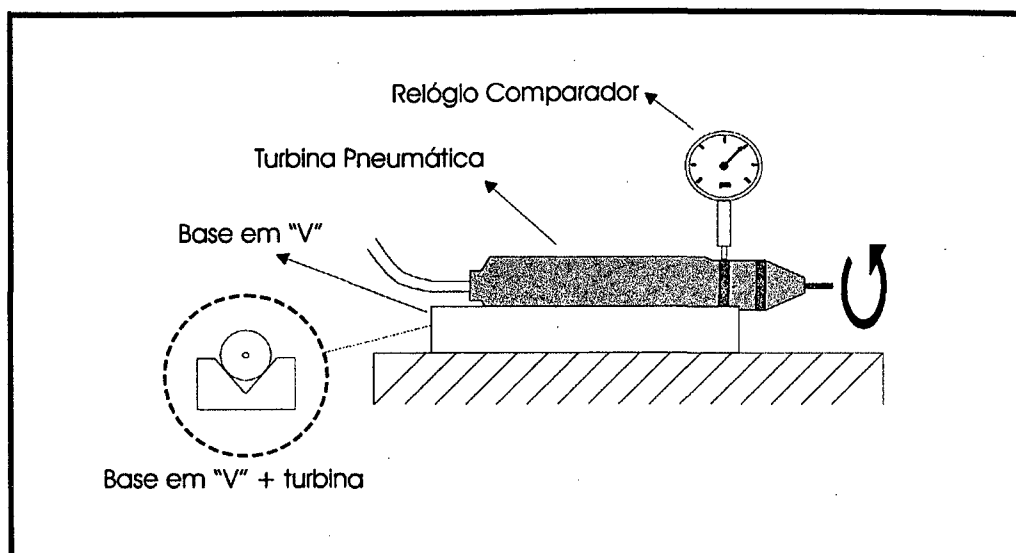


Figura 4.9 – Centragem da turbina em relação à bucha

O programa inicializa o motor, movimenta-o, busca a chave optoeletrônica e retorna à posição de espera automaticamente.

Quando do início do processo de furação, o motor é acionado e o fuso desce, trazendo com ele o conjunto de furação (turbina + bucha de deslizamento). O acionamento do suprimento de ar é manual e depende da intervenção do operador. Assim que a ferramenta toca a peça, o padrão de ruído emitido pelo conjunto muda, indicando que a posição “zero-peça” foi alcançada. Partindo desse ponto, o sistema continua automaticamente a furação, com velocidade reduzida, até a profundidade de 2 mm. Após isso, a turbina é elevada até a posição inicial, possibilitando a aquisição das imagens. A velocidade de avanço depende da dureza do material que está sendo furado. Ensaios preliminares indicam que as velocidades de furação razoáveis para aço 1020 e aço 1045 são de aproximadamente 12,5 $\mu\text{m}/\text{m}$ e 2,5 $\mu\text{m}/\text{m}$ respectivamente.

Para a determinação do perfil de tensões residuais ao longo da profundidade, a furação não é realizada em uma única operação e sim, em várias etapas, durante as quais são removidas pequenas parcelas de material. Após cada passo de furação, uma nova imagem, correspondente ao deslocamento medido é adquirida e gravada pelo computador. Ao final do processo, tem-se o histórico dos deslocamentos decorrentes após cada passo da furação, o que permite calcular o valor das tensões residuais ao longo de cada valor de profundidade. No processo de furação incremental, fica evidenciada a vantagem da

utilização do motor de passo, uma vez que a turbina deve ser elevada diversas vezes no decorrer da medição. Caso o processo fosse manual, haveria a tendência de perda de correlação das imagens, provocada pela intervenção do operador durante o avanço e recuo da turbina.

A troca da ferramenta é realizada através da remoção da turbina do interior do sistema e pelo giro de uma contra-porca integrada à mesma, o que permite a expulsão da fresa de seu habitáculo de fixação.

4.3.6 Medição do Diâmetro do Furo

Medir o diâmetro do furo executado pela fresa de topo é muito importante, uma vez que tal informação é empregada na formulação matemática do método do furo. O valor do diâmetro deve ser conhecido com uma incerteza muito pequena, de forma a não introduzir erros significativos nos valores de tensão residual calculados.

A medição é feita por um segundo módulo independente, aqui denominado "Mede-Furo" (figura 4.10). Tal módulo foi desenvolvido com o intuito de simplificar a tarefa de medir o diâmetro do furo e também tornar menos complexo o projeto do módulo principal (MTRES).

A operação conjunta dos dois módulos é relativamente simples: na primeira etapa, a medição dos deslocamentos resultantes do alívio das tensões é feita pelo MTRES. Nessa fase, o furo é realizado e as imagens são adquiridas. Na segunda parte da medição, o MTRES é removido da posição de medição e em seu lugar, é posicionado o Mede-Furo, utilizando o mesmo sistema de fixação para ambos os módulos. Uma vez nessa situação, o diâmetro do furo é medido.

O funcionamento do medidor consiste no seguinte: uma câmera CCD, semelhante à utilizada no MTRES, focaliza o furo realizado através de uma bucha com duas lentes de diâmetro 6 mm. A distância focal é garantida por dois espaçadores de alumínio com 60 mm de comprimento. A iluminação é realizada por dois led's infravermelhos localizados na parte inferior da carcaça do medidor. Os led's são alimentados, em paralelo, pelo mesmo driver que alimenta o laser diodo.

O posicionamento é facilitado pelo deslizamento das presilhas do Mede-Furo ao longo do comprimento das hastes de fixação que foram presas à superfície na etapa anterior, ou seja, quando da realização do furo e medição dos deslocamentos.

Nas figuras 4.11 e 4.13, respectivamente, pode-se visualizar uma vista explodida dos componentes dos subsistemas de iluminação e de visualização do Mede-Furo.

A imagem do furo é tratada através de um algoritmo, que combina técnicas de processamento de imagem com o método dos mínimos quadrados. Inicialmente, o algoritmo executa um mapeamento de toda a imagem, procurando identificar pontos que pertençam à borda do furo. Uma busca iterativa da posição do centro e do diâmetro do furo

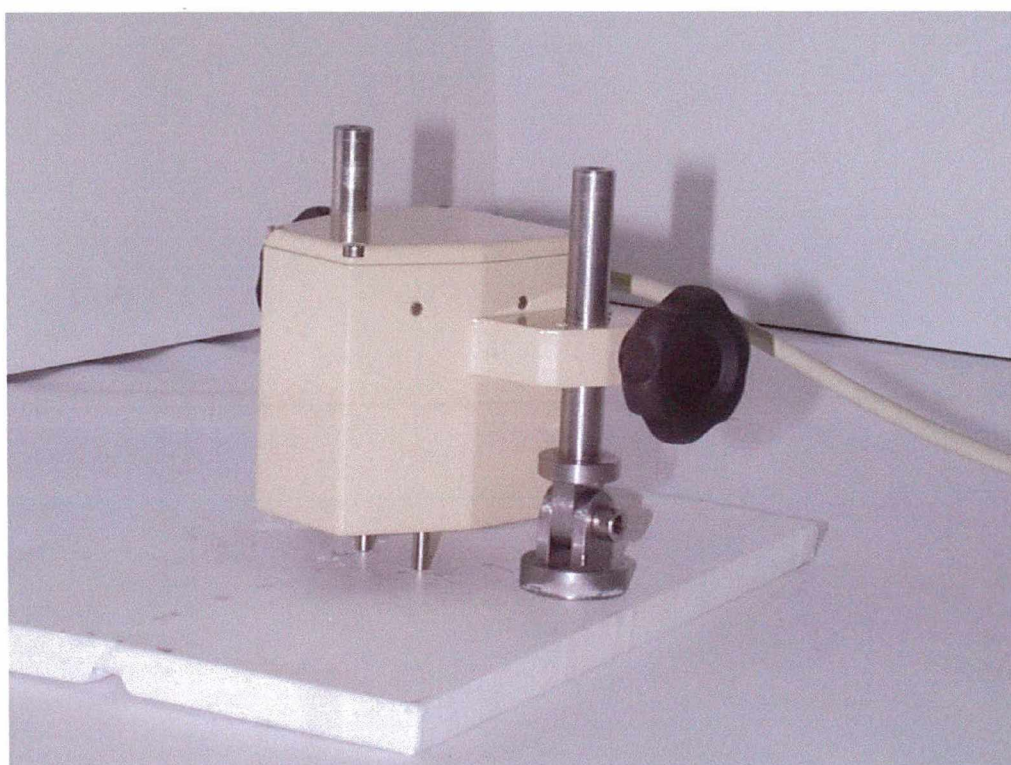


Figura 4.10 – Medidor do diâmetro do furo

é então realizada, utilizando-se de retas auxiliares e operações de filtragem e planificação da imagem. O diâmetro do furo é encontrado após aproximadamente 3 segundos de processamento.

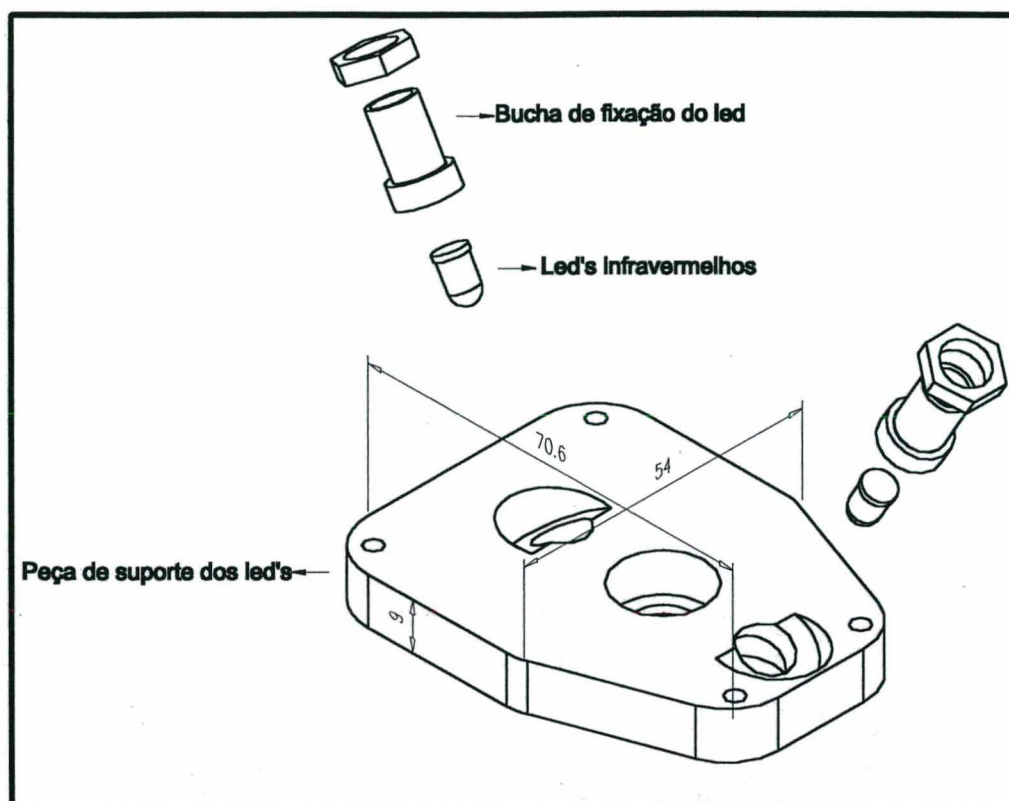


Figura 4.11 – Subsistema de iluminação

Basicamente, o algoritmo adquire a imagem do furo, que tem seu contraste intensificado artificialmente por operações de processamento de imagem (figura 4.12).

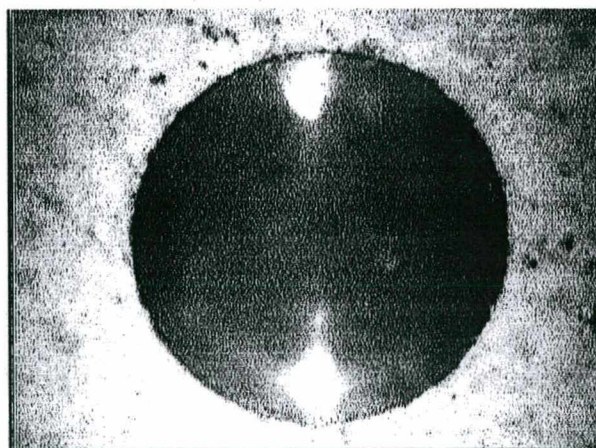


Figura 4.12 – Imagem com escala de nível de cinza modificada

O próximo passo é a definição de uma reta horizontal auxiliar, que corta a borda do furo em dois pontos. O nível de cinza ao longo de tal reta é monitorado e a derivada espacial

desse valor calculada e filtrada, obtendo-se dois picos, um máximo e um mínimo, que correspondem às transições do escuro para o claro e do claro para o escuro respectivamente.

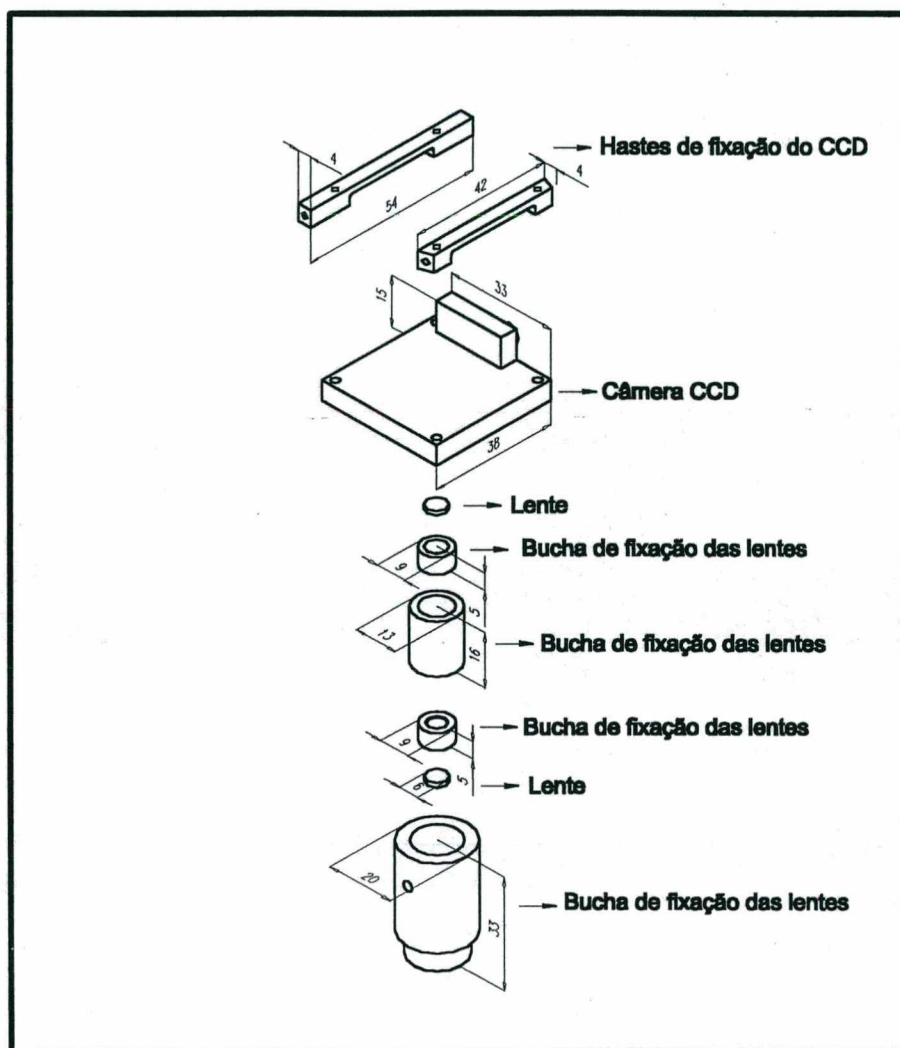


Figura 4.13 – Subsistema de visualização do Mede-Furo

A média aritmética das coordenadas desses dois pontos de transição fornece as coordenadas de um terceiro ponto, pelo qual é traçada uma reta perpendicular à primeira. O nível de cinza ao longo de tal reta é novamente monitorado, fornecendo dois novos picos de transição e outro ponto médio correspondente à média das coordenadas dos dois novos picos. Uma nova reta horizontal é traçada, passando por esse ponto e o mesmo processo se repete. A partir daí, as coordenadas do centro do furo e seu raio são estimados.

A partir destes dados aproximados, uma região anular, concêntrica ao furo, com um raio mínimo um pouco menor que o raio estimado e raio máximo um pouco maior, é planificada e um filtro passa baixas é aplicado, resultando em imagens semelhantes à mostrada na figura 4.14. Após a filtragem, a imagem é novamente remapeada para seu domínio original e assume o aspecto mostrado na figura 4.15.

Sobre essa imagem, são traçadas 360 retas radiais ao longo do furo, tendo como referência o valor estimado do raio. Ao longo de cada reta, é calculado o nível de cinza e sua derivada, tomando-se apenas os pontos de transição bem definidos. A partir daí, uma média aritmética é realizada e o método dos mínimos quadrados é empregado na determinação de um valor final definitivo para o raio.

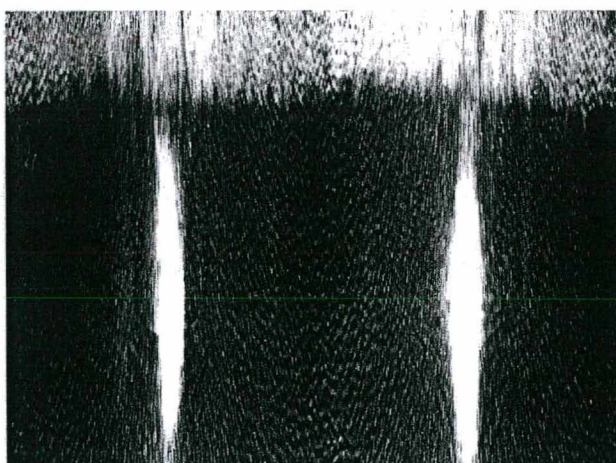


Figura 4.14 – Imagem planificada da região anular

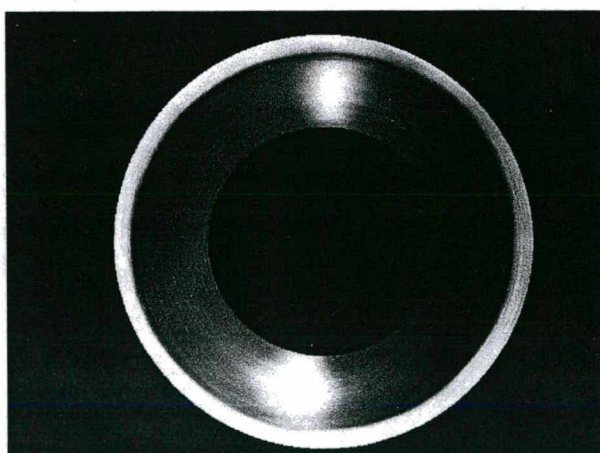


Figura 4.15 – Imagem filtrada e remapeada para a região anular

Uma avaliação dos resultados de medição obtidos com o Mede-Furo será feita no capítulo 5.

4.4 Operacionalização

A montagem do sistema exigiu uma série de pequenos procedimentos no sentido de alinhar, fabricar e fixar os mais diversos componentes utilizados. Algumas peças auxiliares foram usinadas para facilitar a execução dessas tarefas.

4.4.1 Alinhamento dos Espelhos Cônicos

O alinhamento do conjunto de espelhos cônicos foi feito através de dois pinos-guia de aço inox retificado, que permitiram o posicionamento de todos os quatro anéis de forma muito rápida e eficiente. Esse método de alinhamento requer que os furos de passagem dos pinos sejam de boa qualidade geométrica e superficial, além exigir uma baixa incerteza de posicionamento. Para atender a tais requisitos, os quatro anéis foram furados durante a mesma operação, numa fresadora cuja incerteza de posicionamento se encontrava na faixa de $\pm 0,03$ mm. As ferramentas empregadas (brocas e alargadores) eram novas, de forma a garantir a qualidade interna dos furos.

Após a furação, os anéis foram posicionados no interior do MTRES. O primeiro anel, dotado de três rebaixos, abriga os atuadores piezoelétricos. A fixação deste ao bloco foi feita por meio de três parafusos. Os atuadores então foram colados aos rebaixos. O próximo passo foi a inserção dos pinos-guia nos furos do primeiro anel, que guiaram o segundo anel durante a colagem deste aos atuadores. A colagem foi realizada e o espelho cônico superior foi aparafusado ao segundo anel, após ter deslizado pelos pinos-guia. A última etapa foi o posicionamento e colagem do espelho cônico inferior, cujo posicionamento foi garantido pelos pinos-guia. A colagem do espelho se deu pelo gotejamento de adesivo líquido na folga existente entre o mesmo e a carcaça. Após a colagem, a remoção dos pinos foi realizada com a ajuda de um pequeno alicate de bico.

4.4.2 Colagem do Espelho Furado

A colagem do espelho furado foi feita com o auxílio de um gabarito de cobre, usinado de forma a se encaixar no furo destinado aos espelhos cônicos. O objetivo principal do gabarito é garantir o posicionamento do espelho plano furado em relação aos espelhos cônicos e ao restante da óptica.

4.4.3 Alinhamento dos Componentes Ópticos

O principal problema de alinhamento de componentes ópticos residiu no posicionamento da esfera em relação ao laser diodo, devido à elevada perda de potência luminosa provocada por pequenos desalinhamentos entre essas duas peças. O alinhamento foi feito com um cartão especial, sensível à luz infravermelha, no qual foi incidida a luz proveniente da esfera. Girando-se os parafusos de ajuste existentes na carcaça de suporte do laser, chegou-se a uma posição do diodo na qual a saída de luz era máxima, indicando que o travamento do laser poderia ser realizado.

No que concerne aos demais componentes (lente colimadora e espelho plano) não houve problemas com o alinhamento, pois a própria concepção mecânica do bloco garantiu um ótimo pré-alinhamento de ambos, apenas exigindo pequenos deslocamentos no sentido de obter a distância focal e ângulos corretos para a colimação da luz.

4.4.4 Alinhamento do Conjunto de Furação

Um importante requisito de montagem do conjunto de furação é que a turbina esteja bem alinhada mecanicamente com os espelhos cônicos, de forma que os furos cegos realizados estejam posicionados no centro geométrico do conjunto de espelhos e, conseqüentemente, no centro da região de medição.

Para realizar tal alinhamento, utilizou-se um gabarito de cobre semelhante ao empregado para o alinhamento do espelho plano furado. A única diferença é que o comprimento da haste era de 250 mm. O maior diâmetro do gabarito se encaixa na cavidade dos espelhos cônicos e em sua haste desliza a guia linear de esferas, permitindo assim a centragem da mesma em relação aos espelhos. Como a bucha da turbina desliza na mesma guia linear, o alinhamento da turbina em relação aos espelhos é assegurado.

4.4.5 Remoção do Cavaco

A furação com ferramenta de alta rotação origina cavaco na forma de pó metálico de granulometria e massa muito reduzidas. Esse pó pode ser transportado pelo ar comprimido empregado no sistema a qualquer parte do ambiente externo e mesmo para o interior do medidor. Lá dentro, deposita-se sobre espelhos e lentes, reduzindo a percentagem de luz refletida e aumentando a probabilidade de existência de danos à superfície dos mesmos devido a riscos. Outro problema oriundo da presença do cavaco é a mancha escura por ele provocada nas proximidades da borda do furo. Tal mancha adere à tinta e não é removida facilmente, causando perda de correlação da imagem e inutilização do ensaio.

No sentido de eliminar o problema, a primeira idéia a ser testada foi a utilização de bicos de ar comprimido com o jato direcionado ao centro dos espelhos (figura 4.16).

Simulada e aprovada em laboratório, a solução foi implementada. Entretanto, já no início dos testes com o MTRES, percebeu-se que os bicos de ar apresentavam dois sérios inconvenientes. O primeiro estava relacionado à rápida perda de correlação das imagens provocada pelos jatos de ar sob alta pressão e o segundo trata-se da ineficiência dos bicos em evitar a entrada do pó através dos espelhos cônicos.

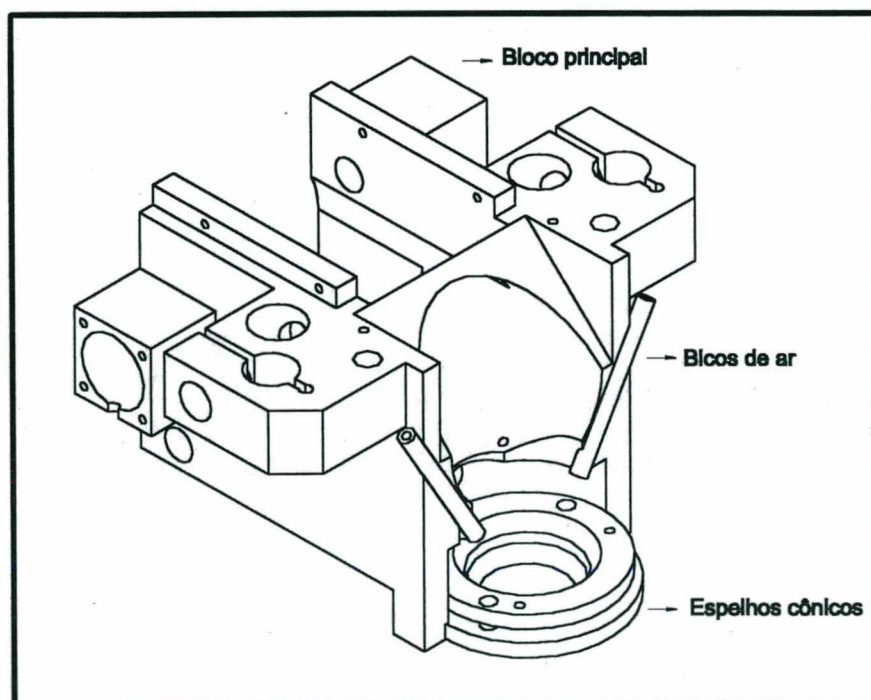


Figura 4.16 – Remoção de cavaco por bicos de ar comprimido

Diante dessa situação, uma outra solução foi testada (figura 4.17). Trata-se de uma peça cônica usinada em poliacetal, que, presa à ponta da turbina pneumática, bloqueia a entrada das partículas com alta velocidade vindas do furo.

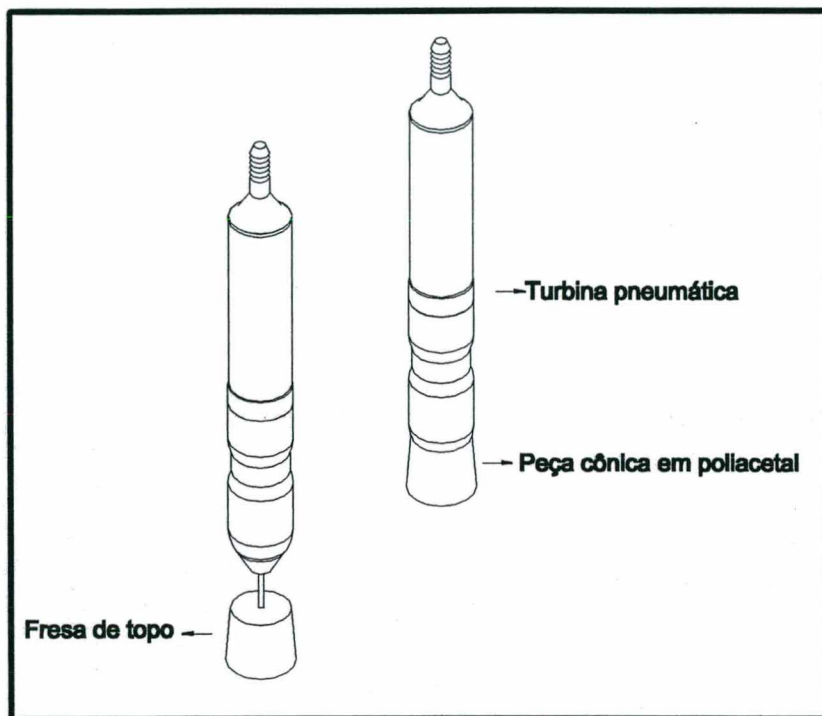


Figura 4.17 – Turbina pneumática acoplada à peça de poliacetal

Apesar de ter reduzido a quantidade de pó no interior do medidor e sobre os espelhos cônicos, essa solução não eliminou o problema por completo. Após algumas furações, ainda foi necessário remover o pó do interior do sistema com ar comprimido. Melhoramentos futuros devem ser realizados no sentido de dotar o medidor de um mecanismo simples, mas ao mesmo tempo eficiente para a eliminação do cavaco.

4.5 Algoritmo para Quantificação de Tensões Residuais

O algoritmo em uso no MTRES, empregado na quantificação de tensões residuais a partir de mapas de diferença de fase, evoluiu de versões anteriores que, devido ao nível de ruído elevado presente nas imagens, não apresentavam resultados confiáveis. O novo algoritmo se mostrou bastante robusto, fornecendo resultados repetitivos mesmo com imagens com elevado nível de ruído. As operações realizadas pelo algoritmo serão aqui detalhadas:

A primeira operação a ser executada é a planificação da imagem, isto é, o mapeamento geométrico da imagem na região anelar em torno do furo em uma imagem retangular. O mapa de diferenças de fase de tensão residual normalmente apresenta grande densidade de franjas nas proximidades da borda do furo. A planificação modifica a distribuição das franjas, tornando-as mais regularmente distribuídas, facilitando a execução das tarefas subseqüentes de processamento de imagens. A planificação também facilita a implementação computacional de algoritmos de processamento de imagens quando o domínio da área de análise é retangular .

Após a planificação, a imagem se apresenta em uma região retangular com 1024 pixels na horizontal e 256 na vertical. O eixo horizontal corresponde ao ângulo θ da coordenada polar (variando entre 0 e 360°) e o eixo vertical ao inverso raio normalizado ($1/r$). Observando-se a equação (2.8), é possível compreender a vantagem em ter $1/r$ como um parâmetro de linearização. Os termos $A_u(r)$ e $B_u(r)$ são funções de $1/r$, o que facilita operações posteriores de ajuste da imagem à equação (2.8) para a determinação das duas tensões principais e de seu ângulo e deixa as franjas distribuídas de maneira mais uniforme.

A próxima etapa é a primeira remoção do salto de fase, com a componente de translação ainda presente. A tarefa é realizada por um algoritmo desenvolvido por [47], que divide a imagem em vários elementos retangulares (neste caso em 128 na direção horizontal e 16 na direção vertical). Tais elementos, devem apresentar variações do nível de cinza muito pequenas, nunca excedendo uma ordem de franja dentro de suas fronteiras individuais. A remoção da translação de corpo rígido presente na imagem inicial planificada é a próxima fase do processamento. O procedimento consiste em procurar, entre as 16 linhas existentes na direção vertical da imagem, uma que tenha tido o salto de fase removido com sucesso, o que é detectado em função do menor valor de resíduo do erro quadrático em relação aos seus dois primeiros harmônicos. Uma vez escolhida a linha, calcula-se os coeficientes do primeiro harmônico da série de Fourier a partir do sinal dessa linha. A componente de corpo rígido está presente nestes coeficientes e pode ser convenientemente subtraída de toda a imagem do sinal original.

A operação subseqüente é a segunda remoção de salto, agora da imagem isenta de franjas de deslocamento de corpo rígido. O processo adotado é o mesmo utilizado anteriormente, tendo como diferença o número de elementos presentes da imagem. Esse parâmetro é

ajustável pelo usuário e fica, normalmente, em torno de 48 elementos na horizontal e 8 na vertical. Essa redução se justifica pela característica do algoritmo em se mostrar menos sensível ao ruído presente nas imagens quando elementos de maior tamanho são utilizados na remoção de salto desde que não seja violada a regra de que cada elemento não pode ter variações superiores a uma ordem de franja.

Removido o salto de fase pela segunda vez, a equação (2.8) é ajustada à imagem por meio do método dos mínimos quadrados, permitindo encontrar os valores do ângulo (β) e da diferença das tensões principais ($\sigma_1 - \sigma_2$). Os resultados obtidos através dessa operação são muito confiáveis e repetitivos, o que já não ocorre com a termo correspondente à soma das tensões ($\sigma_1 + \sigma_2$), que apresenta uma dispersão muito grande. Para contornar esse problema, a solução empregada foi a de subtrair o termo dependente de $\cos(2\theta - 2\beta)$ da imagem, obtido do ajuste pelo método dos mínimos quadrados, e novamente processar a imagem resultante, que conterá apenas o termo relativo à soma das tensões. Uma nova imagem então é obtida e o salto de fase novamente removido, agora com 9 elementos na direção horizontal e 5 na vertical.

Finalmente, o nível de cinza médio das colunas da imagem obtida varia de forma linear com o inverso do raio, originando uma reta cujo coeficiente angular é proporcional ao valor de $\sigma_1 + \sigma_2$. Este procedimento, embora envolva uma série de etapas, tem se mostrado na prática muito robusto.

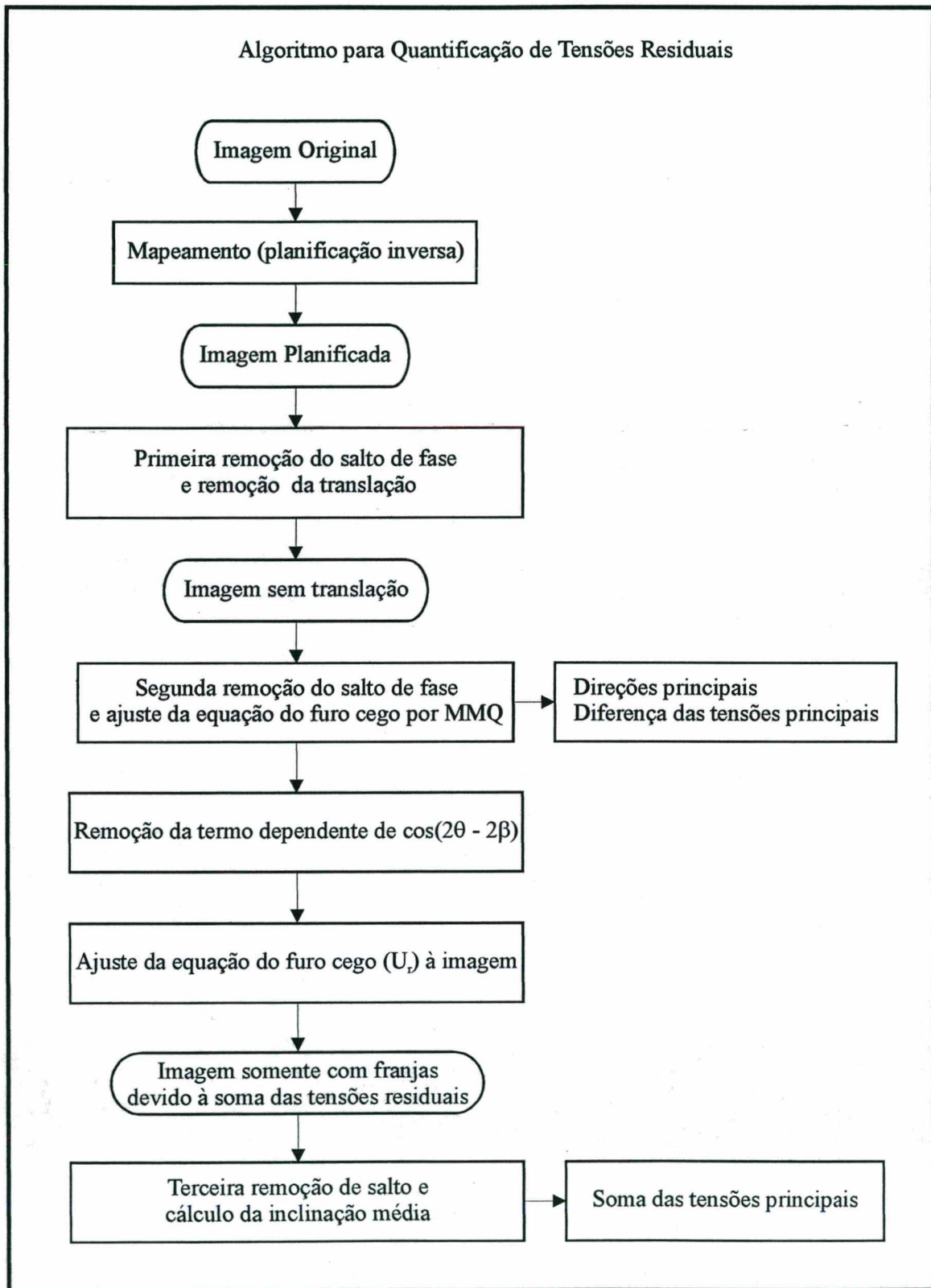


Figura 4.18 – Fluxograma do processo de cálculo de tensões residuais

Capítulo 05

Avaliação do Medidor de Tensões Residuais

e do

Medidor de Diâmetro de Furos

Após a montagem e operacionalização do protótipo do MTRES, testes e medições foram realizados objetivando avaliar seu comportamento operacional e metrológico. De modo a permitir uma avaliação mais abrangente, ensaios foram efetuados em laboratório e em campo.

Com o módulo "Mede-Furo" também foram realizados alguns testes, de modo a estimar a incerteza do processo de medição do diâmetro do furo.

5.1 Medidor de Tensões Residuais

5.1.1 Medições em Laboratório

Os ensaios de laboratório consistiram na realização de medições em discos de aço, carregados no **dispositivo simulador de campos de tensões biaxiais** [16]. Este dispositivo (figura 5.1) gera campos de tensões mecânicas bem conhecidas nos discos, submetidos a um carregamento mecânico por meio de um atuador hidráulico. Uma vez que tais discos são tratados termicamente para minimizar o nível de tensões residuais iniciais,

as tensões mecânicas geradas se comportam da mesma forma que tensões residuais. Pode-se dizer então, que este dispositivo simula tensões residuais conhecidas.

O sistema de carregamento é simples, assemelhando-se a um macaco hidráulico: o giro de um manípulo provoca a movimentação de um pequeno pistão e conseqüentemente a aplicação de uma pressão sobre o óleo. Um segundo pistão, de maior área em relação ao primeiro, está em contato com o fluido hidráulico, permitindo a amplificação do carregamento em cerca de 13 vezes.

A escolha de um mecanismo hidráulico para a aplicação da carga axial se justifica pelo nível de carregamento em questão: a carga máxima aplicada é de aproximadamente 30 kN. Caso uma configuração puramente mecânica fosse empregada, problemas com atrito prejudicariam sobremaneira o desempenho do dispositivo, principalmente quanto à repetitividade do valor de força.

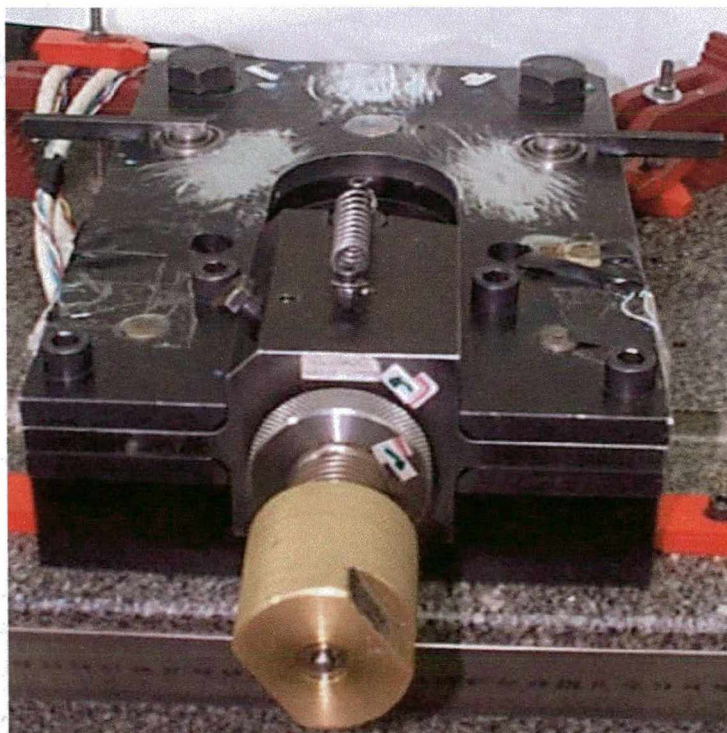


Figura 5.1 – Dispositivo Simulador de Campos de Tensões Biaxiais

O dispositivo opera em duas configurações diferentes em relação aos apoios do disco: diametral, tendo os apoios na direção da força aplicada (situação A) e tri-apoiada, com três apoios defasados de 120° (situação B)(figura 5.2) [17].

O valor de referência para a aplicação de carregamento foi dado pelos extensômetros ligados em ponte completa e colados à estrutura do dispositivo. Esse valor corresponde ao valor não calibrado da deformação equivalente da ponte completa, proporcional à força aplicada pelo dispositivo. Para os carregamentos dos discos, adotou-se o valor de $260 \mu\epsilon$ como limite.

5.1.1.1 Procedimento de Ensaio

O procedimento de ensaio consistiu nos seguintes passos:

a) Preparação dos corpos de prova a serem medidos;

Os corpos de prova empregados foram discos de aço 1020 e 1045 (figura 5.3), com 5 mm de espessura e 100 mm de diâmetro. Tais discos foram recozidos por 4 horas a uma temperatura de 650°C , de forma a aliviar as tensões residuais iniciais presentes.

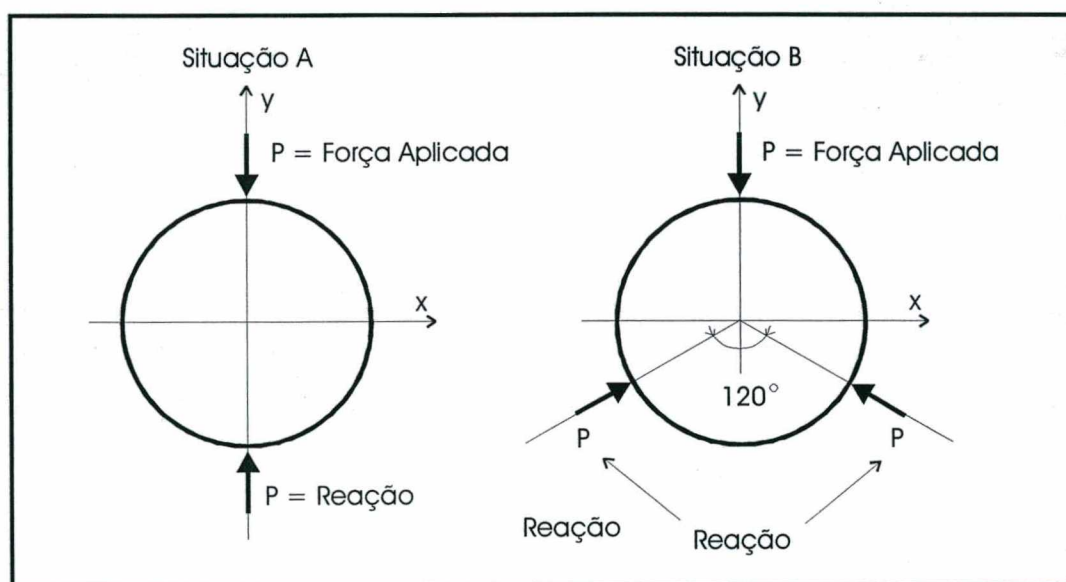


Figura 5.2 – Configurações possíveis de carregamento

As superfícies dos discos foram retificadas, além de terem recebido uma camada de tinta “spray” branca fosca de secagem rápida, para facilitar a medição com holografia eletrônica. O centro dos discos foi marcado nas duas superfícies a serem furadas por meio de um esquadro de centragem.

b) Posicionamento do Disco;

O disco foi posicionado no interior da estrutura do dispositivo e alinhado com auxílio de três esferas de aço. A configuração de carregamento diametral foi empregada, pois as calibrações iniciais mostraram que, nesta configuração, o dispositivo apresenta menor incerteza.

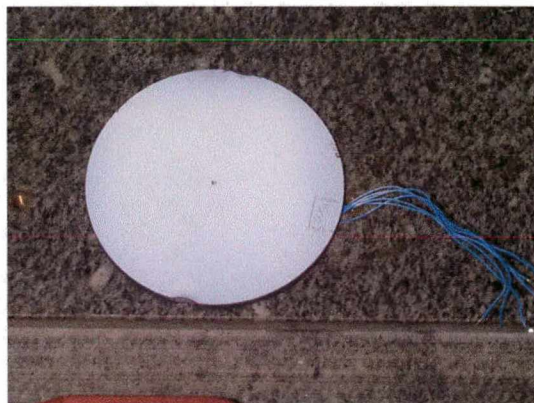


Figura 5.3 – Corpo de prova utilizado

c) Carregamento

Uma vez realizado o posicionamento, iniciou-se a aplicação da carga sobre o disco de aço. O tipo de carregamento empregado foi o diametral, correspondendo ao tipo A detalhado anteriormente. A deformação do dispositivo foi continuamente monitorada (via extensômetros de resistência), de forma a evitar que um carregamento muito elevado viesse a causar danos à estrutura do dispositivo.

O primeiro passo foi aproximar o atuador hidráulico do corpo de prova utilizando o ajuste grosso do sistema hidráulico. Girou-se então o manípulo metálico (ajuste fino) até que a deformação alcançasse o valor de $260 \mu\text{m/m}$. Esse é o valor de referência de carga. O amassamento das bordas do disco nas regiões de contato indica plastificação localizada do material. Isso não chega a constituir um problema, pois a zona de plastificação está suficientemente longe da região de medição.

d) Preparação do MTRES;

O alinhamento foi realizado pela movimentação do MTRES por sobre a chapa superior do dispositivo até que a marcação do centro do disco coincidissem com o centro da imagem (indicado por um cursor diretamente na tela). É importante observar que, como o disco se

move durante a etapa de carregamento, o alinhamento definitivo e a colagem do MTRES à estrutura devem ser realizados apenas após a carga desejada já ter sido aplicada.

As sapatas do medidor foram coladas à estrutura do dispositivo, para proporcionar uma fixação mais rígida (figura 5.4).

Um tempo de espera de aproximadamente 20 minutos foi adotado, objetivando permitir a secagem da cola das sapatas e a estabilização do estado de deformações no disco.

Normalmente, a estabilização do laser diodo também é alcançada nesse espaço de tempo, uma vez que, geralmente, 15 minutos são suficientes para que o mesmo possa ser utilizado nas medições de maneira eficaz.

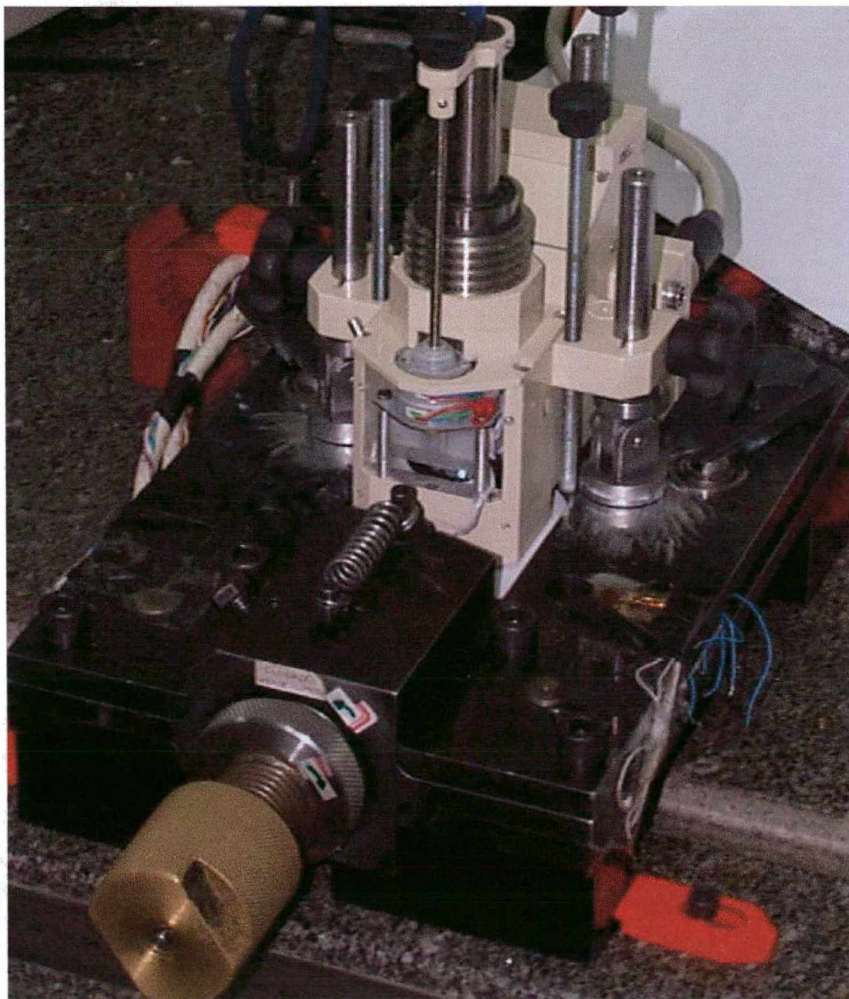


Figura 5.4 – Conjunto MTRES/Dispositivo simulador de campos de tensões biaxiais

e) Medição

Após transcorrido o tempo de estabilização, as medições tiveram início.

O primeiro passo foi a aquisição da imagem referente ao estado inicial do disco.

A furação foi realizada com uma fresa de topo nova, de forma a evitar vibrações da turbina e conseqüente perda da qualidade da geometria do furo resultante.

A aquisição da segunda imagem, referente ao estado final, foi realizada assim que a turbina foi elevada à posição superior.

A subtração dos dois mapas de fase adquiridos foi então realizada para a obtenção do mapa da diferença de fase, necessário ao cálculo das tensões residuais.

5.1.1.2 Resultados Obtidos

De um modo geral, os resultados obtidos podem ser analisados de duas formas: em relação à qualidade das imagens obtidas e em relação ao valor numérico referente às tensões residuais medidas. Na realidade, há uma interligação evidente de ambas, uma vez que a qualidade da imagem afeta de forma significativa a incerteza do valor numérico obtido. Nas medições realizadas com o dispositivo padrão, foram testados 5 discos de aço 1020 e 2 discos de aço 1045. Os dois lados dos discos foram furados, de forma a aumentar o número de ensaios e resultados obtidos. Algumas das imagens resultantes podem ser visualizadas nas figuras 5.5 a 5.10.

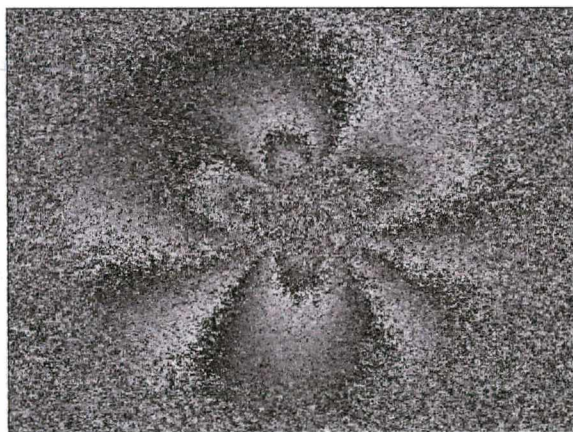


Figura 5.5 - Disco 1 _ preliminar

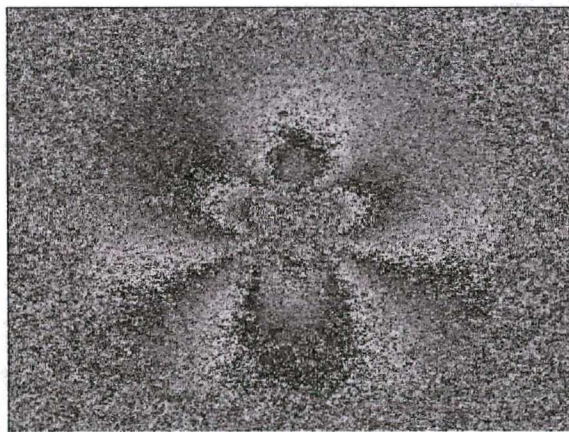


Figura 5.6 - Disco 1 _ lado2

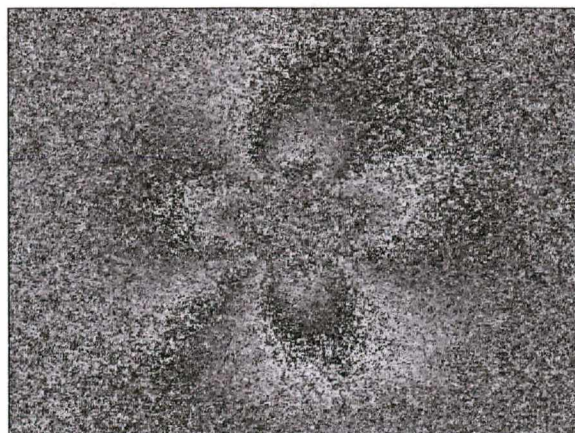


Figura 5.7 - Disco 2 _ lado1

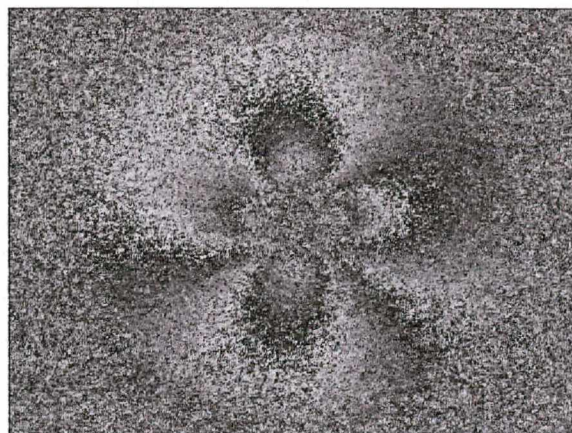


Figura 5.8 - Disco 2 _ lado2



Figura 5.9 - Disco 5

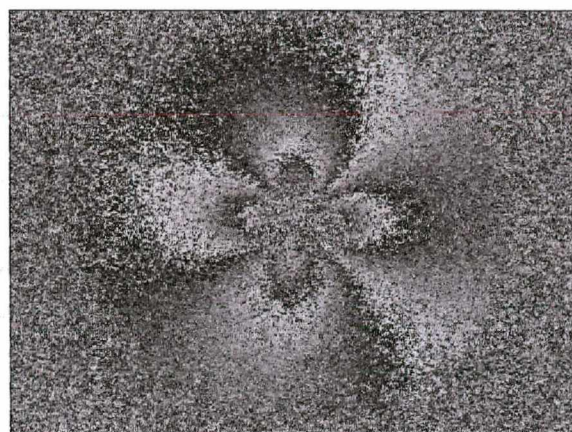


Figura 5.10 - Disco 6

Tais imagens correspondem aos campos de deslocamentos radiais resultantes do alívio de tensões causados pela remoção de material durante a furação.

Os valores de tensão calculados para algumas das imagens podem ser vistos na tabela 5.1:

	Disco1/lado2	Disco2/lado1	Disco2/lado2	Disco 6
Média de σ_1 (MPa)	54.7	67.7	52.7	64.1
s de σ_1 (MPa)	0.7	1,6	1.4	0.9
Média de σ_2 (MPa)	-59.4	-52.7	-60.8	-41.9
s de σ_2 (MPa)	0.4	1.2	5.0	0.9

Tabela 5.1 – Resultados obtidos com o MTRES em laboratório

Onde σ_1 e σ_2 são as tensões principais e “s” é o desvio padrão experimental.

Os resultados mostram diferenças razoáveis entre os valores médios das tensões principais encontrados para cada disco. Como os testes e avaliações do dispositivo de carregamento não haviam sido ainda concluídos, torna-se difícil dizer se essa variação é principalmente causada por problemas de repetitividade do dispositivo de carregamento, problemas de posicionamento dos discos, tensões residuais iniciais nos corpos de prova ou se o responsável é o próprio sistema de medição de tensões residuais. Todavia, observando-se a dispersão dos dados experimentais de um mesmo disco quando comparada às diferenças entre os valores médios dos discos, tende-se a acreditar que a principal causa está ligada a possíveis variações mecânicas no carregamento aplicado em cada disco.

Entretanto, um fato animador é exatamente a pequena dispersão existente em relação aos valores obtidos para as tensões em um mesmo disco. Os desvios padrões obtidos indicam que o nível de erro aleatório é razoavelmente baixo. Isso está diretamente ligado à robustez do algoritmo implementado, uma vez que os valores de tensão calculados tiveram uma variação muito pequena mesmo quando foi provocada uma ampla variação dos parâmetros de processamento das imagens. Significa que, com a qualidade das imagens obtida, é possível obter resultados repetitivos e de baixo erro aleatório. É possível visualizar através das figuras 5.11, 5.12, 5.13 e 5.14, a distribuição das tensões principais em relação à média, em função da variação dos parâmetros de processamento. Tais parâmetros são o número de elementos na direção circunferencial (C) e radial (R) utilizados durante o processo de remoção de salto de fase das imagens. Na direção circunferencial, os parâmetros variam desde 128 até 12 e na radial, de 20 a 4. No caso dos discos de aço, utilizando-se combinações de parâmetros consideradas razoáveis (acima de 16 elementos na direção circunferencial e 16 na radial), o desvio padrão médio encontrado foi de 2,7%, o que é plenamente aceitável no caso de medição de tensões residuais.

Em relação ao erro sistemático, não é possível afirmar nada, uma vez que o dispositivo de carregamento ainda se encontrava na fase de testes quando da realização destas medições.

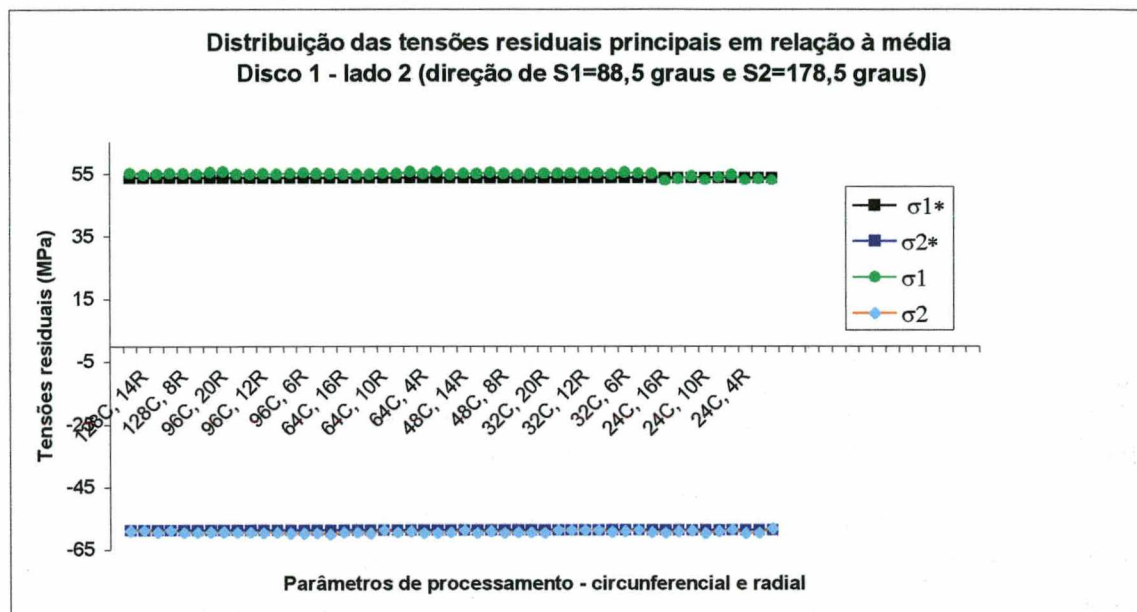


Figura 5.11 – Disco 1 / lado 2

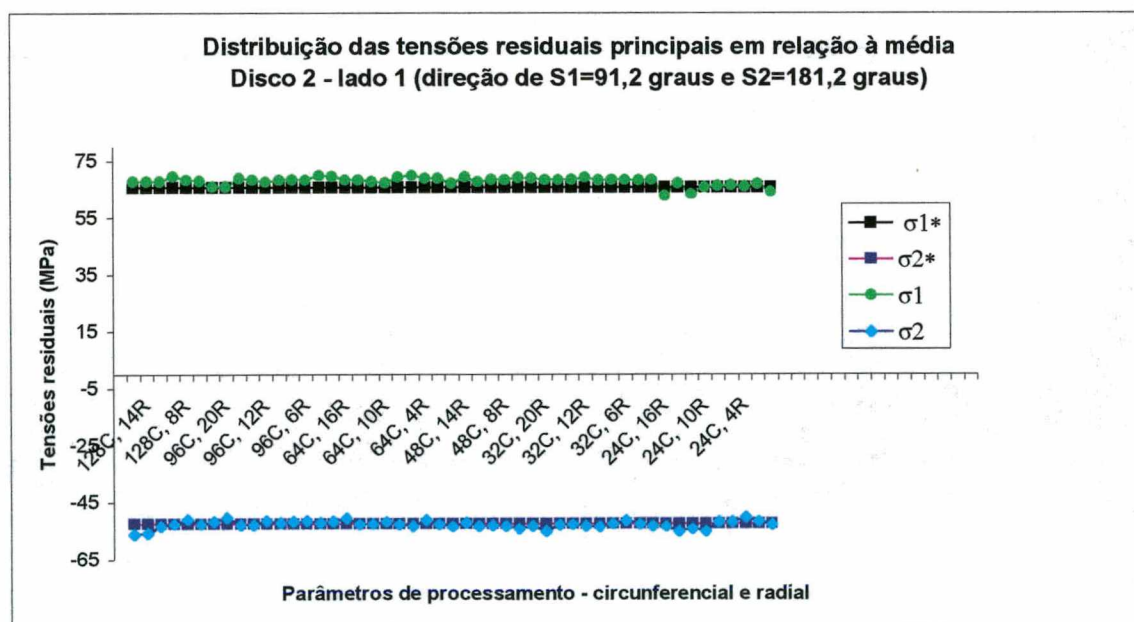


Figura 5.12 - Disco 2 / lado 1

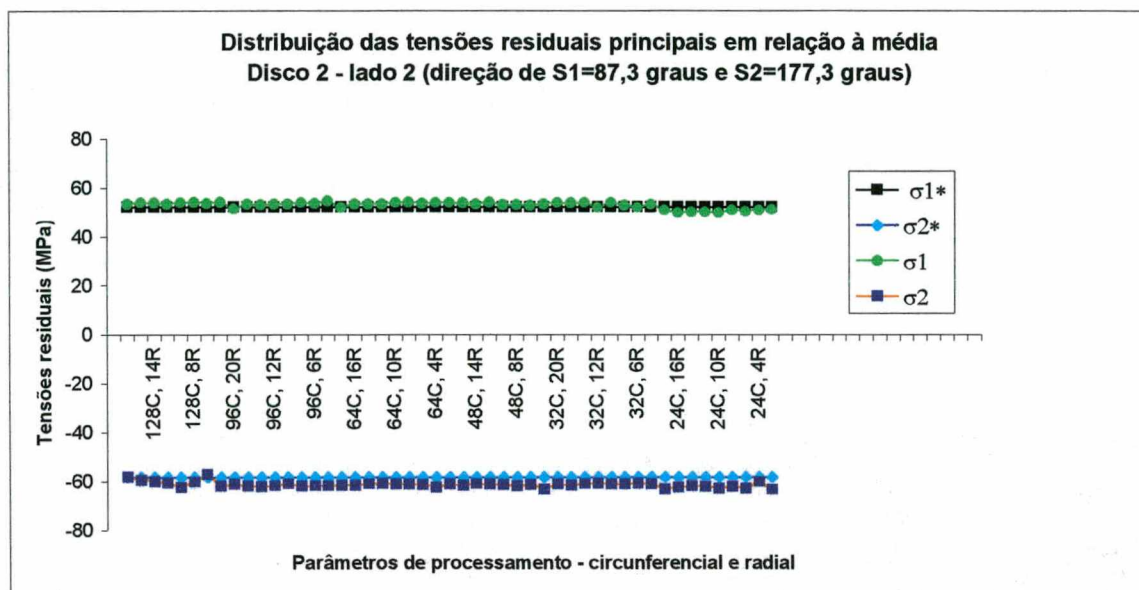


Figura 5.13 - Disco 2 – lado 2

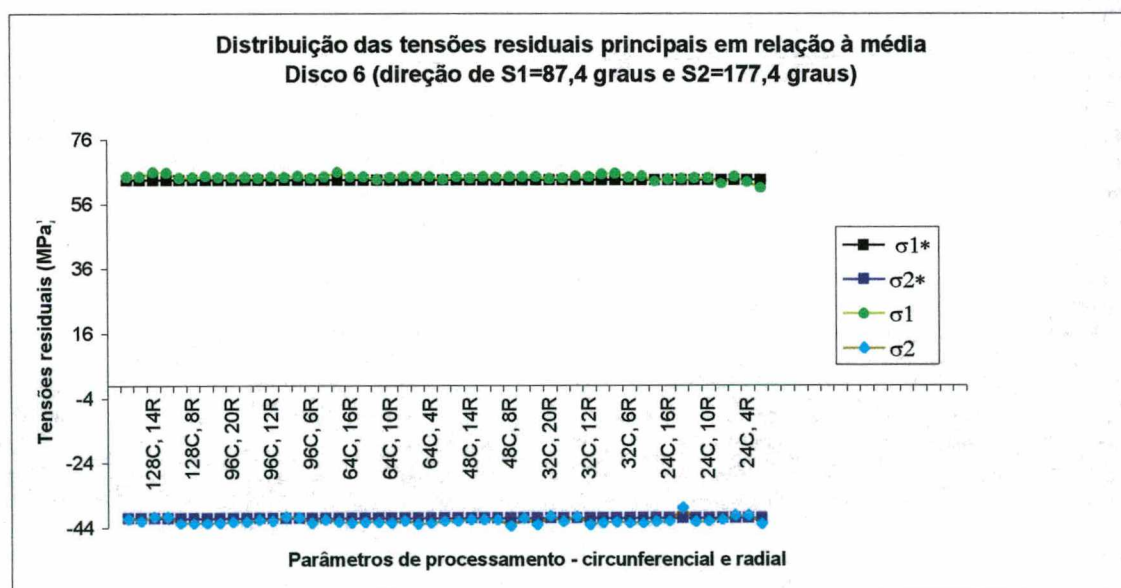


Figura 5.14 - Disco 6

As imagens mostram um nível de ruído elevado, para o qual existem três possíveis causas. A primeira estaria relacionada ao elevado ruído existente no sinal de vídeo proveniente do

CCD. Estudos comparativos preliminares revelaram uma grande diferença entre o sinal gerado por uma câmera marca COHU encapsulada, com relação sinal/ruído nominal de 50 dB e a câmera Marshall "on board" utilizada no MTRES, com relação sinal/ruído nominal de 48 dB. O ruído medido no sinal desta última chegou a 10% da amplitude total do sinal.

Na imagem ao vivo, é possível verificar uma flutuação muito acentuada do nível de cinza dos pixels em um curto espaço de tempo, o que pode provocar problemas durante a aquisição de fase. Na realidade, o ângulo de fase da luz a ser determinado via formulação matemática depende da intensidade luminosa captada pelo CCD, representada pelo nível de cinza. Se essa intensidade varia de forma aleatória entre os passos de aquisição da fase, a informação sobre a fase e conseqüentemente sobre os deslocamentos pode ser distorcida, acarretando erros na medição de tais deslocamentos e na determinação das tensões residuais.

A segunda causa estaria relacionada à abertura numérica do diafragma existente entre as lentes do CCD. A abertura numérica determina o tamanho do "speckle" e este, por sua vez, está diretamente relacionado à qualidade da imagem. É provável que, modificando tal variável, seja possível obter imagens de melhor qualidade. Entretanto, quando se diminui muito o tamanho do "speckle", há perda de contraste, pois mais de um elemento se encontra superposto a um pixel. Nesse caso, o contraste é obtido pela média dos níveis de cinza de cada "speckle", o que normalmente diminui o valor final do nível de cinza e por conseqüência, o contraste. De outro lado, quando a dimensão do "speckle" é aumentada em demasia, há perda de resolução, pois vários pixels vizinhos passam a conter a mesma informação, originária do mesmo "speckle".

A terceira causa pode estar ligada à deposição do pó metálico originado na furação sobre os espelhos cônicos e também sobre a superfície de medição. Esse pó provoca perda de correlação da imagem, uma vez que o padrão óptico de reflexão da superfície é modificado. A existência de partículas contaminadas, oriundas do jato de ar expelido pela turbina e direcionado à superfície de medição, também pode contribuir na perda de correlação da imagem.

Sem dúvida das três causas analisadas, o ruído da câmera é a mais significativa e deverá ser o primeiro aspecto a ser aperfeiçoado neste sistema.

5.1.2 Ensaios em Campo

Para verificar a portabilidade, praticidade e flexibilidade do MTRES em campo, algumas medições fora de laboratório foram programadas.

A peça escolhida para os ensaios em campo foi um trocador de calor fora de uso, de propriedade do Laboratório de Ciências Térmicas - Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC (figura 5.15). Tal trocador apresenta diâmetro máximo externo de 500 mm e comprimento de 2 m. A principal característica que torna interessante a medição de tensões residuais nessa peça de aço 1020, é a forma predominantemente cilíndrica da carcaça, assim como a presença de diversos cordões de solda e cantos vivos. O conjunto completo do trocador de calor engloba ainda duas tampas, onde também alguns pontos foram medidos com o MTRES.

5.1.2.1 Procedimento

O procedimento adotado consistiu nos seguintes passos:

a) Limpeza e Pintura da Peça;

Os pontos de medição foram limpos com álcool e acetona, visando a remoção de pó, gorduras ou óxidos que estivessem aderidos à superfície. A limpeza preliminar foi feita com algodão e estopas.

Após a evaporação do álcool e da acetona, a tinta branca fosca foi aplicada à superfície. Um tempo de 15 minutos foi necessário para que a tinta estivesse completamente seca. Pequenos sinais foram feitos com lápis indicando a posição onde os furos deveriam ser realizados.

b) Posicionamento e Fixação do MTRES;

Como tratava-se de uma peça de aço 1020, foi possível utilizar as sapatas magnéticas para a fixação do sistema. Uma tentativa de fixação com as sapatas não magnéticas também foi feita. Entretanto, verificou-se que a dificuldade de colagem em posições não horizontais (figura 5.16) é muito maior, quase que exigindo a presença de dois operadores.

Os pontos de medição no trocador de calor podem ser visualizados nas figuras 5.16 e 5.17. Na figura 5.16, observa-se a tampa externa do trocador, na qual o medidor foi fixado. Um furo foi realizado nas proximidades de dois cordões de solda presentes na estrutura, perpendiculares entre si. Na figura 5.17, temos o corpo do trocador de calor, mais

especificamente a região onde foram feitos dois furos (chamados de “cordão de solda 1” e “cordão de solda 2”), distantes aproximadamente 50 mm entre si.

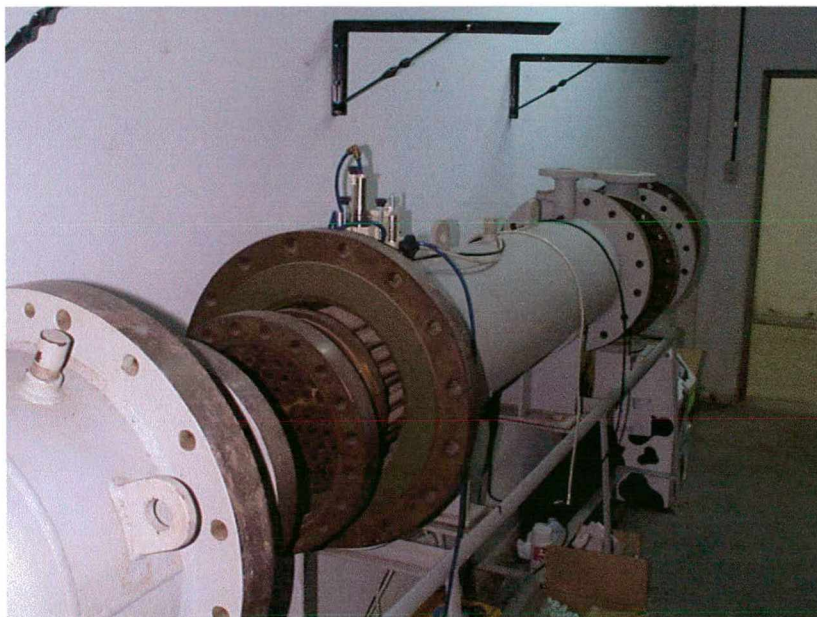


Figura 5.15 – Trocador de calor medido com sistema MTRES instalado

Devido ao formato cilíndrico apresentado pelo trocador de calor, a flexibilidade de movimentos permitida pelas rótulas das sapatas foi indispensável durante o posicionamento.

A colocação do sistema sobre os pontos de medição foi feita através da visualização pela tela do computador, usando a imagem ao vivo.

Após os ajustes finais da iluminação via barras roscadas, os parafusos das rótulas e os manípulos das hastes foram apertados, travando o sistema na posição desejada.

c) Medição;

A medição em campo apresentou os mesmos passos seguidos para as medições realizadas em laboratório.

5.1.2.2 Resultados Obtidos

As imagens obtidas nos ensaios em campo podem ser visualizadas nas figuras 5.18 a 5.20. De maneira semelhante às imagens obtidas em laboratório, as imagens de campo apresentam um elevado nível de ruído, porém da mesma ordem do que foi observado em

laboratório. Assim, o fato do MTRES ser usado fora da bancada óptica não parece piorar seu desempenho. Apesar disso, a grande revelação consiste no fato de o sistema ser capaz de obter franjas de interferência fora do ambiente de laboratório.

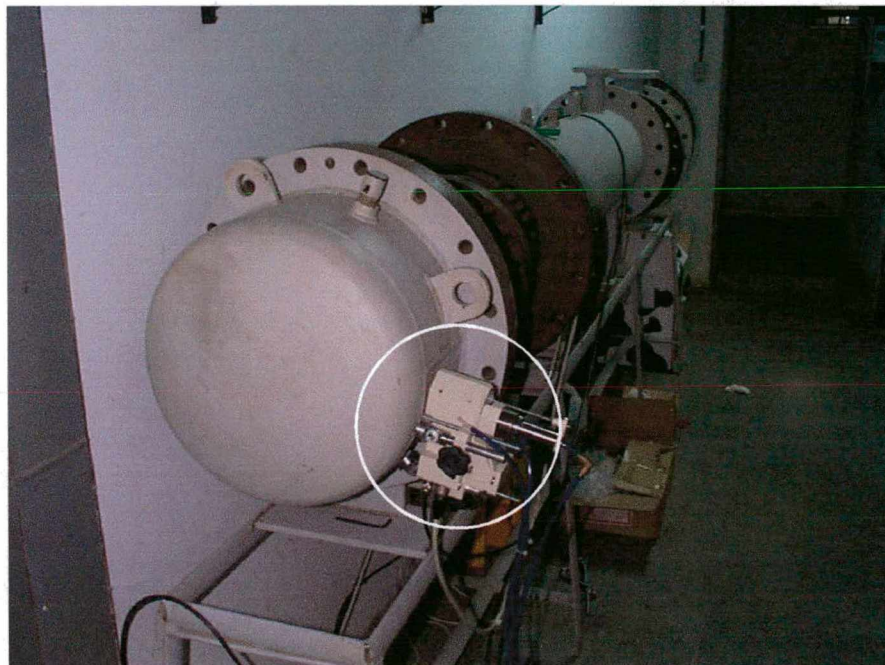


Figura 5.16 – Medição na tampa externa com sapatas magnéticas

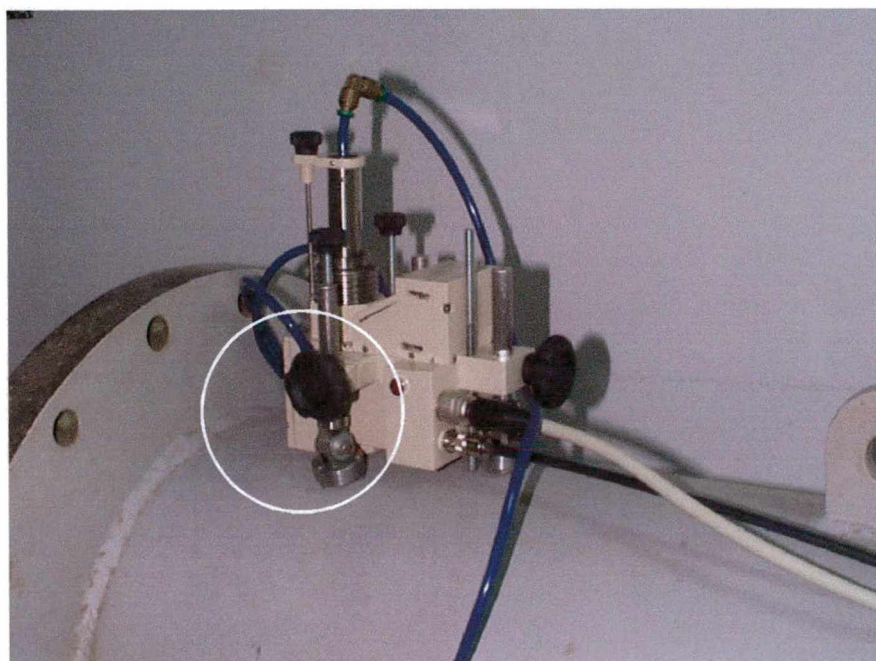


Figura 5.17 – Medição no corpo do trocador de calor



Figura 5.18 – Medição em cordão de solda Figura 5.19 – Medição em cordão de solda

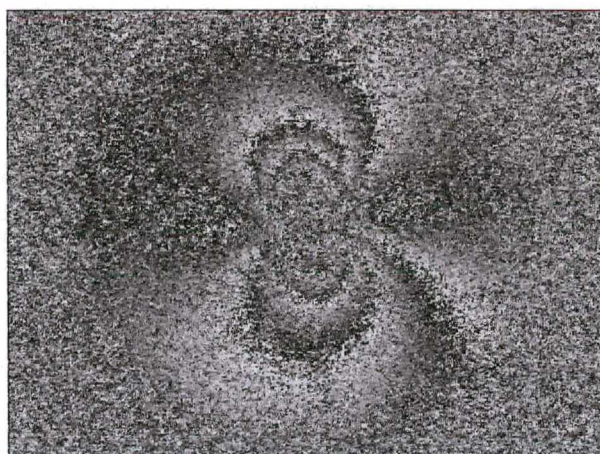


Figura 5.20 – Medição no interior da tampa externa

Os resultados numéricos de tensão residual calculados podem ser visualizados na tabela 5.2:

	Cordão de solda 1	Cordão de solda 2	Tampa externa
Média de σ_1 (MPa)	243.6	231.0	223.1
s de σ_1 (MPa)	3.2	20.0	17.3
Média de σ_2 (MPa)	128.8	115.2	107.0
s de σ_2 (MPa)	2.1	19.1	16.1

Tabela 5.2 – Resultados obtidos com o MTRES em campo

Os resultados mostram que, comparada às medições em laboratório, as medições em campo apresentaram erro aleatório maior. Isso se deve à heterogeneidade da iluminação, cuja causa posteriormente foi descoberta. Havia sujeira na lente de circularização do laser. Isso provocou um desequilíbrio da intensidade luminosa, causando perda na qualidade das imagens. Tal fato veio comprovar a grande influência que a uniformidade luminosa tem sobre a imagem final.

Mesmo assim, analisando-se os resultados, pode-se afirmar que a dispersão dos valores não é tão elevada em relação aos valores das tensões medidas, ficando o desvio padrão não superior a 10% do valor medido. Significa que, assim como em laboratório, o medidor apresenta desempenho metrológico aceitável para este tipo de medição também em campo. Nas figuras 5.21, 5.22 e 5.23, observa-se a distribuição das tensões principais em relação à média dos valores, quando da variação dos parâmetros de processamento da imagem.

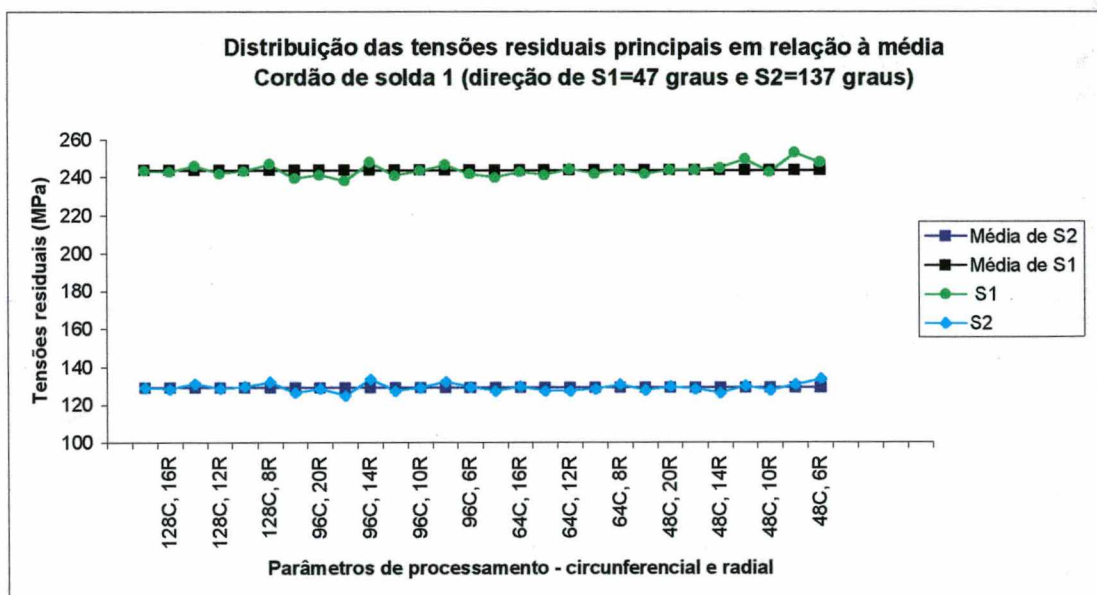


Figura 5.21 – Cordão de solda 1

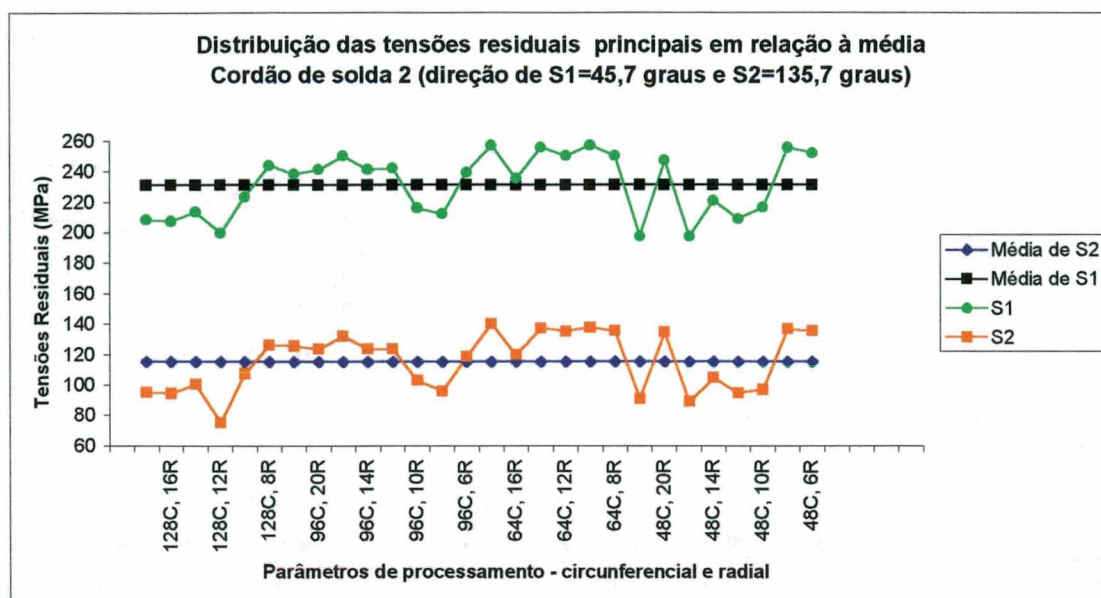


Figura 5.22 – Cordão de solda 2

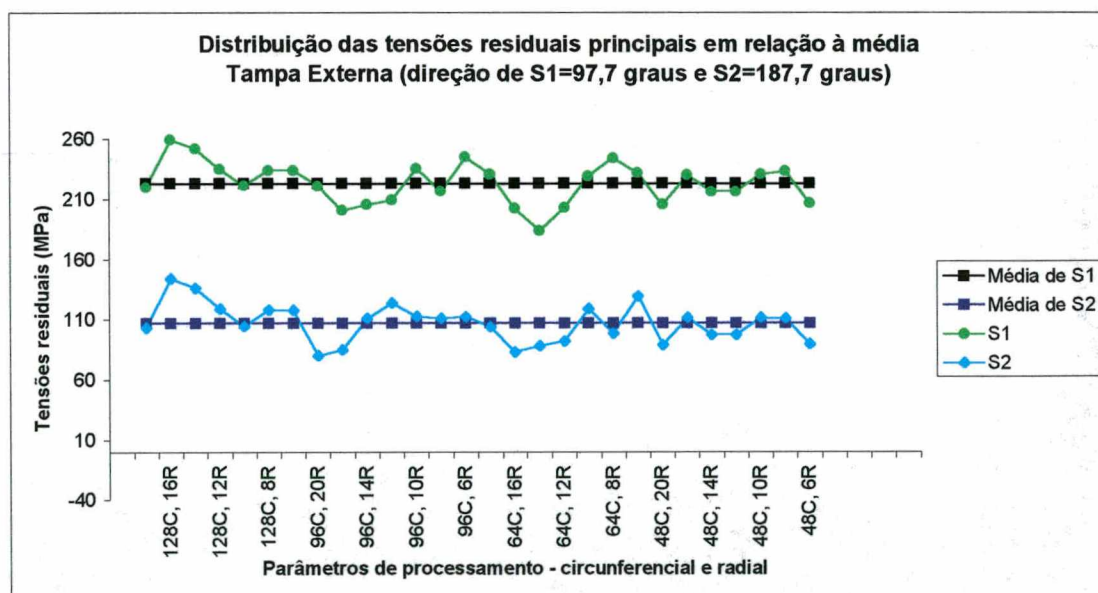


Figura 5.23 – Tampa Externa

5.2 Avaliação Operacional do Medidor

Após a montagem, manuseio e realização de ensaios com o MTRES, algumas observações gerais podem ser feitas em relação ao seu desempenho.

a) Quanto aos espelhos cônicos:

Espelhos cônicos de elevada qualidade foram obtidos. As superfícies apresentam um grau de reflexão bem maior do que as dos espelhos antigos, usados no primeiro protótipo, melhorando a qualidade de iluminação.

b) Quanto ao sistema de deslocamento de fase:

O sistema de deslocamento de fase projetado apresentou alguns problemas no que diz respeito à qualidade do movimento realizado pelos atuadores piezoelétricos. O principal deles foi a diferença de $0,3 \mu\text{m}$ (em média) existente entre o curso dos três elementos, diferença esta responsável pelo deslocamento não paralelo do espelho cônico móvel. Um segundo problema foi a histerese intrínseca dos atuadores, uma vez que os mesmos não eram dotados de recursos de realimentação eletrônica. Apesar de recursos de software terem reduzido esse efeito, há suspeitas não confirmadas de que a histerese tenha contribuído para a redução da qualidade das imagens obtidas nos ensaios. Na continuidade dos trabalhos, sugere-se a substituição dos piezos atuais por atuadores realimentados, na tentativa de minimizar os problemas de deslocamento não uniforme e histerese. Tais atuadores apresentam um extensômetro integrado, que monitora a deformação sofrida pela estrutura interna do piezo. Essa deformação é convertida em deslocamento pela unidade de tratamento de sinais, que compensa as diferenças existentes entre os deslocamentos real e ideal. O custo financeiro dessa substituição seria elevado, além de exigir mudanças na eletrônica e na parte física do sistema.

c) Quanto ao sistema de posicionamento e fixação:

O sistema de posicionamento e fixação se mostrou muito eficiente quanto à rigidez mecânica. As barras roscadas foram muito úteis no ajuste da altura do medidor, assim como na movimentação do sistema quando do uso das sapatas magnéticas. A única limitação encontrada foi o comprimento útil de rosqueamento das mesmas, pois durante as medições em campo, um maior curso foi necessário, de modo a permitir a compensação de inclinações da geometria da peça medida (no caso um tubo).

O posicionamento sobre o ponto de medição desejado é facilmente conseguido através da utilização de uma mira existente na imagem ao vivo, posicionada sobre o centro óptico do interferômetro. A centragem da turbina em relação à esta mira foi garantida mecanicamente através de um gabarito cilíndrico, facilmente utilizável. Isto significa que

a fresa realiza o furo sobre a posição onde se encontra a mira, que, por sua vez, coincide com as coordenadas do centro óptico do interferômetro, minimizando os erros no cálculo das tensões residuais.

Uma melhoria a ser implementada é o reprojeto das sapatas no que diz respeito ao caminho das linhas de fluxo magnético dos ímãs. Na versão atual, a distância entre os ímãs e a superfície da peça medida foi fixada em aproximadamente 0,5 mm, enquanto que não há distanciamento entre os ímãs e as sapatas, pelo fato de estas peças estarem coladas umas às outras. Isso provoca um desvio das linhas de fluxo dos ímãs através das sapatas, levando à redução da força de atração resultante sobre a peça medida. Essa situação pode ser revertida pelo aumento do diâmetro da cavidade dos ímãs de forma a proporcionar uma folga diametral da mesma maior do que 1 mm.

d) Quanto à câmera de TV:

A câmera CCD utilizada mostrou-se muito ruidosa, estando muito aquém das expectativas e também das suas especificações técnicas nominais. Diversos testes foram feitos no intuito de melhorar o seu desempenho: blindagem, aterramento e a presença de ruído na tensão de alimentação. O próprio fabricante foi contatado e argüido sobre o mau funcionamento do equipamento, o que não trouxe nenhuma contribuição na melhora da qualidade das imagens obtidas com o pequeno CCD. Diante dessa situação, e em função da limitação de tempo e recursos, a decisão tomada foi permanecer com a câmera adquirida e, a médio prazo, buscar no mercado um outro fornecedor que comercialize câmeras "on board", de dimensões próximas, e com especificações técnicas realmente confiáveis.

e) Quanto ao sistema óptico:

A abertura numérica do diafragma (mais conhecida como "f number")² foi fixada em 8. A experiência mostra que, em montagens convencionais com holografia eletrônica, esse número proporciona um tamanho de "speckle" adequado, fornecendo bons resultados no que diz respeito à qualidade das imagens. Entretanto, a má qualidade dos mapas de fase obtidos pode estar relacionada também a este parâmetro, pelo fato de o mesmo influenciar o tamanho do "speckle". Para investigar essa característica, a atual bucha de fixação das lentes será substituída por outras com aberturas numéricas diferenciadas e testes serão

² O "f number" é obtido pela divisão numérica do comprimento focal pelo diâmetro efetivo da abertura do diafragma [15].

efetuados para cada configuração. As lentes já montadas podem ser descoladas facilmente, apenas exigindo um pouco de atenção e cuidado devido às suas dimensões reduzidas. Esses testes não foram efetuados nesse trabalho por limitações de tempo.

f) Quanto ao sistema de remoção do cavaco:

Uma melhoria muito importante que deve ser executada é a melhoria no sistema de remoção do cavaco oriundo da furação. Durante os testes realizados, o cavaco depositado sobre as superfícies ópticas teve de ser removido manualmente várias vezes de forma a evitar riscos e mesmo problemas com a qualidade das imagens, uma vez que o padrão de “speckle” pode ser modificado pela presença do pó em excesso. Após a colocação de uma peça auxiliar de poliacetal, a quantidade de pó diminuiu, permitindo um número maior de medições sem paradas para limpeza. Entretanto, tal peça apresenta a desvantagem de prejudicar o fluxo de ar proveniente da turbina, que tem grande importância na retirada do cavaco. Os bicos de ar não se mostraram muito eficientes, sendo incapazes de evitar a entrada do cavaco no interior do MTRES. Uma sugestão é a utilização de um pequeno mecanismo com uma mola e três pontos de apoio. No mecanismo, a mola é presa à peça de poliacetal e à ponta da turbina. A peça de poliacetal apresenta três pinos, cuja função é garantir a existência de uma pequena fresta para a passagem do cavaco. Com esta configuração, a peça de poliacetal estará sempre o mais próximo possível da peça, devido à força exercida pela mola, evitando assim, desde o início da furação, a entrada do pó indesejável.

g) Quanto ao sistema de iluminação:

O subsistema de iluminação mostrou-se muito eficaz e de fácil ajustagem. O laser diodo, assim como o espelho de primeira reflexão, são facilmente removíveis e posicionáveis. O espelho furado apresentou um pequeno lascamento da parte reflexiva junto à borda do furo. Isso pode ter sido provocado por uma fragilização da camada espelhada durante o processo de fabricação do mesmo. A influência disso foi verificada na própria imagem, através da existência de uma pequena sombra, que não prejudica em demasia a qualidade dos mapas de diferença de fase obtidos. A esfera de expansão do feixe se mostrou muito eficiente, não provocando problemas durante a utilização do sistema.

h) Outros aspectos operacionais:

Em geral o medidor se mostrou versátil, de fácil instalação e manuseio durante as medições - em laboratório e em campo - indicando que o requisito de portabilidade foi cumprido. A integração do laser diodo ao bloco do MTRES e o sistema de fixação reformulado garantiram os graus de liberdade necessários à realização de medições fora da bancada e do ambiente de laboratório.

O sistema pneumático não apresentou qualquer tipo de problema. A válvula reguladora de pressão e o filtro coalescente integrados ao conjunto garantiram a pressão de ar necessários à realização dos ensaios. Uma sugestão para melhoramentos futuros seria a inserção de uma servo-válvula controlada por computador para o controle do fluxo do ar de acionamento da turbina pneumática. Essa válvula seria acionada quando do início do processo de furação, permitindo a passagem do ar, até que o furo fosse finalizado. Depois disso, automaticamente o fluxo seria interrompido, forçando a parada da fresa. Essa modificação simplificaria a operação do MTRES, eliminando a necessidade de o operador pressionar um pedal de acionamento do ar da turbina. O custo de aquisição da servo/válvula é baixo, além de existirem linhas digitais disponíveis na placa analógica/digital e no conector do medidor para realizar a ligação eletrônica necessária.

5.3 Medidor do Diâmetro do Furo

Os testes realizados com o módulo de medição do diâmetro do furo envolveram 3 furos realizados com fresas de topo cônico-invertidas. Os diâmetros desses furos foram medidos em várias condições diferentes (através do algoritmo criado para este fim) e os resultados, comparados com medições efetuadas no microscópio de medição.

Entre cada medição efetuada com o módulo "Mede-Furo" a tensão elétrica sobre os led's de iluminação foi modificada, simulando regulagens naturalmente efetuadas por um usuário típico. Para cada valor de tensão, uma série de imagens do mesmo furo, com os mesmos parâmetros de contraste e brilho foi adquirida.

Foram realizadas 15 medições do diâmetro (uma para cada imagem), objetivando estimar a repetitividade deste módulo. Os resultados podem ser visualizados na tabela 5.3:

Tensão no driver:		5,5 V	6 V	6,5 V
Furo	Parâmetros [mm]			
1	$\phi_{\text{médio}}$	1,834	1,835	1,836
	s	0,0026	0,0020	0,0020
	Re	0,0055	0,0043	0,0043
2	$\phi_{\text{médio}}$	1,790	1,791	1,791
	s	0,001	0,0016	0,0021
	Re	0,0021	0,0034	0,0045
3	$\phi_{\text{médio}}$	1,852	1,857	1,855
	s	0,0030	0,0048	0,0012
	Re	0,0064	0,0103	0,0026

Tabela 5.3 – Resultados das medições com o "Mede-Furo"

Na tabela 5.3, os símbolos $\phi_{\text{médio}}$, s e Re correspondem, respectivamente, à média dos 15 valores obtidos para o diâmetro do furo especificado; desvio padrão experimental e repetitividade dos dados.

Para fins de comparação, os mesmos furos foram medidos no microscópio óptico de medição. Os resultados se encontram na tabela 5.4.

Os resultados numéricos podem ser avaliados em termos de sua repetitividade (Re). A repetitividade expressa uma faixa simétrica de valores dentro da qual, com uma probabilidade estatisticamente definida, situa-se o erro aleatório da indicação [35].

Considerando uma probabilidade definida de 95%, para 15 medidas e 14 graus de liberdade (com o Mede-Furo), o coeficiente de t de Student é 2,145 e, para 5 medidas e 4 graus de liberdade (com microscópio óptico), o coeficiente t de Student é 2,776. Pode-se então calcular a repetitividade usando a equação [35]:

$$Re = \pm t.s$$

onde:

t = coeficiente t de Student;
s = desvio padrão experimental

Furo	Parâmetros [mm]	Posição 0°	Posição 90°
1	$\phi_{\text{médio}}$	1,817 ± 0,033	1,798 ± 0,033
	s	0,004	0,0025
	Re	0,011	0,007
2	$\phi_{\text{médio}}$	1,730 ± 0,033	1,732 ± 0,033
	s	0,004	0,0016
	Re	0,011	0,004
3	$\phi_{\text{médio}}$	1,84 ± 0,033	1,827 ± 0,033
	s	0,004	0,004
	Re	0,011	0,011

Tabela 5.4 – Resultados das medições com microscópio óptico

Pelas tabelas 5.3 e 5.4, observa-se que a repetitividade associada à medição com o Mede-Furo é bem menor do que com o microscópio óptico. Pode-se afirmar então, que o erro aleatório presente na medição com o Mede-Furo é, em média, metade do apresentado na medição com o microscópio.

A comparação dos resultados obtidos nas medições com o microscópio com os resultados do Mede-Furo permitiu verificar que o Mede-Furo é suscetível a erros na geometria do furo, provocados pela remoção inicial irregular de material na superfície do furo. Na etapa inicial do processo de furação, a fresa se desloca lateralmente, por não apresentar gume cortante em sua parte frontal. Com esse deslocamento, há retirada de material na direção radial do furo, provocando um ligeiro aumento do diâmetro. Com o avanço da turbina pneumática, a fresa reduz o deslocamento lateral resultante, devido à existência das paredes do furo, reduzindo também, o diâmetro final do furo em relação à superfície gerando furos ligeiramente cônicos. No Mede-Furo, que realiza a medição do diâmetro

através da imagem da superfície da peça, esse efeito aumenta o valor do diâmetro determinado pelo software em relação ao diâmetro médio.

Na realidade, trata-se de um erro de forma do furo e não um erro intrínseco do módulo Mede-Furo, mas que, obviamente, influencia na medição do diâmetro. Esta característica possui uma componente sistemática e outra aleatória: a componente sistemática é fortemente influenciada pelas características médias do material que está sendo furado, que induz maior ou menor conicidade. A componente aleatória resulta de pequenas diferenças de amostra para amostra do material e em função das características de cada fresa utilizada.

Estudos complementares devem ainda ser realizados no sentido de otimizar a geometria do furo produzido por este processo, o que passaria por um redesenho da fresa, originalmente concebida para aplicações odontológicas. Este estudo está fora do escopo deste trabalho.

Como conclusões finais acerca da avaliação do Mede-Furo, pode-se afirmar que:

- a) Em termos de praticidade de uso, o Mede-Furo apresenta elevada performance, sendo de fácil fixação e posicionamento, além de seu software ser de utilização muito simples. O projeto mecaoptoeletrônico é também muito simples, o que facilitou a montagem e operacionalização do protótipo;
- b) Em relação à avaliação metrológica preliminar, o erro aleatório encontrado é relativamente baixo, ficando em aproximadamente 0,4% do valor do diâmetro medido. Quanto ao erro sistemático, melhorias devem ser implementadas no sentido de aperfeiçoar o processo de furação.

Segundo Albertazzi [6,42], erros de 10% no valor do raio induzem a erros da ordem de 15% nas tensões calculadas. Considerando o valor encontrado de 0,4% para o erro aleatório na medição do diâmetro e desconsiderando a parcela sistemática do mesmo, pode-se afirmar que o erro introduzido no cálculo das tensões residuais fica em torno de 0,6% do valor obtido, o que pode ser considerado relativamente baixo, assumindo que estas quantidades variam de forma proporcional.

Capítulo 06

Conclusões

As conclusões do presente trabalho podem ser divididas em quatro grupos:

a) Quanto à metodologia de projeto adotada:

A metodologia de projeto empregada se mostrou muito eficiente, principalmente na fase de seleção de concepções dos subsistemas a serem integrados e, posteriormente, na fase do projeto básico. Foi possível organizar de forma simples todas as idéias geradas e escolher de forma objetiva a mais adequada, através da atribuição de pesos para cada item a ser analisado. O planejamento do produto, assim como a análise de viabilidade técnica, já feitos em parte na fase de projeto do protótipo anterior, o Mater, foram refeitos, adequando o projeto a uma realidade mais competitiva no cenário mundial, uma vez que alguns itens inovadores foram introduzidos no sistema, como por exemplo a furação automatizada.

b) Quanto ao projeto do medidor:

O MTRES representou uma evolução de projeto baseado no Mater. Baseando-se na experiência obtida pela equipe de projeto, foi possível efetuar diversas melhorias mecânicas, ópticas e eletrônicas, algumas já identificadas ao final do projeto do Mater e outras novas, idealizadas durante o projeto do segundo protótipo. Dentre elas, encontram-se, por exemplo, (a) a introdução de um laser diodo de dimensões reduzidas, em substituição ao laser a gás anteriormente empregado, que permitiu a utilização do medidor em campo, característica almejada desde sua concepção inicial; (b) a modificação do sistema de deslocamento de fase com a utilização de três elementos piezoelétricos para o

deslocamento do espelho; (c) a modificação do sistema de fixação do MTRES, que tornou muito mais eficaz, flexível e prático o processo de montagem e fixação do sistema às superfícies de medição; (d) o emprego de câmeras “on board” para a captação das imagens, que permitiu a redução do volume ocupado pelo sistema de visualização e também simplificou sobremaneira o projeto do sistema de furação, uma vez que uma câmera desse tipo também foi utilizada no módulo de medição do diâmetro do furo; (e) troca da turbina pneumática por uma de dimensões menores; (f) automação do sistema de furação através de um pequeno motor de passo de passo micrométrico; (g) utilização de uma esfera de vidro para proporcionar a expansão do feixe do laser diodo; entre outras.

Em sua maioria, tais modificações se mostraram muito eficazes, exceção feita à troca da turbina pneumática, que criou problemas com a remoção do pó proveniente da furação, inexistente no protótipo anterior. Tal problema ainda demanda atenção, uma vez que, caso não seja solucionado, pode influenciar o processo de medição ao ponto de inviabilizá-lo.

A qualidade dos espelhos foi melhorada, através da usinagem de ultra-precisão realizada com o mancal Kugler importado da Alemanha e operacionalizado pela equipe do Laboratório de Mecânica de Precisão da UFSC. Pode-se afirmar que os espelhos obtidos já estão em conformidade com as especificações necessárias para a utilização nas medições com o MTRES.

A massa final do cabeçote foi reduzida em 0,3 kg (20%) em relação ao protótipo anterior (Mater) embora a meta inicial fosse reduzi-la em 0,8 kg (50%). O volume permaneceu inalterado contra a redução esperada de um terço. Tal discordância entre as metas inicialmente programadas e os resultados efetivamente alcançados pode ser perfeitamente justificada em função dos mecanismos adicionais que foram acrescentados para permitir a furação automatizada, o que não estava inicialmente previsto.

Apesar desses limitantes, o medidor se mostrou altamente versátil e de fácil instalação e manuseio durante as medições - em laboratório e em campo - indicando que o requisito de portabilidade e praticidade de uso foram cumpridos.

O Mede-Furo, módulo de medição do diâmetro do furo, se mostrou construtivamente simples e fácil utilização, assim como seu software. O posicionamento sobre o furo a ser medido é realizado de forma muito prática, reduzindo tempo e esforço por parte do operador.

c) Quanto aos resultados obtidos

Os resultados obtidos com o MTRES se mostraram aceitáveis, do ponto de vista do erro aleatório associado às medições. O desvio padrão dos valores medidos foi relativamente baixo, ficando em torno de 3% do valor medido, o que é um nível típico para este tipo de medição. Isso foi possível graças à implementação de um algoritmo robusto, que viabilizou a extração dos dados numéricos das imagens ruidosas obtidas. Entretanto, melhorias devem ser implementadas no sentido de diminuir o ruído das imagens, de forma a permitir ao sistema fornecer uma informação mais exata e confiável sobre as tensões residuais medidas. Para os casos das medições realizadas com os discos, os valores de tensão calculados mostraram uma repetitividade média de aproximadamente 10 MPa, para valores medidos de aproximadamente 50 MPa e -60 MPa (σ_1 e σ_2 respectivamente). O ângulo de orientação das tensões principais sofreu uma variação de no máximo 1°.

Já para as medições em campo, a repetitividade média foi de aproximadamente 15 MPa para valores medidos de aproximadamente 230 MPa e 120 MPa (σ_1 e σ_2 respectivamente). Da mesma forma que no laboratório, a variação no ângulo de orientação das tensões principais ficou na casa de 1°.

Em relação ao erro sistemático, nada é possível afirmar, uma vez que o dispositivo de carregamento ainda se encontrava na fase de testes quando da realização destas medições.

Em relação ao Mede-Furo, a avaliação preliminar indica que o desvio padrão fica em aproximadamente 0,4% do valor do diâmetro medido, provocando um erro de aproximadamente 0,6% nos valores de tensões residuais calculados. Comparada com as demais fontes de incerteza, esta contribuição pode ser tolerada sem maiores problemas.

d) Quanto às melhorias sugeridas

Como sugestões gerais para a melhoria do sistema, é possível listar os seguintes itens, em ordem decrescente de importância:

- 1) otimizar a abertura numérica do sistema óptico ("f number") visando melhorar a qualidade das imagens;
- 2) trocar a câmera CCD por uma de menor nível de ruído;
- 3) aperfeiçoar o sistema de remoção do cavaco;

- 4) trocar os elementos piezoelétricos por atuadores eletronicamente realimentados, minimizando o erro de histerese no posicionamento;
- 5) reprojeter as sapatas magnéticas de fixação de modo a tornar maior a força de atração magnética;
- 6) colocar uma servo-válvula controladora do fluxo de ar da turbina pneumática, permitindo a automatização total do processo de furação.

Capítulo 7

Referências Bibliográficas

- [1] Jian, L., *“Handbook of Measurement of Residual Stresses”* Society for Experimental Mechanics. Inc., The Fairmont Press, Inc., 996
- [2] Kobayashi, A.S., *“Handbook on Experimental Mechanics”* Society for Experimental Mechanics, Prentice-Hall, Inc., 1987
- [3] Boettger, J., *“Desenvolvimento de um Sistema Portátil para Medição de Tensões Residuais em Campo Utilizando a Holografia Eletrônica e o Método do Furo”* Dissertação de Mestrado apresentada na UFSC, CPGEM, Florianópolis, 1998
- [4] Rodacoski, M.R., *“Medição de Tensões Residuais com Holografia Eletrônica”* Tese de Doutorado apresentada na UFSC, CPGEM, Florianópolis, 1997
- [5] Measurements Group. *“Guia de Furação RS-200 e Rosetas Extensométricas”* P.O. Box 27777 – Raleigh, NC 27611 USA
- [6] Albertazzi, A.G.J. et alii *“Adequação de um Interferômetro Radial para Medição de Tensões Residuais por meio da Holografia Eletrônica”* III Simpósio de Análise Experimental de Tensões – ABCM – Rio de Janeiro, 12/95, pág. 19-26.
- [7] Kirsch, G., *“Theory of Elasticity and Application in Strength of Materials”* Zeitschrift Verein Deutscher Ingenieure, 42, no. 29 (1898), 797-807
- [8] ASTM E 837 94, *“Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method”*, American Society for Testing and Materials, 1994

- [9] Kabiri, M. *"Nonuniform Residual Stress Measurement by Hole Drilling Method"* Experimental Mechanics, pag. 328-336, December 1984
- [10] Jones, R.,
Wykes, C., *"Holographic and Speckle Interferometry"* Cambridge University Press, 1989
- [11] Coutinho, G.S., *"Técnicas Híbridas para Análise de Tensões Combinando Elementos Finitos e Holografia Eletrônica – Uma Contribuição"* Dissertação de Mestrado apresentada na UFSC, CPGEM, 1993.
- [12] Hecht, E., *"Optics – Second Edition"* Addison-Wesley Publishing Company, Inc. Massachusetts, USA, 1987 - pag. 212
- [13] Creath, K., *"Phase-Measurement Interferometry Techniques"* Elsevier Science Publisher B.V., 1988
- [14] Madureira, O.M., *"Planejamento e Desenvolvimento de Produtos"* Apostila do curso promovido pela Associação Brasileira de Engenharia Automotiva – 1998
- [15] Bergamn, L., et alii. *"Lehrbuch der Experimentalphysik"* de Gruyter, 1978
- [16] Cordovil, F.C., *"Dispositivo para Simulação Experimental de Tensões Residuais por Carregamento Mecânico"* Dissertação de mestrado apresentada na UFSC, PosMCI, 2000
- [17] Fundação CERTI, *"Desenvolvimento de um Dispositivo Padrão para Simulação de Tensões Residuais Biaxiais - Desenvolvimento, Construção e Avaliação"* Relatório Técnico, agosto/1999
- [18] Van Vlack, L.H., *"Princípios de Ciência dos Materiais"* Editora Edgard Blücher, Ltda, 1970
- [19] Back, N. *"Metodologia de Projeto de Produtos Industriais"* Guanabara Dois, 1983
- [20] Schmitt D.R., Li, Y., *"Three-dimensional Stress Relief Displacement Resulting from Drilling a Blind Hole in Acrylic"* Experimental Mechanics, Vol. 36, no. 4, December, 1996
- [21] Nelson, D.V. et alii *"Residual-Stress Determination Through Combined Use of Holographic Interferometry and Blind-Hole Drilling"* Experimental Mechanics, December 1986

- [22] Nelson, D., et alii. *“Residual-stress Determination by Single-axis Holographic Interferometry and Hole Drilling – Parts I and II”* Experimental Mechanics, March 1994
- [23] Measurements Group, *“Tech Note TN-503-5 Residual Stress Measurement”* PO Box 27777, Raleigh, North Carolina 27611, USA
- [24] Bynum, J.E., *“Modifications to the Hole-drilling Technique of Measuring Residual Stresses for Improved Accuracy and Reproducibility”* Experimental Mechanics, January, 1981
- [25] Chow, C.L. *“On Residual-Stress Measurements in Light Truck Wheels Using the Hole-Drilling Method”* Experimental Mechanics, March 1985
- [26] Kabiri, M., *“Measurement of Residual Stresses by the Hole-drilling Method: Influences of Transverse Sensitivity of the Gages and Relieved-strain Coefficients”* Experimental Mechanics, September 1984
- [27] Flaman, M.T., et alii *“Comparison of Residual-stress Variation with Depth-analysis Techniques for the Hole-drilling Method”* Experimental mechanics, December 1990
- [28] Schajer, G.S., *“Strain Data Averaging for the Hole-drilling Method”* Experimental Techniques, March/April 1991
- [29] Frankel, J. et alii *“The Effect of Residual Stresses on Hardness Measurements”* Experimental Mechanics, June 1993
- [30] Albertazzi, A. G.J
Rodacoski, M.R. *“Algoritmos para Quantificação de Tensões Residuais por Holografia Eletrônica usando um Interferômetro Radial”* Anais do IV Simpósio de Análise Experimental de Tensões, Rio de Janeiro, 1996
- [31] Flaman, M.T.,
Herring, J.A., *“Comparison of Four Hole-Producing Techniques for the Center-Hole Residual-Stress Measurement Method”* Experimental Techniques, August 1985
- [32] Nawwar, A.M.,
Shewchuk, J., *“On the Measurement of Residual-stress Gradients in Aluminum-alloy Specimens”* Experimental Mechanics, July 1978
- [33] Rodacoski, M.R., *“Medição de Tensões Residuais Localizadas através do Método do Furo Cego e Holografia Eletrônica “ESPI”* Exame de Qualificação submetido à UFSC, CPGEM, 1995

- [34] Fundação CERTI, *“Projeto M-TRES “Medidor Portátil de Tensões Residuais” PADCT Relatório Técnico Parcial Período Dez/1998 – Jun/1999”*
- [35] Albertazzi, A.G.J., *“Metrologia – Parte I”* Apostila de Metrologia utilizada na disciplina de Metrologia e Estatística do POSMCI, 1999.1
- [36] Kapp, W.A., *“Otimização do Desempenho Metrológico do Sistema de Medição Estação Holográfica”* Dissertação de mestrado apresentada na UFSC, CPGEM, 1997
- [37] Troncoso, L.H.S., *“Sistema Ativo de Estabilização para Medição com Holografia Eletrônica”* Tese de doutorado apresenta na UFSC, CPGEM, 1998
- [38] Assuiti, C.H., *“Metodologia Integrada para a Medição da Forma Geométrica, Deslocamentos, Deformações e Tensões em Superfícies não Planas através da Holografia Eletrônica”* Dissertação de mestrado apresentada na UFSC, CPGEM, 1994
- [39] Albertazzi, A.G.J. *“Medição de Deformações em uma Placa de Válvula de Compressor Hermético por Holografia Eletrônica”*
- [40] Coteq 96 Apostila sobre Tensões Residuais.
- [41] Kanda, C., *“Desenvolvimento de uma Técnica para Caracterização de Tensões Residuais em Chapas Finas”* Dissertação de mestrado apresentada na UFSC, CPGEM, 1999
- [42] Albertazzi, A.G.J. *“Medição de Tensões Residuais pelo Método do Furo: uma Comparação entre Extensometria e Holografia”* IV Simpósio de Análise Experimental de Tensões, Rio de Janeiro, 1996
- [43] Tieu, A.K., *“A Direct Method to Evaluate Hole-Alignment Error in Residual-Stress Measurement”* Experimental Mechanics, March 1985
- [44] Wang, H.P., *“The Alignment Error of the Hole-drilling Method”* Experimental Mechanics, January 1979
- [45] Albertazzi, A.G.J., Rodacoski, M.R., *“Residual Stresses Measurement Using a Radial Interferometer a Preliminary Analysis”* Proceedings of the VIII International Congress on Experimental Mechanics, June 1996

- [46] Rendler, N.J.,
Vigness, I., "*Hole-drilling Strain-gage Method of Measuring
Residual Stresses*" Experimental mechanics, December 1966
- [47] Strand J.
Taxt T.
Jain, A., "*Two-dimensional Phase Unwrapping Using a Block Least-
Squares Method*" IEEE Transactions on Image Processing
Vol. 8 number 3, March 1999.

ANEXO A

Descrição Geral da Eletrônica do MTRES

1. Tensões de Alimentação

As tensões de alimentação disponíveis para a alimentação dos componentes do MTRES apresentam dois valores: +5 V e +12 V.

Os piezoatuadores necessitaram uma fonte em separado, devido à alta tensão requerida para o funcionamento dos mesmos. Essa fonte apresenta dois valores passíveis de emprego: -40 V e -70 V. No MTRES, a saída de -40 V foi utilizada, restando a de -70 V como reserva em caso de necessidade no futuro.

2. Driver dos Led's Infravermelhos do Mede-Furo

Para a medição do diâmetro do furo, a superfície a medir é iluminada por dois led's infravermelhos (diodos emissores de luz infravermelha). O driver desses led's (figura A.1) permite controlar a luminosidade através de uma tensão analógica, gerada pela placa PCMCIA DAQCard-1200. A tensão de controle dos led's e do laser diodo é a mesma.

Para evitar que os led's permaneçam ligados desnecessariamente durante as medições de deslocamentos com o módulo principal (aumentando a vida útil), o driver deve fornecer uma entrada digital que permita ligar/desligar os mesmos (enable) sem reduzir a tensão de

controle a 0 V. O circuito deve permitir a adição de um terceiro diodo emissor de luz no futuro, caso seja necessário.

2.1 Especificações

- Tensão de controle analógica: 0 ... 10 V
- Corrente de controle analógica: ≤ 1 mA
- Corrente de saída: 0 ... 100 mA
- Tensão de saída: ≤ 4.5 V
- Tensão enable: TTL
- Corrente enable: ≤ 2.5 mA

2.2 Funcionamento

Como somente tensões positivas são disponíveis, a configuração de amplificador inversor não pode ser usada. Assim, o amplificador de transimpedância (conversor tensão→corrente) foi baseado no amplificador não-inversor. O transistor Q1 aumenta a corrente de saída e não introduz distorções, pois faz parte da malha de realimentação.

A corrente constante é disponível entre o emissor de Q1 e a entrada inversora do amplificador operacional. Para minimizar a potência dissipada em Q1, o seu coletor é alimentado com 5 V e não com 12 V.

A corrente de 100mA, com uma tensão de controle de 10 V, poderia ser implementada com $R4=100 \Omega$. Contudo, a corrente seria limitada a ≈ 30 mA. Neste caso, Q1 entraria em saturação. De forma evitar tal problema, R4 foi reduzido e um divisor de tensão foi incluído na entrada do OP.

Quando enable*=LOW, Q2 está em corte e o circuito funciona como descrito acima. O nível HIGH nessa entrada puxa a base de Q1 para 0 V, e desta forma a corrente é desligada. O resistor R3 limita a corrente de saída do OP neste caso. Os dois diodos estabelecem níveis TTL. O passa-baixas na base de Q2 evita que a transição de Q2: saturação → corte seja rápida demais. Com Q2 em saturação, o amplificador operacional também está em saturação, e sua saída no valor máximo de tensão. Quando Q2 está em

corrente, OP também volta à operação linear, mais por causa da "slew rate", isso não ocorre imediatamente. Durante um curto momento, a base de Q1 teria um potencial alto e entraria em saturação sendo que os led's poderiam queimar.

2.3 Testes realizados

A entrada analógica controla a corrente dos led's como previsto e Q1 não aquece em demasia.

Com $V_{LD} = 5\text{ V}$, um sinal retangular de $+5\text{ V}$ na entrada enable* mostra a seguinte dinâmica de corrente:

- atraso desliga: $< 10\ \mu\text{s}$
- "fall time": $60\ \mu\text{s}$
- atraso liga $3000\ \mu\text{s}$
- "rise time": $180\ \mu\text{s}$

IR LED Driver

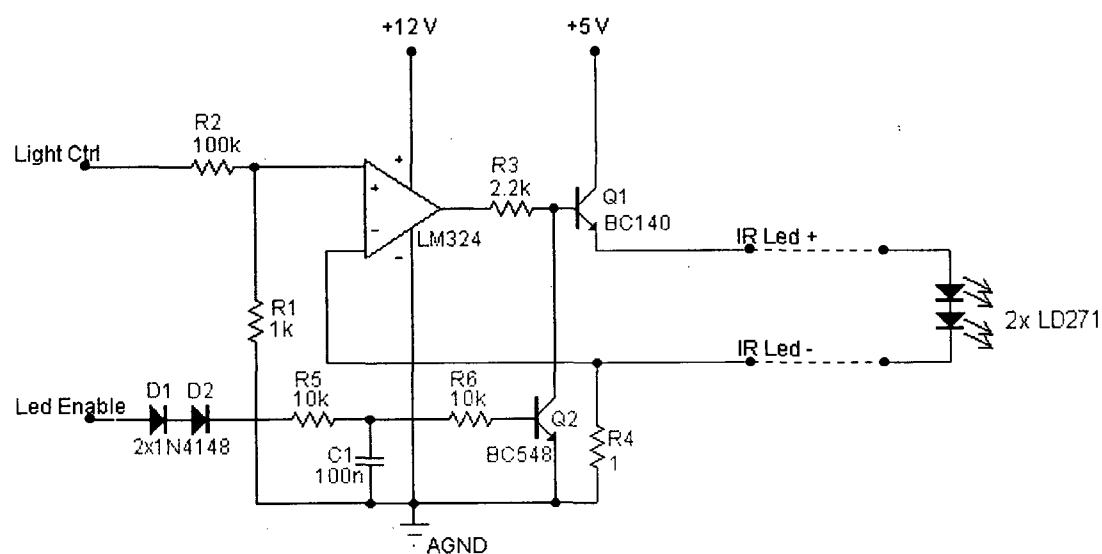


Figura A.1 - Esquema eletrônico do driver dos LED's infravermelhos

3. Driver dos Piezoatuadores

A fase da luz do laser é deslocada através de um espelho cônico montado num atuador piezoelétrico. De acordo com a geometria do espelho, um deslocamento de Δy (na direção do eixo do espelho cônico) provoca uma alteração de fase $\Delta\phi = \pi \cdot \Delta y / \lambda$ (λ = comprimento de onda). O valor da constante piezoelétrica dos piezos empregados é de $\Delta y / \Delta V = 46,67 \text{ nm/V}$. Utilizando-se desse valor, é possível calcular que $\Delta\phi / \Delta V = 10,77 \text{ }^\circ/\text{V}$, ou seja, 1 V gera um deslocamento de fase de $10,77^\circ$.

O método de aquisição dos mapas de fase requer 5 imagens tomadas com 5 valores de fase defasados de 90° . Assim, a faixa de ângulos cobertos é de 360° , o que corresponde a 33,4 V. Fixando uma reserva de 20%, a faixa necessária de tensões é 40 V.

Como o amplificador operacional escolhido (OPA 445 da Burr Brow) permite uma faixa de tensões maior, o ganho do circuito já prevê uma possível extensão da operação no futuro. No entanto, a tensão de alimentação fica restrita ao necessário para a faixa de operação calculada cima, para evitar uma dissipação de calor elevada no amplificador.

A tensão nos piezos deve ser controlável através de uma tensão analógica, gerada pela placa PCMCIA DAQCard-1200.

3.1 Especificações

- Tensão de entrada: 0 ... 10 V
- Corrente de entrada: $\leq 1 \text{ mA}$
- Tensão de saída: 0 ... -40 (-70) V
- Carga capacitiva: 700 nF

3.2 Funcionamento

Como a tensão de entrada é positiva e a de saída, negativa, o amplificador deve ser necessariamente inversor, apresentando um ganho de aproximadamente $-70\text{V}/10\text{V}$. O resistor R3 e o capacitor C1 (figura A.2) têm por função suprimir oscilações provocadas pela capacitância dos piezos. Testes mostraram que o circuito não oscila mesmo na ausência destes componentes. Entretanto, a situação poderia ser mais adversa caso fios de maior comprimento fossem conectados e, sabendo-se que uma oscilação permanente

poderia danificar o OPA 445 e os piezoatuadores, tais componentes foram integrados definitivamente ao circuito final.

Os capacitores C2 e C3 são recomendados pelo fabricante do amplificador operacional. Os diodos D1 e D2 protegem a entrada do amplificador quando a alimentação está desligada.

Piezo Driver

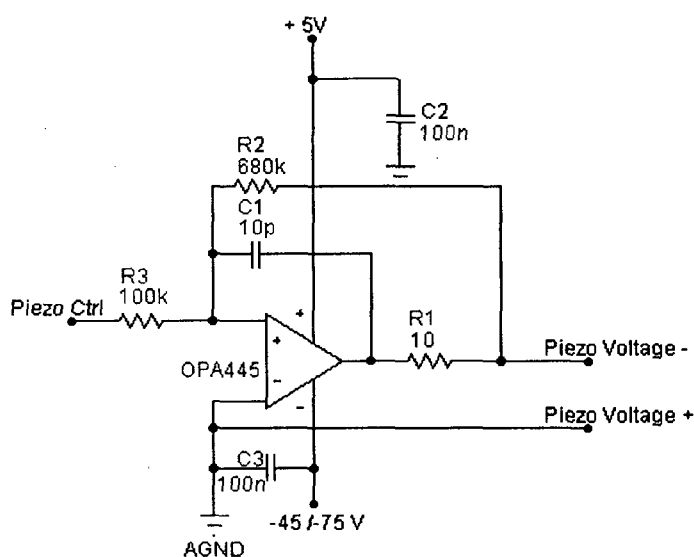


Figura A.2 – Esquema eletrônico do driver dos atuadores piezoelétricos

4. Driver do Motor de Passo

Este circuito (figura A.3) permite controlar o motor de passo com as saídas digitais disponíveis na DAQCard-1200. Foi escolhido o circuito integrado SAA 1042 (Motorola), que gera os sinais para operar um motor de passo no modo bipolar (torque máximo).

4.1 Especificações

- Motor:

Tensão do Motor:	12 V
Resistência / fase:	84 Ω
- Saídas digitais da placa DAQCard-1200:

Tensões:	TTL
----------	-----

Corrente: $\leq 2.5 \text{ mA}$

4.2 Funcionamento

O fabricante do circuito especifica a tensão Zener (diodo DZ) como dependente da corrente do motor.

Os resistores R1, R2 e R3, juntamente com os diodos D1, D2 e D3 protegem as entradas do circuitos quando a tensão de alimentação de 5V está desligada.

Durante a operação normal, o pino número 6 deve estar ligado ao ground, através de um resistor cujo valor deve ser seleccionado tendo em vista a corrente do motor. Um impulso HIGH gera um reset, que força as quatro saídas a assumirem estados definidos. Dessa forma, a entrada "MReset" deve ser HIGH durante a operação normal, e um impulso LOW gera o reset. Os dois diodos na base do transistor garantem níveis TTL.

A frequência na entrada "MClock" determina a velocidade do motor. "MStepW" e "MDir" determinam a largura de passo (meio passo/passos inteiros) e a direção do movimento respectivamente.

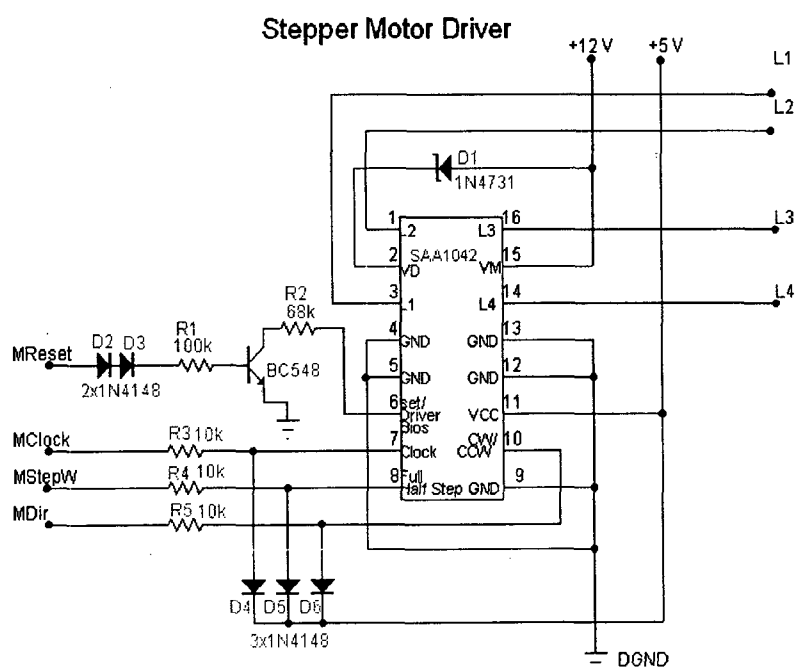


Figura A.3 - Esquema eletrônico do driver do motor de passo

5. Driver do Relê

O sinal de vídeo das duas câmeras (Mede-Furo e MTRES) deve ser demultiplexado antes da entrada da placa de vídeo. Para executar tal tarefa, foi selecionado um relê de sinais de vídeo, que apresenta um desempenho muito bom na faixa de elevadas frequências características desse tipo de sinal. O relê tem uma tensão de acionamento nominal de 24V, mas testes mostraram que 8 V já são suficientes para o acionamento. Para evitar uma tensão de alimentação adicional na fonte geral, o relê utiliza uma tensão de +12 V.

O circuito criado para a seleção do sinal do vídeo pode ser visualizado na figura A.4.

5.1 Especificações

- Resistência do relê: 1.05 k Ω
- Tensões na entrada: TTL
- Corrente de entrada: ≤ 2.5 mA

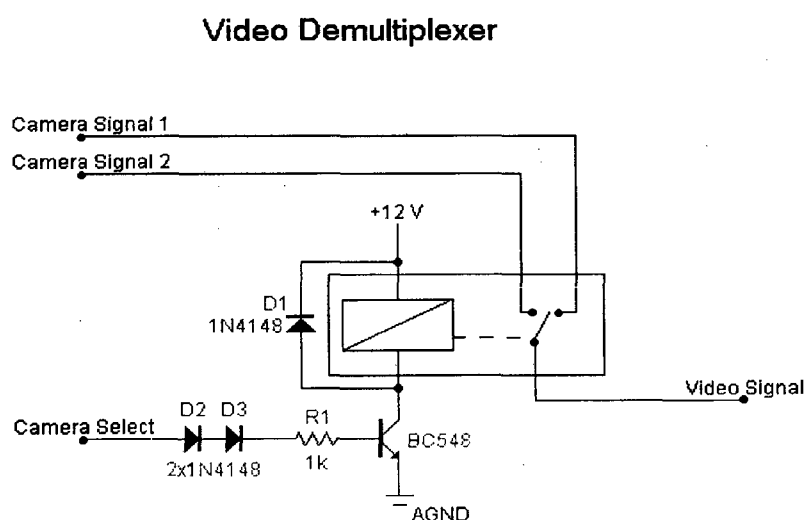


Figura A.4 - Esquema eletrônico do driver do relê

6. Sensor de Posição

Após ligar o sistema, a posição do motor de passo e conseqüentemente da turbina pneumática é desconhecida. Para referenciá-lo, é necessário um sensor que gere um sinal quando o motor de passo chega a uma certa posição. Foi escolhido um sensor

optoeletrônico, composto de um led infravermelho e um fototransistor. Medições mostraram que a corrente do fototransistor varia entre 2 e 70 μA com o led desligado (dependendo da orientação) em um ambiente de laboratório (luz fluorescente). Com o led operando com 20mA, a fotocorrente subiu ao valor esperado de $\approx 4 \text{ mA}$.

O circuito (figura A.5) deve fornecer um sinal para uma entrada digital da placa DAQCard-1200.

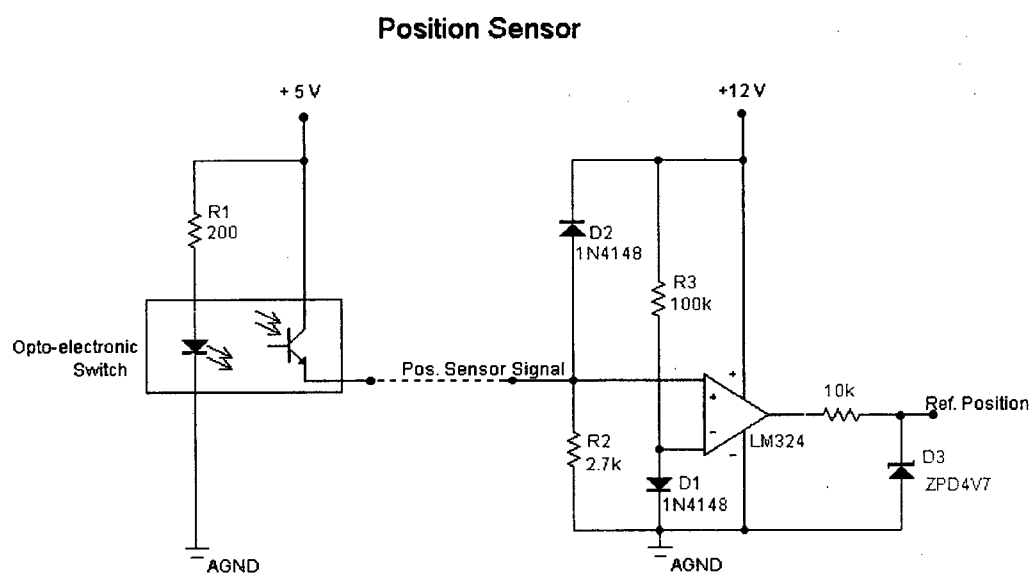


Figura A.5 – Esquema eletrônico do sensor de posição

6.1 Especificações

- Sensor optoeletrônico:

Corrente do led: $\approx 20 \text{ mA}$

Fator de ganho da corrente: 0.2

- Nível de chaveamento: 0.2 ... 1.0 mA

- Saída:

Tensões: TTL

Corrente: TTL

6.2 Funcionamento

Como a velocidade não é crítica, ao invés de um comparador, $\frac{1}{4}$ do quad-OP LM324 foi usado. A tensão de direção direta do diodo D1 serve como tensão de referência. Desse modo, o nível de chaveamento é aproximadamente $6.5V/R2 = 0.24 \text{ mA}$. O resistor R4 e o diodo zener DZ limitam a tensão de saída aos níveis TTL. O diodo D2 protege a entrada do amplificador operacional quando a tensão de alimentação de +5 V está ligada e a de +12 V está desligada.

O comparador não foi equipado com histerese. Se isso fosse necessário, um resistor entre a saída do amplificador e a sua entrada não-inversora seria suficiente.

7. Comparador "Laser On"

O módulo principal (MTRES) contém um laser diodo, que emite luz invisível aos olhos humanos. A luz pode vir a ser irradiada mesmo quando o medidor não se encontrar em posição de medição. Diante desse fato, é importante levar em conta a segurança de operação, dotando o sistema de um mecanismo de alerta, que indique que o laser está emitindo. O driver do laser está apto a fornecer tal indicação, através do acendimento de um led existente em sua carcaça externa. Entretanto, como o mesmo se encontra no interior da unidade eletrônica, não é possível visualizar tal led.

O circuito do comparador "Laser On" (figura A.6) deve, então, fornecer um sinal digital assim que a tensão controladora da potência do laser chegue a um valor crítico. Esse sinal irá acionar dois led's posicionados em locais bem visíveis na carcaça do medidor e na unidade eletrônica.

O laser diodo usado apresenta uma corrente limiar de emissão de radiação de 42,6 mA. Todavia, cada unidade tem um valor levemente diferente em relação às outras. O driver do laser diodo é usado no modo de corrente constante e apresenta uma função de transferência de 40 mA/V. Assim, a corrente limiar acima corresponde à tensão de controle de 1,07 V. Para ter certeza absoluta de que a saída emite um sinal antes do laser ligar, a tensão limiar é limitada a aproximadamente metade desse valor.

Comparator "Laser On"

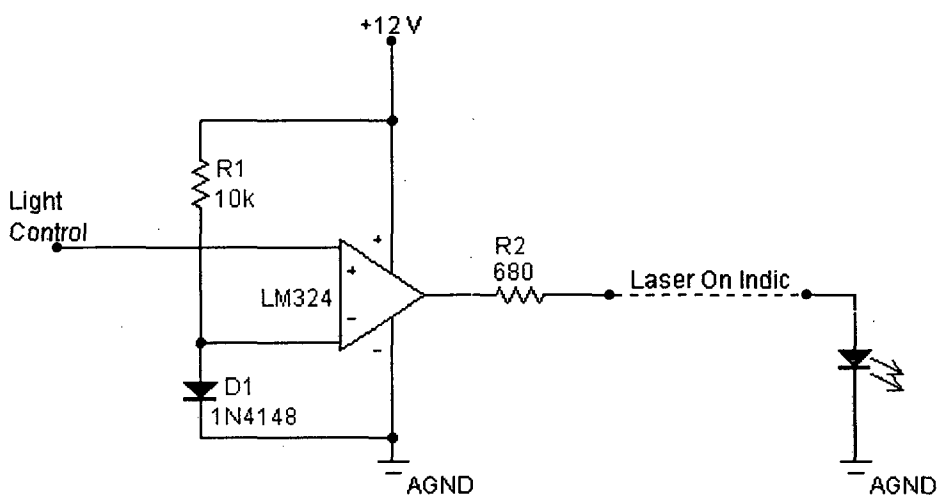


Figura A.6 - Esquema eletrônico do comparador "Laser On"

7.1 Especificações

- Tensão limiar: 0.5 ... 0.7 V
- Saída: led visível, 20 mA

7.2 Funcionamento

Para aproveitar os componentes já usados, é empregado $\frac{1}{4}$ do quad-OP LM324 como comparador. A tensão limiar é a tensão de direção direta do diodo. Segundo a folha de dados, o amplificador operacional fornece um mínimo de 15 mA na saída. Com o led ligado diretamente na saída, uma medição mostrou uma corrente de mais de 40 mA. Foi incluído o resistor R2 para limitar esta corrente.

8. Fontes

Os circuitos eletrônicos precisam das tensões de alimentação de +5V, +12V, -45V e, opcionalmente, -75V. Para viabilizar a execução do layout das fontes e especialmente do transformador, foi feito o levantamento do consumo dos grupos funcionais descritos acima e dos componentes eletrônicos comprados, como o driver do laser e as câmeras CCD. Com esses dados, foram calculadas as fontes (figuras A.7) e as especificações do transformador e dos capacitores de filtragem.

Para dar maior flexibilidade ao equipamento, o enrolamento primário deve permitir a operação com 110 e 220 V.

8.1 Especificações

- Dados gerais:

Potência total:	23 W
Tensão primária:	110 / 220 V

- Tensão mínima: 8.5 V

- + 5 V:

Corrente:	0.7 A
Ripple admissível:	2.0 V _{pp}
Tensão AC nominal:	8.5 V _{rms}
Capacitor:	2.2 mF / 16 V

- + 12 V

Tensão mínima:	16.0 V
Corrente:	1.5 A
Ripple admissível:	1.0 V _{pp}
Tensão AC nominal:	13.6 V _{rms}
Capacitor:	4.7 mF / 35 V

- -45 V

Tensão mínima:	50 V
Corrente:	26 mA
Ripple admissível:	3.0 V _{pp}
Tensão AC nominal:	40 V _{rms}
Capacitor:	22 μF / 68 V

- -75 V

Tensão mínima:	80 V
Corrente:	26 mA
Ripple admissível:	10 V _{pp}
Tensão AC nominal:	64 V _{rms}
Capacitor:	10 μF / 350 V

8.2 Funcionamento

A fonte de +5 V é o circuito padrão de aplicação do regulador de tensão 7805.

Para +12 V, o regulador 7812 é muito comum, mas sua corrente máxima é 1 A. Por isso, dois reguladores desse tipo são usados e cada um alimenta uma parte dos circuitos. Um regulador alimenta os componentes fora da placa, como ventilador e câmeras CCD, e o outro alimenta os demais circuitos.

O 137 é um regulador muito comum de tensão variável negativa. Segundo os dados técnicos, ele é limitado à tensão de saída de -37V. A literatura especializada explica que o circuito somente é sensível à diferença entre os potenciais na entrada e na saída. Assim sendo, teoricamente ele deveria suportar a tensão de saída de -75V.

O diodo Zener foi incluído de forma a garantir que a tensão entre a saída e a entrada nunca supere 37 V, mesmo durante o processo de ligamento e desligamento do sistema.

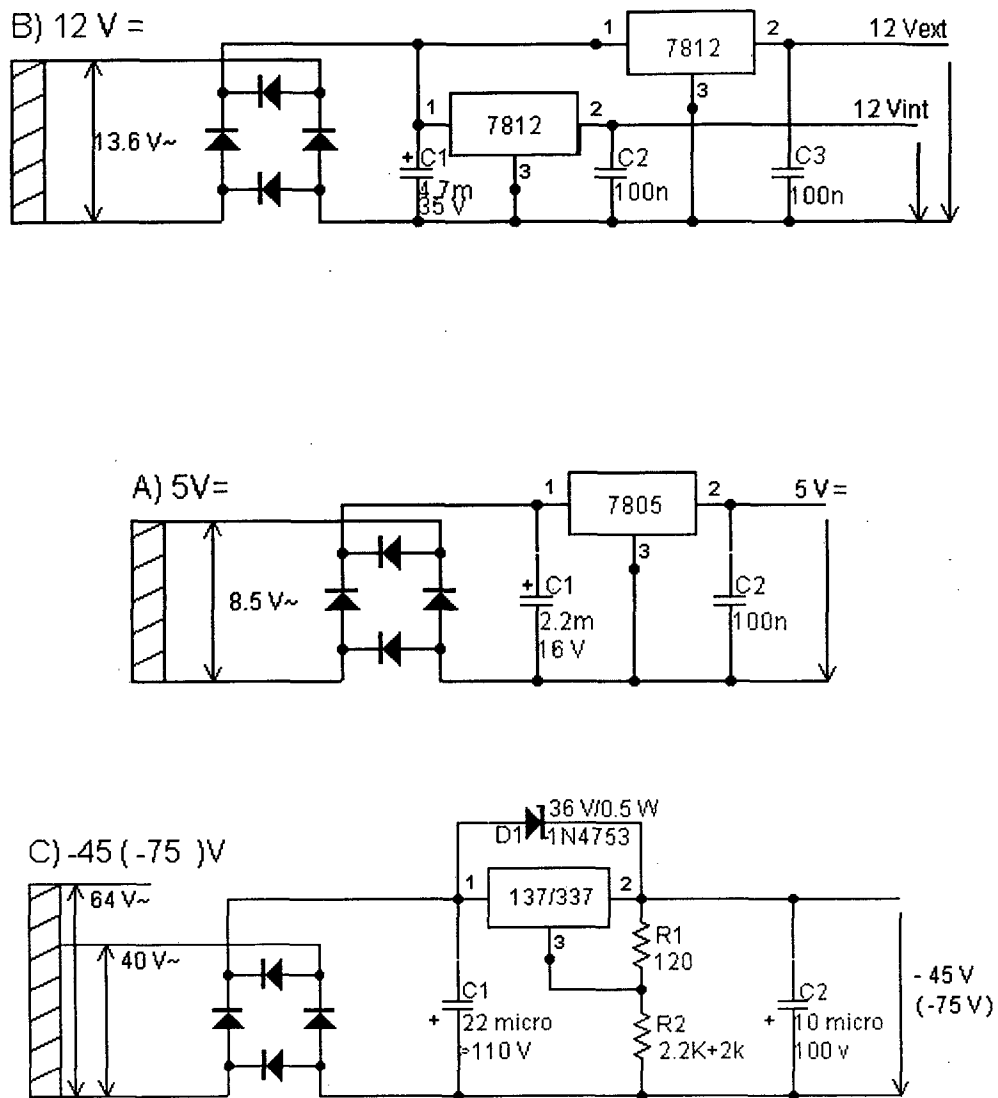


Figura A.7 – Esquemas eletrônicos das fontes do sistema

ANEXO B

Especificações do MTRES

Em linhas gerais, o caderno de especificações do MTRES ficou assim estruturado:

1) Grandezas a medir:

a.1) Gradientes de tensão ao longo da superfície:

O sistema deve ser capaz de medir tensões residuais localizadas com segurança, mesmo que ocorram variações ao longo da superfície medida. A região de influência deve ser a mínima possível para que valores localizados possam ser medidos.

a.2) Gradientes de tensão ao longo da profundidade:

O medidor deve ser capaz de quantificar o nível de tensões residuais ao longo da profundidade.

b) Faixa de Medição:

É conveniente medir níveis de tensão até níveis próximos da tensão de escoamento do material.

c) Incerteza de Medição

Uma incerteza menor que 10% da tensão de escoamento é desejável.

d) Área de medição

É interessante que a área de medição sobre a peça seja pequena de forma a permitir a medição em regiões próximas a obstáculos e que apresentem gradientes moderados de tensão ao longo da superfície e da profundidade.

2) Aplicações Típicas:

Peças metálicas (aços, cobre, alumínio e ferro fundido) de dimensões variadas, nos quais o dispositivo possa ser rigidamente fixado. São exemplos: estruturas metálicas, tubos, rotores, etc. O interesse pode recair sobre proximidades de cordões de solda, uniões entre peças e cantos.

3) Resultados a apresentar:

a) Gráficos:

Sempre que possível, os resultados devem ser apresentados na forma gráfica (círculos de Mohr, escala de cores e variação da tensão com a profundidade).

b) Números:

Os valores numéricos das tensões principais medidas devem ser apresentados, assim como a incerteza de medição correspondente. A apresentação das seguintes grandezas é indispensável: tensões residuais principais (máxima e mínima), direções principais e incertezas correspondentes.

c) Impressão

Resultados na forma gráfica e numérica devem ser impressos na forma de um relatório de registro das medições efetuadas. É desejável que tais resultados possam ser exportados para aplicativos Windows, como processadores de texto ou editores de desenho.

d) Tipos de Resultados

Resultados de caráter quantitativo são desejados. Não há nenhum interesse em informações de caráter qualitativo.

4) Condições de Operação

Os ambientes nos quais o medidor deve operar são diversos. A temperatura pode variar entre -10°C e 40°C . A presença de vibrações, umidade, fumaça ou vapores em geral não deve interferir no comportamento do equipamento.

5) Posição de Medição

As peças a serem medidas poderão estar orientadas em qualquer direção: horizontal, vertical e sobre-cabeça. O medidor deverá ter versatilidade suficiente para possibilitar medições em qualquer situação.

6) Portabilidade

O medidor deve ser pequeno, robusto e portátil. O computador e a eletrônica associada devem operar a poucos metros do medidor e ser de dimensões e massa reduzidas, para facilitar o transporte.

7) Condições de Acesso

O sistema deve possibilitar medições em locais com grandes curvaturas - côncavas ou convexas - com raios maiores ou iguais a 100 mm. Do mesmo modo, é desejável que se possa efetuar medições quando obstáculos estejam próximos da região de medição.

8) Tempo de Medição

a) Instalação

Deve ser possível efetuar a instalação do sistema sobre a peça a ser medida em 3 minutos.

b) Operação

Toda a operação de medição, incluindo furação, aquisição e processamento das imagens e apresentação dos resultados deve levar no máximo, 5 minutos. Eventualmente a impressão gráfica dos resultados pode levar alguns minutos adicionais.

9) Interface com o Usuário

Uma interface amigável, lógica, bem organizada e com representação gráfica dos resultados é desejável. O ambiente “Windows” deve ser empregado. Uma ferramenta de ajuda instantânea deve ser incorporada ao software.

10) Suprimento Externo

O sistema deve utilizar energia elétrica (110 V/ 220 V - 60 Hz) e também ar comprimido, com uma pressão mínima de 3 bar e máxima de 10 bar.

11) Nível do Operador

Após um breve treinamento de 8 horas, um técnico de laboratório deverá estar apto a operar o sistema sem dificuldades.

Cenário do MTRES

As especificações acima descritas foram empregadas na criação de um cenário em que se insere o MTRES, que ficou assim estruturado:

1) O que este módulo deve fazer?

Objetivos do produto:

- Permitir a medição de tensões residuais e gradientes de tensões ao longo da profundidade, em peças planas ou com grandes raios de curvatura;
- Medir tensões residuais em campo;
- Medir com incertezas menores que 10% da tensão de escoamento do material.

Objetivos do projeto:

- Gerar a versão piloto de um produto competitivo internacionalmente em termos de desempenho e preço;
- Oferecer um método alternativo prático e confiável para a indústria medir tensões residuais em campo;

- Geração de conhecimentos/capacitação para implementar futuros desenvolvimentos na área.

2. Como o sistema será utilizado?

a) Para medir tensões residuais uniformes ao longo da profundidade:

- Levar módulo até a peça;
- Posicionar/alinhar/referenciar o sistema em relação à peça;
- Adquirir imagem de referência;
- Executar furo sem remover o módulo;
- Adquirir imagem da condição final;
- Adquirir imagem ampliada do furo;
- Medir diâmetro do furo;
- Processar mapa de fase, quantificar, apresentar e documentar resultados.

3. Quanto usa?

O sistema deverá possibilitar até 5 ensaios por hora com tensões residuais uniformes (normalmente na fase de desenvolvimento de produtos, manutenção e inspeção).

4. Qual o tempo de ensaio?

- Para medir tensões residuais uniformes ao longo da profundidade: em torno de 10 minutos.
- Para medir perfis de tensões residuais variáveis ao longo da profundidade: em torno de 20 minutos.

Em ambas as situações, não deve haver gasto de tempo com a preparação de dispositivos de fixação do MTRES à peça. O sistema deve ser flexível para se adaptar facilmente à geometria das peças medidas.

5. Quem usa?

Entidade:

- Prestadores de serviços;
- Unidades de inspeção/manutenção;
- Centros de P&D.

Operador:

- Técnico treinado.

Segmentos:

Principalmente indústrias do setor metal mecânico (fundição, conformação, soldagem, sinterização).

6. Por quê usa?

- Redução do tempo de ensaio;
- Baixo custo de ensaio;
- Relação custo/benefício competitiva;
- Possibilidade de medir gradientes de tensões residuais.

7. Para que usa?

- Otimização de projetos e processos;
- Análise de integridade estrutural;
- Marketing para usuário;
- Fornecer dados para garantir a qualidade do componente.

8. Onde usa?

- Local: em campo, prevendo possibilidades de instalação em locais de difícil acesso.
- Aplicações típicas:
 - * Peças soldadas, conformadas, fundidas, usinadas, termicamente tratadas, localmente plastificadas;
 - * Materiais das peças: metais ferrosos e não-ferrosos, plásticos nobres.

9. Quando usa?

- No controle de qualidade, na manutenção e inspeção de componentes;
- Fase de desenvolvimento e otimização de produtos e componentes;
- Diagnóstico de problemas

10. Diferencial em relação a técnicas concorrentes: extensometria, raios-x, método magneto-elástico, ultra-som:

Vantagens:

- Possibilidade de medir com maior praticidade em campo;
- Possibilidade de medir gradientes de tensões residuais;
- Possibilidade de reduzir o tempo de ensaio;
- Simplificação do processo de medição;
- Redução do custo por ponto medido.

Desvantagens:

- Tecnicamente mais complexo;

- Custo inicial mais elevado;
- Não há “cultura” no mercado;
- Método semi-destrutivo;
- Pode exigir cuidados com segurança;
- Dificuldades em medir superfícies espelhadas;
- Menos robusto.

11. Tempo para o desenvolvimento

18 meses

12. Ciclo de Vida

- Desenvolvimento até outubro de 1999;
- Industrialização a partir de junho de 2000;
- Obsolescência tecnológica a partir de 2005.

13. Confiabilidade pretendida

- Envolve material de consumo (fresas);
- Manutenção periódica a cada 500 horas de utilização.

14. Qualidade intrínseca

Competitivo internacionalmente

15. Grau de domínio tecnológico

Inovador

Detalhamento das Funções do MTRES

1. Medir Tensões Residuais

1.1 Obter Dados

1.1.1 Posicionar dispositivo sobre a região de medição

- 1.1.1.1 Alinhar-se com a peça (altura e posição);
- 1.1.1.2 Mirar posição onde o furo será executado;
- 1.1.1.3 Manter-se fixo em relação à peça (impedindo movimentos relativos);
- 1.1.1.4 Acessar a região de medição.

1.1.2 Iluminar a região de medição

- 1.1.2.1 Gerar feixe luminoso coerente e colimado;
- 1.1.2.2 Direcionar a luz ao espelho cônico;
- 1.1.2.3 Promover iluminação uniforme;
- 1.1.2.4 Fornecer iluminação com intensidade adequada (ajustável).

1.1.3 Aliviar tensões

- 1.1.3.1 Executar furo cego coaxial com o eixo óptico do sistema e com geometria apropriada;
- 1.1.3.2 Controlar parâmetros de furação (velocidade de avanço e profundidade);
- 1.1.3.3 Não introduzir novas tensões residuais;
- 1.1.3.4 Não sujar e não alterar a superfície.

1.1.4 Adquirir imagens

- 1.1.4.1 Captar imagens;

1.1.4.2 Deslocar fase da luz;

1.1.4.3 Adquirir imagens intermediárias

1.2 Processar Dados

1.2.1 Obter dados de entrada para processamento

1.2.1.1 Medir diâmetro do furo;

1.2.1.2 Medir/controlar profundidade do furo;

1.2.1.3 Inserir dados do material (módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson);

1.2.2 Processar imagens

1.2.2.1 Subtrair mapas de fase;

1.2.2.2 Determinar centro para o eixo óptico;

1.2.2.3 Definir região a analisar;

1.2.2.4 Definir posição/quantidade de pontos do anel de amostragem;

1.2.2.5 Remover salto de fase;

1.2.2.6 Discretizar dados da imagem.

1.2.3 Calcular resultados

1.2.3.1 Calcular tensões residuais e direções principais;

1.2.3.2 Calcular gradiente de tensões ao longo da profundidade

1.2.3.3 Compensar efeitos indesejáveis;

1.2.3.4 Autodetectar falhas;

1.2.3.5 Estimar incerteza.

1.3 Apresentar Resultados

- 1.3.1** Visualizar na tela o valor das tensões, dados do material, dados do furo, incertezas, etc.)
- 1.3.2** Imprimir resultados em forma de um relatório completo;
- 1.3.3** Exportar resultados em formatos compatíveis.

ANEXO C

Relação de Equipamentos Utilizados e Fornecedores

- **Câmera CCD "on board" 1/3"**

Fornecedor: Marshall Electronics Inc. (EUA)

Fabricante: idem

Modelo: V-1260

Especificações gerais:

- Resolução horizontal: 540 TV lines
- Saída de Vídeo: Padrão "composite" 1 V pico a pico
- Sensibilidade: 0,4 lux
- Relação sinal/ruído: 48 dB
- Gama: 0,45
- Ganho Automático: ligado de fabricado
- Tensão de alimentação: 7,5 a 14,5 V DC
- Consumo: 1,7 W
- Dimensões: 37x38x33 mm

Preço Unitário: U\$ 350,00

- **Driver para o laser-diodo**

Fornecedor: Wavelength Electronics Inc. (EUA)

Fabricante: idem

Modelos: PLD-200

Especificações gerais:

- Corrente máxima de alimentação: 200 mA
- Tensão de alimentação: + 5 V DC

Preço Unitário: U\$ 300,00

- **Piezoatuadores**

Fornecedor: Piezomechanik GmbH (Alemanha)

Fabricante: idem

Modelo: Pst 150/7/7

Especificações gerais:

- Curso total: 7 μm
- Constante Piezoelétrica: 0,047 $\mu\text{m/V}$
- Máxima tensão: 150 V

Preço Unitário: U\$ 260,00

• **Laser-diodo**

Fornecedor: Power Technology Inc./ Bluesky Research (EUA)

Fabricante: Hitachi

Quantidade: 07

Modelo: HL7851G

Especificações gerais:

- Corrente Threshold: 42,64 mA
- Comprimento de onda: 785 nm
- Potência de saída: 40 mW

Preço unitário: com lente da Bluesky Research: U\$ 300,00

sem lente: U\$ 85,00

• **Motor de Passo**

Fornecedor: RS Components do Brasil

Fabricante: desconhecido

Quantidade: 01

Modelo: 318-705

Especificações gerais:

- Força de arranque (atrito estático): 4 N
- Passo: 50 μm ou 25 μm
- Tensão de alimentação: 12 V DC
- Resistência por fase do motor: 84 Ω
- Incerteza do passo: $\pm 5 \mu\text{m}$

Preço unitário: U\$ 150,00

• **Placa de aquisição/geração de sinais digitais/analógicos**

Fornecedor: Electronic Graphics Inc. (EUA)

Fabricante: National Instruments

Quantidade: 01

Modelo: DAQ 1200

Preço unitário: U\$ 700,00

• **Placa de Vídeo**

Fornecedor: Electronic Graphics Inc. (EUA)

Fabricante: MRT Micro Inc.,

Quantidade: 01

Modelo: Video Port Professional

Preço unitário: U\$ 250,00

- **Turbina Pneumática**

Fornecedor: Hikari Bras S/A

Fabricante: NSK-Nakanishi Inc. (Japão)

Quantidade: 01

Modelo: Presto

Especificações gerais:

- Comprimento total: 130 mm
- Diâmetro máximo: 16,6 mm
- Massa: 71 g
- Velocidade: 320.000 rpm
- Diâmetro de fresas: 1,6 mm
- Pressão máxima: 2,5 bar

Preço unitário: US\$ 1.400,00