

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

SISTEMA OPTOELETRÔNICO
AUTOMATIZADO PARA A MEDIÇÃO
DE ROSCAS EXTERNAS DE PRECISÃO

TESE SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA PARA
OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA

MANUEL JOAQUIM DOS SANTOS JÚNIOR

FLORIANÓPOLIS, MARÇO DE 1993

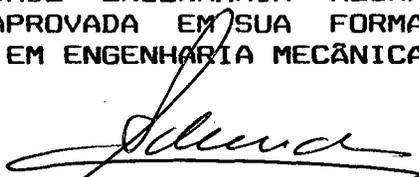
SISTEMA OPTOELETRÔNICO AUTOMATIZADO PARA MEDIÇÃO DE
ROSCAS EXTERNAS DE PRECISÃO

MANUEL JOAQUIM DOS SANTOS JUNIOR

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

DOCTOR EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO
SÓLIDOS, APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA



Prof. CARLOS ALBERTO SCHNEIDER, Dr. Ing. - Orientador



Prof. BEREND SNOIJER, Dr. Ing. - Coordenador do CPGEM

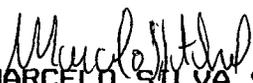


BANCA EXAMINADORA

Prof. CARLOS ALBERTO SCHNEIDER, Dr. Ing - Presidente



Prof. WALTER LINDOLFO WEINGARTNER, Dr. Ing



Prof. MARCELO SILVA SHEL, Dr. em Ciências



Prof. VOLNEI ANDERSSON, Dr. Eng.



PROF. ARMANDO ALBERTAZZI GONÇALVES JUNIOR, Dr. Eng.

AGRADECIMENTOS

a meus filhos e a minha esposa pelo apoio e compreensão

aos acadêmicos Milton Anselmo Jr., Marcelo Gevaerd da Silva e José Paulo Alves pelo grande apoio na parte experimental final

a todos os amigos, colegas e colaboradores do CERTI/Labmetro e da CIENTEC que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMARIO

Simbologia	X
Glossário	XI
Resumo	XVI
Abstract	XVII
1 - INTRODUÇÃO	1
2 - ROSCAS DE PRECISÃO	9
2.1 - Definição das grandezas determinantes de uma rosca	9
2.1.1 - Roscas cilíndricas	10
2.1.2 - Roscas cônicas	13
2.2 - Classificação das roscas quanto a precisão	14
2.2.1 - Roscas normais	22
2.2.2 - Roscas de precisão	22
2.2.3 - Roscas de alta precisão	23
2.3 - Sistema de referência para medição de padrões roscados	23
2.4 - Proposta de definição para as grandezas deter- minantes	26
2.5 - Caracterização dos erros nas grandezas deter- minantes de roscas de precisão	27
2.5.1 - Erros do passo	28
2.5.2 - Erros do diâmetro de flanco	33
2.5.3 - Erros do ângulo de flanco	33
2.6 - Causas de erros nas grandezas determinantes de roscas de precisão	34
2.6.1 - Causas de erros que são comuns a todas gran-	

dezas determinantes	35
2.6.2 - Passo: causas de erros e suas conseqüências	36
2.6.3 - Diâmetro de flanco: causas de erros e suas conseqüências	36
2.6.4 - Ângulo de flanco: causas de erros e suas conseqüências	37
2.7 - Geometria global de roscas de precisão	38
2.8 - Considerações finais	39
3 - ESPECIFICAÇÃO METROLÓGICA E OPERACIONAL DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO ADEQUADO PARA ROSCAS EXTERNAS DE PRECISÃO	40
3.1 - Relação entre a tolerância de fabricação e a incerteza de medição do sistema de medição a ser utilizado	40
3.2 - Incertezas admissíveis em um sistema de medição de roscas de precisão	44
3.2.1 - Incertezas de medição admissíveis para a medição do diâmetro de flanco de roscas de precisão	45
3.2.2 - Incertezas de medição admissíveis para a medição do passo de roscas de precisão	45
3.2.3 - Incertezas de medição admissíveis para a medição do ângulo de flanco de roscas de precisão	46
3.3 - Aspectos funcionais e operacionais desejáveis	46
3.4 - Considerações finais	47
4 - AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS EXISTENTES DE MEDIÇÃO DE ROSCAS EXTERNAS DE PRECISÃO	48
4.1 - Métodos de medição do passo	49

4.1.1 - Medição com sensor esférico em comparador Abbe	49
4.1.2 - Outros métodos de medição do passo	51
4.2 - Métodos de medição do ângulo de flanco	55
4.2.1 - Método óptico	56
4.2.2 - Outros métodos de medição do ângulo de flanco	57
4.3 - Métodos de medição do diâmetro de flanco	60
4.3.1 - Método de medição por três arames	60
4.3.2 - Outros métodos de medição do diâmetro de flanco	64
4.4 - Considerações finais	66
5 - O SISTEMA DE MEDIÇÃO DE ROSCAS EXTERNAS DE PRECISÃO	69
5.1 - Sistema optoeletrónico para medição automatizada de roscas - OSSAM	70
5.1.1 - Módulo posicionador	70
5.1.2 - Módulo apalpador	73
5.1.3 - Módulo controlador	74
5.2 - OSSAM: Metodologia de medição	77
5.2.1 - A preparação da medição	77
5.2.2 - Medição individual das grandezas	78
5.2.3 - Medição simultânea das grandezas determinantes	78
5.3 - O sistema experimental	81
5.3.1 - Parte física	81
5.3.2 - Software	84
5.4 - Considerações finais	86
6 - DETECÇÃO DA POSIÇÃO DE UM PONTO DO FLANCO DA ROSCA	87
6.1 - Transdutor optoeletrónico	89

6.2 - Transdutor com sensor de uma só superfície ativa	90
6.2.1 - Circuito eletrônico do transdutor	90
6.2.2 - Função característica do sinal gerado pelo sensor	91
6.2.3 - Critérios para definição do valor da tensão de referência	97
6.2.4 - Características metrológicas do sistema de medição com transdutor optoeletrônico cujo sensor tem uma superfície ativa	100
6.2.5 - Comparação da curva característica teórica com a real	105
6.2.6 - Conclusão	107
6.3 - Transdutor optoeletrônico cujo sensor tem mais de uma superfície ativa	108
6.3.1 - Fotodetector de quadrantes	109
6.3.2 - Circuito eletrônico do transdutor	110
6.3.3 - Função característica do sinal gerado pelo sensor	112
6.3.4 - Análise da função da curva característica	124
6.3.5 - Características metrológicas do sistema de medição com transdutor optoeletrônico cujo sensor tem mais de uma superfície ativa	126
6.3.6 - Comparação da curva característica teórica com a real	128
6.3.7 - Conclusão	129
6.3.8 - Fotodetector com a forma ideal	130
6.4 - Considerações relativas a detecção dos pontos no flanco da rosca com o transdutor desenvol-	

vido	131
6.4.1 - Incerteza do valor da coordenada de um ponto	132
6.4.2 - Dimensões mínimas para as roscas de precisão medidas com o protótipo experimental	134
6.4.3 - Considerações sobre o número de pontos do flanco da rosca cujas coordenadas devem ser obtidas	135
6.4.4 - Posicionamento dos pontos no flanco da rosca	137
7 - PROCEDIMENTOS DE CÁLCULO DO VALOR DAS GRANDEZAS DE- TERMINANTES DE UMA ROSCA EXTERNA E DOS RESPECTIVOS ERROS	138
7.1 - Procedimentos para obtenção das coordenadas dos pontos referentes aos flancos da rosca	139
7.1.1 - Rosca cilíndrica	139
7.1.2 - Roscas cônicas	140
7.2 - Testes executados com a finalidade de eliminar leituras incorretas quando da aquisição de da- dos	140
7.2.1 - Teste da validade das coordenadas adquiridas	141
7.2.2 - Teste para eliminar erros com valor maior do que o valor da repetibilidade	142
7.2.3 - Teste da representabilidade do flanco da rosca por uma reta	142
7.3 - Ângulo de flanco e respectivos erros	143
7.3.1 - Procedimento de cálculo do ângulo de flanco	143
7.3.2 - Cálculo do ângulo formado entre a direção de medição e o eixo da rosca	145
7.4 - Passo e respectivos erros	145
7.4.1 - Procedimento de cálculo do passo	145

7.4.2 - Procedimento de cálculo dos erros do passo	147
7.5 - Diâmetro de flanco e respectivos erros	147
7.5.1 - Padrão especial para a determinação dos erros sistemáticos na medição de roscas de precisão	149
7.5.2 - Procedimento de cálculo do diâmetro de flanco	153
7.5.3 - Procedimento de cálculo dos erros	155
7.6 - Considerações finais	157
8 - RESULTADOS OBTIDOS NOS TESTES EXPERIMENTAIS	158
8.1 - Teste de repetibilidade do resultado	162
8.2 - Medição do passo	165
8.2.1 - Resultados	165
8.2.2 - Avaliação da incerteza de medição	165
8.3 - Medição do ângulo de flanco	167
8.3.1 - Resultados	167
8.3.2 - Avaliação da incerteza de medição	167
8.4 - Medição do diâmetro de flanco	168
8.4.1 - Resultados	168
8.4.2 - Avaliação da incerteza de medição	170
8.5 - Considerações finais	172
9 - CONCLUSÃO	173
10- BIBLIOGRAFIA	179

SIMBOLOGIA

a	= ampliação óptica
A	= área iluminada do fotodetector
α_i	= ângulo de flanco
β	= ângulo de avanço
CCD	= charge coupled device
CMM	= máquina de medir por coordenadas
d	= diâmetro maior de uma rosca externa
d_z	= diâmetro de flanco de uma rosca externa
DM	= dispersão da medição
$E_{(\alpha_i)_i}$	= erro específico de cada ângulo de flanco
$E_{(d_z)_i}$	= erro específico de cada diâmetro de flanco
E_{p_i}	= erro específico de cada passo da rosca
E_s	= erro sistemático
E_{t_p}	= erro do passo de uma rosca
f	= distância da superfície de referência até o primeiro filete de rosca medido
I_f	= incerteza de fabricação
I_m	= incerteza de medição
IT	= intervalo de tolerância
OSSAM	= Sistema optoeletrônico automatizado para medição de roschas externas de precisão
p	= passo de uma rosca externa
S_b	= sensibilidade do transdutor optoeletrônico
U	= tensão gerada pelo fotodetector depois de amplificada

GLOSSÁRIO REFERENTE A METROLOGIA

Terminologia adotada no LABMETRO, válida em forma de proposta, que procura conciliar, na medida da lógica e validade, a terminologia utilizada nacional e/ou internacionalmente através de normas (ISO, BSI, OIML, DIN, BIPM, ASTM, ABNT, Portaria 102/INMETRO e outras).

Aferição - Procedimento experimental que visa determinar se um sistema de medição satisfaz as exigências regulamentares estabelecidas por uma lei, norma ou especificação técnica. É uma operação de cunho legal, na qual é emitido um certificado e/ou selo de conformidade.

Calibração - Conjunto de operações que estabelece, em condições específicas, a correspondência entre os valores indicados por um sistema de medição ou por uma grandeza materializada e os valores verdadeiros convencionais correspondentes da grandeza medida.

Controle dimensional - Medição de uma ou mais grandezas geométricas com a finalidade de verificar se o valor das mesmas satisfazem ou não a tolerância especificada.

Controle de qualidade - É o conjunto de atividades necessárias para verificar o quanto os produtos ou serviços preenchem as exigências a eles atribuídos. O controle de qualidade tem a função de definir a inspeção (procedimentos, instrumentos, dispositivos, automatização, etc.), bem como a realização da inspeção (visual ou instrumentada, total ou por amostragem, etc.), propriamente dita.

Dispersão - Variação do valor numérico de uma grandeza em decorrência das medições sucessivas da mesma grandeza; flutuação de uma variável aleatória num conjunto de observações.

Dispersão de medição - Especifica a faixa de valores dentro da qual, com uma probabilidade estatística definida, se situará o erro aleatório de uma medição.

Erro aleatório - Um componente do erro da medição que, em medições sucessivas de uma mesma grandeza, varia de modo imprevisível.

Erro da medição - Medida menos o valor verdadeiro convencional da grandeza medida.

Erro sistemático - Um componente do erro da medição que, em medições sucessivas de uma mesma grandeza, permanece constan

te ou varia de modo previsível.

Exatidão - Proximidade da concordância entre o valor verdadeiro e a média resultante que seria obtida pela aplicação do procedimento experimental em um grande número de vezes.

Nota: Quanto menor a parte sistemática dos erros experimentais que afetam os resultados, mais exato é o procedimento.

Garantia da qualidade - Conjunto de atividades que executadas de forma sistemática e planejada, visam assegurar a adequação à utilização que se deseja de um produto ou serviço, dentro de níveis de desempenho, confiabilidade e custos aceitáveis.

Grandeza (a medir) - Característica de um fenômeno, corpo ou substância que pode ser qualitativamente diferenciada e quantitativamente determinada.

Observação:

O termo "grandeza" pode referir-se a uma grandeza em um sentido geral (veja exemplo a) ou a uma grandeza específica (veja exemplo b).

Exemplos:

- a) Grandezas em um sentido geral: comprimento, tempo, massa, temperatura, resistência elétrica;
- b) Grandezas específicas: diâmetro de flanco de uma rosca, comprimento de uma barra, resistência elétrica de um fio.

Índice de qualidade - Número que em normas sobre tolerâncias de roscas e de seus calibradores especifica o valor da

tolerância das grandezas da rosca em função de seu diâmetro maior.

Incerteza da medição (do sistema de medição) - Erro máximo que pode ser cometido por um sistema de medição em toda a sua faixa de operação.

Intervalo de Tolerância - Intervalo de valores admissíveis para o valor medido de uma grandeza, limitado pelas dimensões máxima e mínima especificadas.

Precisão - Qualidade de uma medida ou instrumento de medição que apresentam pequeno erro máximo. O termo precisão também pode ser aplicado a elementos de máquinas para indicar que o mesmo está submetido a um pequeno intervalo de tolerância.

Qualidade - Propriedade, atributo ou condição de um produto capaz de distingui-lo dos outros e de atender às necessidades de consumidores específicos.

Repetibilidade - Grau de concordância entre medidas sucessivas de uma mesma grandeza, efetuadas com a totalidade das condições seguintes:

- a) mesmo método de medição;
- b) mesmo observador;
- c) mesmo instrumento de medição;
- d) mesmo local;
- e) mesmas condições de utilização;

f) repetição em instantes sucessivos.

Nota: A repetibilidade pode exprimir-se quantitativamente pela dispersão das medidas.

Rosca de precisão - Roscas fabricadas com qualidade superior a das roscas convencionais com o objetivo de atender aplicações especiais.

Valor verdadeiro convencional (de uma grandeza) - Valor de uma grandeza que, para um determinado objetivo, pode substituir o valor verdadeiro.

Observação:

O valor verdadeiro convencional é, em geral, considerado como suficientemente próximo do valor verdadeiro para que a diferença seja insignificante para o determinado objetivo.

RESUMO

O controle dimensional de roscas externas de precisão apresenta uma série de problemas que ainda não foram satisfatoriamente resolvidos pelos métodos de medição existentes. Por exemplo: são necessários mais de um sistema de medição para realizar a calibração; o tempo total dispendido é muito elevado e as incertezas de medição são maiores que as normalmente admissíveis.

Em consequência do exposto acima foi realizada uma análise dos métodos de medição existentes, com o objetivo de levantar vantagens e desvantagens de cada um e através das desvantagens identificar a origem dos problemas.

Com esta análise e com o estudo dos modernos métodos de medição chegou-se a um sistema automatizado de medição por coordenadas com transdutor optoeletrônico que testado e aperfeiçoado constitui-se num avanço às medições de roscas externas de precisão.

Os testes realizados e os resultados das medições de calibradores roscados e pinos padrão comprovam a viabilidade do sistema de medição e da metodologia propostos.

Dentre as vantagens do método proposto pode-se ressaltar a possibilidade de medição simultânea de todas as grandezas de interesse e uma significativa redução no tempo de medição e nas incertezas de medição.

ABSTRACT

Dimensional control of precision screws presents a wide range of unsatisfactorily solved problems when measured by conventional measurements methods. As to mention: it is needed more than one measurement system to perform a calibration; the total time required for calibration is too much; measurement inaccuracy is greater than usually acceptable.

Following those findings, all measurement methods were analysed to establish advantages and disadvantages of each one and, by disadvantages, to identify the measurement problems source.

Looking through the state-of-the-art an automated measuring system utilizing coordinates coupled with an optoelectronic transducer, was devised. The system was fully developed and tested and is a step forward in the field of precision screw measurement.

System feasibility and methodology was proved by several tests and results of measurements of screw gauges and pin gauges. The tests agree very closely with the used standards.

The proposed technology has multiple advantages: simultaneous measurement of all variables of interest can be performed in one single operation, offering a significant reduction in measurement time and sharp improvement in accuracy.

1. INTRODUÇÃO

As roscas são componentes fundamentais em certos conjuntos mecânicos, seja para fixação ou transmissão de movimento. Não existe previsão de que as mesmas sejam substituídas, pelo menos a médio prazo. Por outro lado, o fato do progresso tecnológico estar aumentando os requisitos que devem ser satisfeitos pelos componentes conduz, como consequência, cada vez mais, a uma exigência de roscas com maior precisão, isto é, com sua geometria mais próxima da ideal. Com o objetivo de atender a esta demanda, os processos de fabricação /1/ estão sendo, permanentemente, aperfeiçoados a fim de melhorar as suas atuais condições de produção e satisfazer as crescentes necessidades de roscas para aplicações especiais /2/.

O ideal seria que as roscas produzidas pelas máquinas ferramentas tivessem uma qualidade que pudesse ser garantida sem a necessidade de controle dimensional. Como isto é impraticável, no momento, diversos controles geométricos devem ser executados para que seja possível garantir a qualidade das mesmas

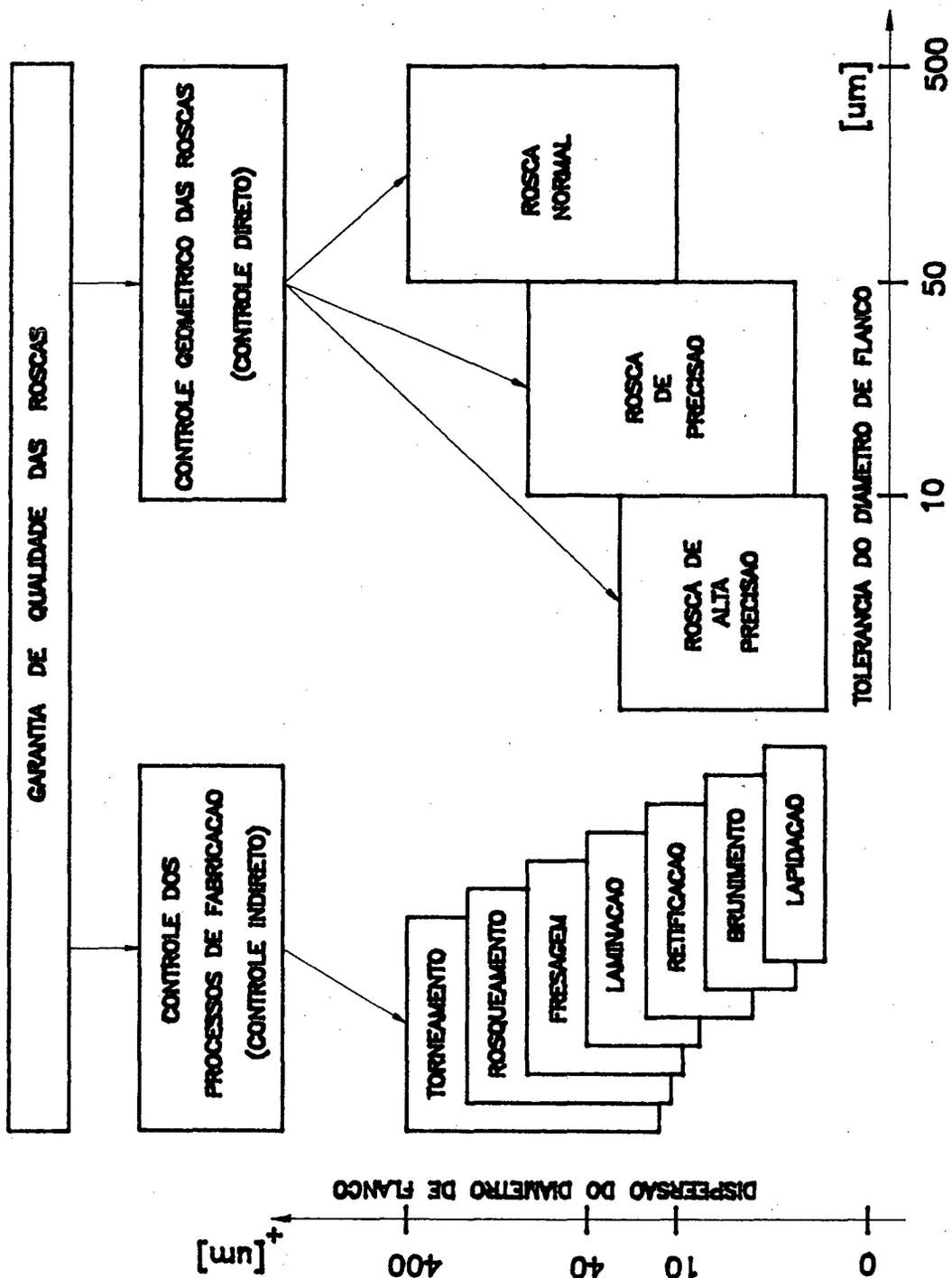
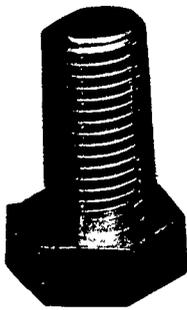


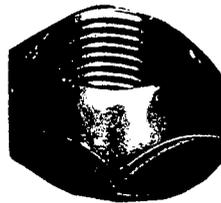
Figura 1.1. Garantia da qualidade de fabricação de roscas: controle direto e indireto.

(fig. 1.1). Assim sendo, a garantia da qualidade das roscas, começa, indiretamente, pelo controle preventivo exercido sobre as máquinas ferramentas (calibração da escala, controle geométrico da máquina ferramenta /3/) e pelo controle ativo durante a fabricação (controle sobre o ajuste da posição da ferramenta para compensar desgastes, controle da temperatura). Além disso, os componentes fabricados (porcas, fusos e parafusos) também precisam ser controlados, seja por amostragem ou não. Este é o controle chamado de direto de acordo com a distribuição apresentada na figura 1.1. O controle direto pode ser realizado com calibradores ou pela medição das grandezas da rosca. Geralmente, prefere-se à medição das grandezas, em vez do controle com calibradores. A exceção é a rosca interna. Como apresenta dificuldades na medição das suas grandezas, o controle é geralmente realizado com a utilização de calibradores /4/. Por esta razão, os calibradores roscados tampão são mais utilizados no controle da qualidade de roscas do que os calibradores do tipo anel. A figura 1.2 apresenta os principais tipos de roscas de precisão: as roscas especiais (porcas, parafusos e fusos), os calibradores, o parafuso micrométrico e o padrão roscado.

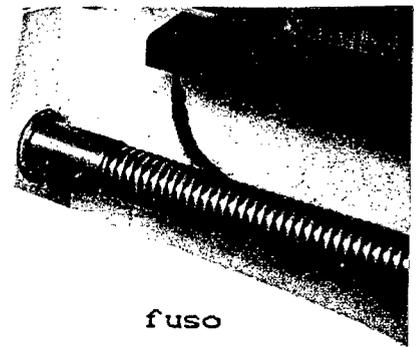
No entanto, para que os calibradores possam garantir a qualidade das roscas internas há necessidade de que os próprios calibradores sejam calibrados periodicamente, a fim de que, se tenha a garantia desejada de que o mesmo esteja cumprindo com a sua finalidade. Entretanto, as medições necessárias a uma calibração de calibradores roscados tampão apresentam, ainda, muitos problemas não solucionados tais como: medições muito



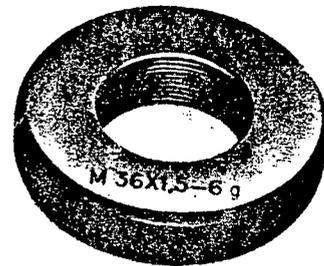
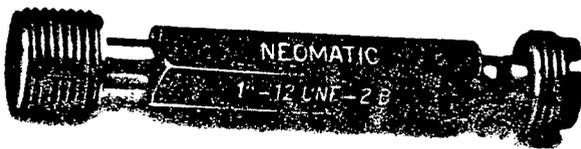
parafuso



porca



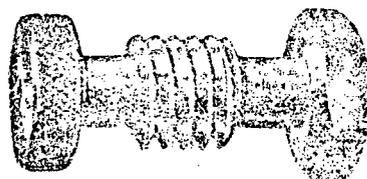
fuso



calibradores roscados



parafuso micrométrico



padrão roscado

Figura 1.2. Exemplos de roscas de precisão

demoradas e uma razão tolerância/incerteza de medição inferior a desejável. A calibração de calibradores tampão roscados era um dos serviços tecnológicos executados pelo Laboratório de Metrologia da UFSC - LABMETRO, hoje feito pelo Centro Tecnológico de Qualidade Industrial da Fundação CERTI, em apoio ao setor metal-mecânico da região. Os problemas acima relacionados afetam sensivelmente as atividades laboratoriais a ponto de ter motivado a realização do presente estudo.

Em função das mencionadas restrições, muitas pesquisas têm sido realizadas, buscando melhorar os métodos de medição das grandezas das roscas. Porém, como o problema mais crítico é a medição do ângulo de flanco os estudos começaram pela mesma. Assim, em 1963 foi desenvolvido um sensor (para parafusos ou porcas com diâmetros maiores que 50 mm), cuja finalidade é de permitir a realização desta medição em Máquinas de Medir por Coordenadas (CMM) /5/. Ainda com o objetivo da medição do ângulo de flanco, em 1978 foram desenvolvidos calibradores para serem empregados em microscópios de medição /6/. Em 1982 surgiu o primeiro significativo avanço, que contempla a medição de todas as grandezas mais importantes das roscas. Embora seja só para roscas com diâmetro acima de 50 mm, foi desenvolvido um suporte especial, para ser utilizado em CMM, que possibilita uma redução de até $\pm 2 \mu\text{m}$ na incerteza de medição /7/. Em 1986 foi apresentado um método para a medição do passo, que utiliza um laser HeNe, com a finalidade de gerar um holograma e com ele definir as posições de leitura, e um laser interferométrico para fornecer as coordenadas destas posições /8/. O emprego de sensor óptico na medição de roscas, em mi-

microscópios, apareceu em 1988 /9/. Neste trabalho o sensor foi empregado para o levantamento do perfil projetado pelo filete de calibradores API roscados de grande diâmetro. Entretanto, os resultados do primeiro trabalho conhecido sobre medição de roscas de precisão, para diâmetros abaixo de 100 mm, correspondem aos testes de viabilidade técnica realizados em roscas de precisão, para fins desta tese, publicados em 1989 /10/. Estas medições foram executadas em um microscópio de medição com o emprego de fotodetector com uma única superfície ativa. Na mesma ocasião foram publicados os resultados de uma outra pesquisa para a medição de roscas, porém não de precisão. Embora utilizando, também, o mesmo tipo de sensor em um microscópio de medição, o princípio de medição deste outro trabalho é diferente /11/.

A medição com sensores ópticos evoluiu para o emprego de fotodetectores com mais de uma superfície ativa, sendo que os primeiros resultados apareceram a partir de 1986 com a medição automatizada da largura de fendas em chapas planas /12/. Já em 1987 era lançado o primeiro produto comercial com este tipo de sensor, como acessório à medição óptica de peças de forma simples /13/. No ano seguinte, foi publicado um artigo onde este acessório aparece acoplado a um microscópio para a execução de medição automatizada /14/. O primeiro trabalho técnico, aplicado à medição de roscas, utilizando sensores com mais de uma superfície ativa, foi publicado, internamente, por um fabricante de instrumentos de medição, em 1989 /15/, porém o mesmo não era, ainda, aplicável às roscas de precisão. Só em 1991 apareceu a primeira publicação relativa à medição de roscas de

precisão com o referido sensor /16/, embora sem dados com referência ao valor das incertezas de medição.

Constata-se, deste modo, uma forte tendência atual pela automatização da medição, visando ganhos na qualidade da medição com a redução da incerteza de medição, resultante da utilização de sensores que definem com maior precisão a posição das grandezas a serem medidas, e ganhos económicos, principalmente pela redução do tempo necessário a uma calibração.

Ao tomar conhecimento do contexto, que modela o estado da arte da medição de roscas de precisão, pode-se, então, direccionar os estudos para formulação de uma proposta que venha minimizar, as já detectadas limitações dos processos de medição existentes /17/.

A análise do problema foi iniciada pelo estudo do objeto (rosca de precisão). O estudo do objeto teve como finalidade o conhecimento dos símbolos, da terminologia, das definições peculiares e das grandezas gerais e específicas ao mesmo. Com base neste estudo foi realizado um estudo mais aprofundado dos métodos de medição de roscas de precisão existentes, determinando as vantagens e desvantagens de cada um. A partir destes conhecimentos foi idealizado um sistema de medição de roscas externas de precisão formado por uma mesa de coordenadas, onde seria fixada a rosca, e por um módulo de apalpação óptica encarregado de definir as posições onde seriam lidas as coordenadas referentes a pontos nos flancos da rosca. Com este sis-

tema buscou-se obter as seguintes principais vantagens:

- a) uma sensível redução no tempo total necessário à medição das grandezas determinantes de uma rosca externa de precisão;
- b) simplicidade de operação do sistema de medição e de cálculo das grandezas medidas;
- c) incertezas de medição menores que as dos métodos de medição em uso atualmente.

Uma vez idealizado o sistema de medição de roscas de precisão, um protótipo foi montado em um microscópio universal de medição, com o objetivo de testar a viabilidade da proposta.

Finalmente, foi possível constatar a viabilidade metrológica do sistema proposto pelos resultados obtidos, através de diversas medições executadas em dois calibradores roscados, cujos valores das grandezas eram conhecidos.

2. ROSCAS DE PRECISÃO

Pela pesquisa bibliográfica, constatou-se que não existe uma única classificação para roscas, que seja satisfatória, quanto à precisão, entre as principais normas existentes (ISO, DIN, AFNOR, JIS, ABNT). Entre as normas que apresentam uma classificação /18,19/, esta classificação só se refere à precisão das roscas normais.

Por este motivo, além da análise sistemática das roscas, que caracteriza este capítulo, apresentam-se, também, propostas de classificação das roscas quanto à precisão.

2.1 DEFINIÇÃO DAS GRANDEZAS DETERMINANTES DE UMA ROSCA

Para conhecer um assunto deve-se, em primeiro lugar, tomar conhecimento das definições, da terminologia e dos símbolos peculiares ao mesmo. A linguagem referente às roscas é muito extensa. A figura 2.1 tem a finalidade de fornecer os conheci-

mentos necessários, apresentando o perfil básico completo de uma rosca com sua terminologia e seus símbolos /20/.

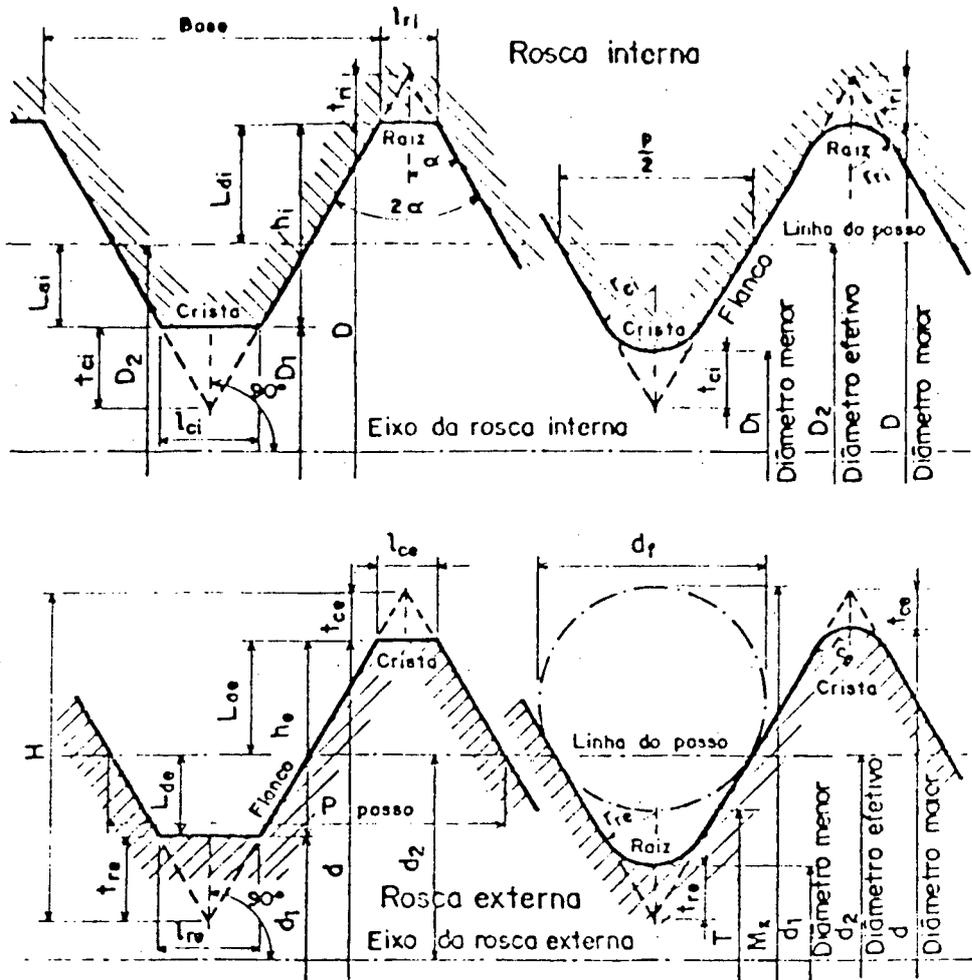
Uma falha na normalização vigente é a inexistência de um vocábulo que designe aquelas grandezas da rosca que por si só já a definam. Isto porque, uma vez conhecidos o passo, o diâmetro de flanco e o ângulo de flanco do filete de uma rosca ela está perfeitamente especificada, determinada. Por estas razões sugere-se chamar de "grandezas determinantes" a estas três grandezas.

Dada a sua importância, é fundamental que se tenha um conhecimento correto das grandezas determinantes da rosca. Por tais razões, serão apresentadas a seguir as definições constantes na normalização vigente, e que, de acordo com as necessidades serão, posteriormente, adequadas em função da nova classificação das roscas, segundo a precisão, que será proposta.

2.1.1 Roscas cilíndricas

As definições das grandezas determinantes, para roscas cilíndricas (fig. 2.2), de acordo com a normalização existente /20,21/, são as seguintes:

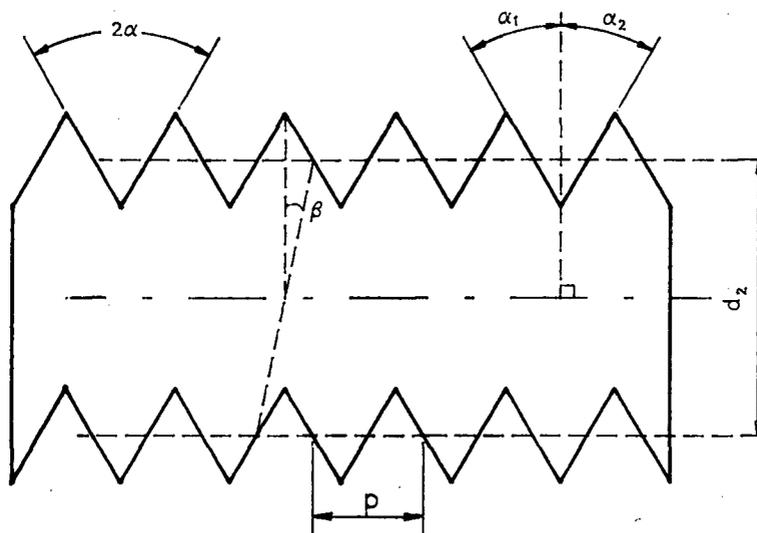
- PASSO (p) é a "distância, medida paralelamente ao eixo, entre pontos correspondentes de dois perfis adjacentes, no mesmo plano axial e do mesmo lado do eixo";
- ÂNGULO DE FLANCO (α) é o "ângulo formado, num plano axial,



- D = diâmetro maior da rosca interna
 d = diâmetro maior da rosca externa
 D_1 = diâmetro menor da rosca interna
 d_1 = diâmetro menor da rosca externa
 D_2 = diâmetro de flanco da rosca interna (ver item 2.1.1)
 d_2 = diâmetro de flanco da rosca externa (ver item 2.1.1)
 P = passo
 A = avanço
 n = número de filetes por polegada
 N = número de voltas por polegada
 H = altura do triângulo fundamental
 α = semi-ângulo da rosca
 2α = ângulo da rosca
 α_1 = ângulo entre o flanco guia e a normal ao eixo da rosca
 α_2 = ângulo entre o flanco seguidor e a normal ao eixo da rosca
 β = ângulo do avanço
 h_o = altura do filete da rosca externa
 h_i = altura do filete da rosca interna
 L_a = addendum
 L_{ao} = addendum da rosca externa
 L_{ai} = addendum da rosca interna
 L_d = dedendum
 L_{do} = dedendum da rosca externa
 L_{di} = dedendum da rosca interna
 L_c = profundidade de contato
 r = raio de arredondamento da crista ou da raiz do filete
 r_{co} = raio de arredondamento da crista do filete da rosca externa
 r_{ci} = raio de arredondamento da crista do filete da rosca interna
 r_{ro} = raio de arredondamento da raiz do filete da rosca externa
 r_{ri} = raio de arredondamento da raiz do filete da rosca interna
 t_{co} = altura do truncamento da crista do filete da rosca externa
 t_{ci} = altura do truncamento da crista do filete da rosca interna
 t_{ro} = altura do truncamento da raiz do filete da rosca externa
 t_{ri} = altura do truncamento da raiz do filete da rosca interna
 l_{co} = largura do truncamento da crista do filete da rosca externa
 l_{ci} = largura do truncamento da crista do filete da rosca interna
 l_{ro} = largura do truncamento da raiz do filete da rosca externa
 l_{ri} = largura do truncamento da raiz do filete da rosca interna

Figura 2.1 Perfil básico de uma rosca /20/

por um flanco e por uma perpendicular ao eixo da rosca. Num rosca de perfil simétrico ele é chamado de semi-ângulo da rosca";



α_1 = ângulo de flanco
 d_2 = diâmetro de flanco
 p = passo

Figura 2.2. Grandezas determinantes de uma rosca cilíndrica externa; e mais as seguintes grandezas correlacionadas: 2α = ângulo da rosca, β = ângulo de avanço.

- DIÂMETRO DE FLANCO (d_2) "é o diâmetro do cilindro coaxial imaginário cuja superfície intercepta os perfis dos filetes em uma posição tal que a largura do vão nesse ponto é igual a metade do passo. Nas roscas cujos filetes têm perfis perfeitos a intersecção se dá em um ponto onde a espessura do filete é igual à largura do vão". Na norma brasileira, que define a terminologia das roscas /20/, este diâmetro é chamado de diâmetro efetivo, mas em normas mais recentes /22/, da própria ABNT, o mesmo é chamado de diâmetro de flanco

razão pela qual esta denominação é adotada neste trabalho.

São, ainda, importantes para este trabalho, as definições das seguintes grandezas /20,21/:

- **ÂNGULO DA ROSCA (2α)** é o "ângulo formado pelos flancos adjacentes do perfil, num plano axial".
- **ÂNGULO DE AVANÇO (β)** "é o ângulo formado pela hélice da rosca na linha efetiva, com o plano perpendicular ao eixo".

2.1.2 Roscas cônicas

Exceto a conicidade, as grandezas determinantes das roscas cônicas são as mesmas das roscas cilíndricas /23,24/. Porém, devido a conicidade, o valor do diâmetro de flanco é variável ao longo da rosca. Por tal razão as definições específicas do diâmetro de flanco e da conicidade são apresentadas a seguir (fig. 2.3):

- **DIÂMETRO DE FLANCO**, "para uma dada posição na rosca, é o diâmetro do cone efetivo medido nessa posição" /23/. Plano de calibração é o plano, posicionado pelo comprimento de calibração, comprimento este medido a partir do início da rosca, onde se executa a medição dos diâmetros de calibração (de flanco, maior e menor).
- **CONICIDADE** é o ângulo formado pelas geratrizes do cone efetivo medido num plano axial.

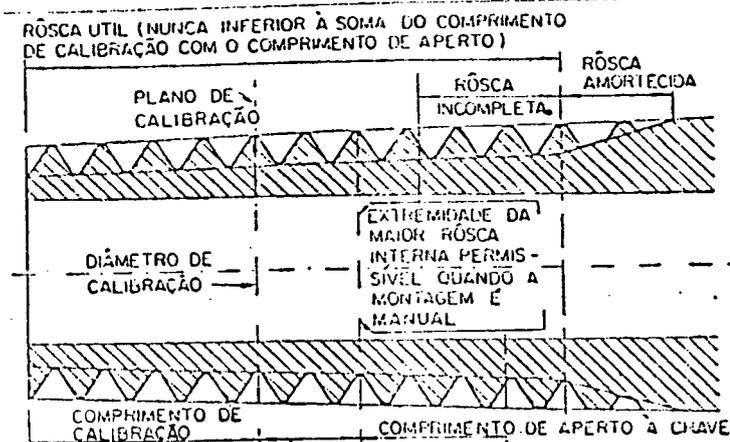
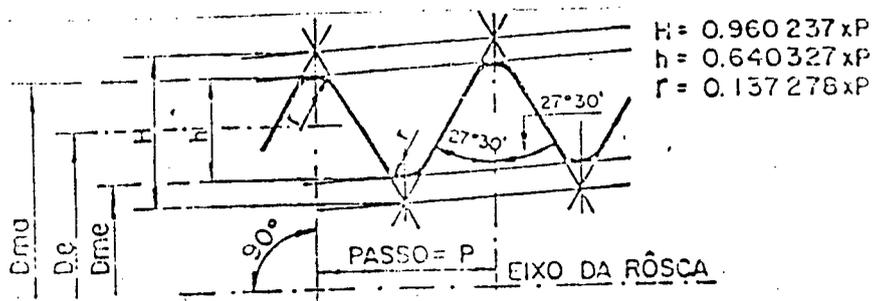


Figura 2.3. Rosca cônica externa Whitworth gás /24/.

2.2 CLASSIFICAÇÃO DAS ROSCAS QUANTO A PRECISÃO

De acordo com a normalização existente (métrica ISO) /18/ as roscas chamadas de precisão, na norma, são roscas com índice de qualidade 3 ou 4. Porém, esta classificação está direcionada somente ao conjunto de roscas normais. As roscas Whitworth /25/ também apresentam a mesma classificação como sendo uma subdivisão das roscas normais. Entretanto, estas classificações não atendem às necessidades da Mecânica de Precisão. Com estes objetivos elaborou-se uma nova classificação, quanto a precisão, dividindo as mesmas em:

roscas normais;
roscas de precisão e
roscas de alta precisão.

A classificação, de acordo com a divisão proposta, pode ser realizada segundo diferentes enfoques: do produto, do processo de fabricação e do processo de controle/medição. Segundo o produto, a classificação seria realizada definindo os tamanho de intervalo de tolerância para cada classe; a classificação pelo enfoque do processo de fabricação seria em função da relação entre intervalo de tolerância da grandeza da peça e dispersão do valor da dimensão fabricada /26/; e a classificação pelos processos de controle/medição seria em função do valor da sua incerteza de medição.

Classificando as roscas pelo produto, as roscas normais são aquelas cujas tolerâncias estão definidas nas normas existentes /18,19,27/, incluindo aquelas de qualidade 3 e 4 da norma. As roscas de precisão são aquelas que teriam índices de qualidade 2, 1 ou 0 e compreendem as tolerâncias correspondentes a dos calibradores e contracalibradores roscados. As roscas de alta precisão teriam índices de qualidade 00 ou 01, e compreendem tolerâncias menores que as dos calibradores roscados.

Na classificação de roscas, segundo o processo de fabricação, o enquadramento das roscas numa determinada classe depende do referido processo de fabricação. Para uma dada máquina ferramenta, as roscas normais são aquelas cujas tolerâncias, de suas grandezas, seriam maiores do que a sua incerteza de fa-

bricação. As roscas de precisão são aquelas cujas tolerâncias seriam iguais ou menores do que a incerteza de fabricação. E, roscas de alta precisão são aquelas cujas tolerâncias seriam iguais ou menores do que a quinta parte da incerteza de fabricação do processo, compreendendo somente a região central de uma distribuição normal que representasse o número de peças fabricadas em relação ao valor da sua dimensão. A figura 2.4 mostra a relação entre a incerteza de fabricação e a classificação apresentada.

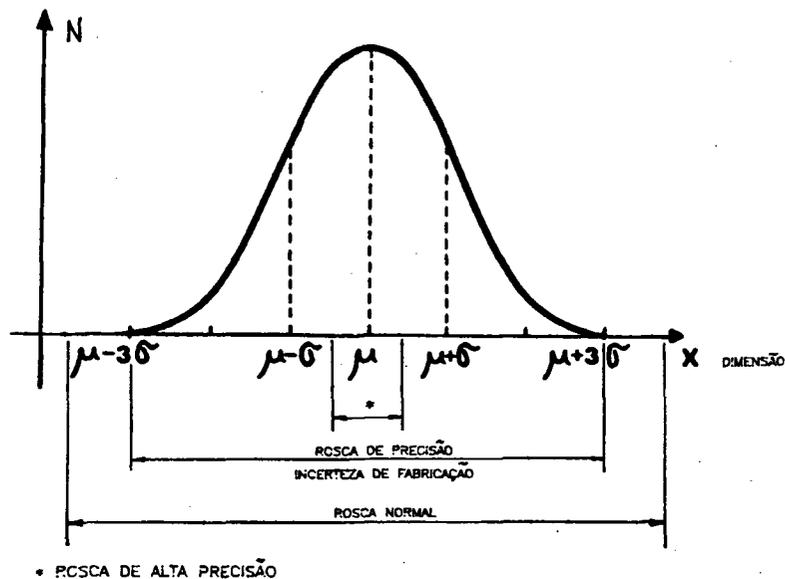


Figura 2.4. Relação entre incerteza de fabricação e os tamanhos dos intervalos de tolerância das diferentes classes de roscas.

Para as roscas classificadas de acordo com os processos de controle/medição, as roscas normais são roscas cujos controles dos intervalos de tolerância de suas dimensões são realizados através de processos que são utilizados junto aos processos de fabricação ou no setor de controle de qualidade. Roscas de

precisão são aquelas que, para o controle de suas dimensões, necessitam de processos de controle/medição que exigem laboratórios com ambiente condicionado. Roscas de alta precisão são aquelas que, devido ao tamanho do intervalo de tolerância de suas dimensões, exigem processos de controle/medição em laboratórios com controle de condicionamento de ambiente limitado a peça que está sendo medida e metrologistas com larga experiência.

Optou-se por classificar as roscas, segundo os processos de controle/medição pelas seguintes razões: uma classificação com o enfoque do produto seria estática ao longo do tempo pois os intervalos de tolerância seriam fixos e não acompanhariam a evolução da mecânica de precisão; uma classificação segundo o processo de fabricação tem limites de classe que seriam mais dinâmicos, porém o valor da incerteza de fabricação da dimensão varia de acordo com o processo utilizado, resultando em diversos tipos de roscas de precisão com diferentes faixas de intervalos de tolerância. As figuras 2.5, 2.6 e 2.7 apresentam exemplos da classificação de roscas adotada, de acordo com cada um dos enfoques utilizados para a sua classificação e a figura 2.8. apresenta um quadro comparativo da classificação das roscas, segundo os diversos critérios.

Estabelecido o critério utilizado para classificar as roscas pode-se, então, definir o que compreende cada uma das classes.

rosca →	comum	de precisão	de alta precisão
ERRO MÁXIMO ADMISSÍVEL <			
passo (μm)	* (12)	> IT ≥ (10)	> IT ≥ (1)
diâmetro de flanco (μm)	IT ≥ (50)	> IT ≥ (10)	> IT ≥ (3) m
diâmetro maior (μm)	IT ≥ (100)	> IT ≥ (18)	> IT ≥ (3) t
ângulo de flanco (')	* (50)	> IT ≥ (10)	> IT ≥ (3) e
Processo de fabricação:	-laminação -torneamento -usinagem em rosquadeiras	-usinagem em rosquadeiras de precisão -retificação -brunimento	-máquina especial de usinagem com mancais hidrostáticos e alta precisão de posicionamento do rebolo -lapidação
Instrumento de controle:	-micrômetro (CDE = 0,01 mm) -micrômetro especial para roscas -calibradores roscados	-micrômetro (CDE = 1 μm) -microscópios ou projetores de perfis -máquina de medir	-microscópios ou projetores de perfis -máquinas de medir

* os erros são controlados indiretamente pelo calibrador ou pela sua influência no diâmetro de flanco.

ROSCA MÉTRICA ISO

(1 mm < d < 50 mm)

Figura N. 5 Classificação das roscas quanto a precisão; exemplo tendo como base o produto.

rosca →	comum	de precisão	de alta precisão
ERRO MÁXIMO ADMISSÍVEL <			
diâmetro de flanco (µm)	IT ≥ (50)	IT ≥ (10)	IT ≥ (3)
Processo de fabricação: (retificação)	-retificadoras convencionais em ambiente normal de indústria	-retificadoras de precisão em ambiente condicionado	-retificadoras especiais com mancais hidrostáticos e alta precisão de posicionamento do rebolo -ambiente condicionado
Instrumento de controle:	-micrômetro (CDE = 0,01 mm) -micrômetro especial para roscas -calibradores roscados	-micrômetro (CDE = 1 µm) -microscópios ou projetores de perfis -máquina de medir	-microscópios ou projetores de perfis -máquinas de medir

N
i
m
i
t
e
a
t
u
a
l

Figura 2.6 Classificação das roscas quanto a precisão; exemplo tendo como base o processo de fabricação.

R O S C A M É T R I C A I S O

(1 mm < d < 50 mm)

rosca →	comum	de precisão	de alta precisão
ERRO MÁXIMO ADMISSÍVEL <			
diâmetro de flanco (µm)	IT ≥ (50)	IT ≥ (10)	IT ≥ (3)
Processo de fabricação:	-laminação -torneamento -usinagem em rosquadeiras	-usinagem em rosquadeiras de precisão -retificação -brunimento	-máquina especial de usinagem com mancais hidrostáticos e alta precisão de posicionamento do rebolo -lapidação
Instrumento de controle:	-micrômetro (CDE = 0,01 mm) -micrômetro especial para roscas -calibradores roscados	-microscópios ou projetores de perfis -máquina de medir ambiente condicionado	-microscópios ou projetores de perfis -máquinas de medir -condicionamento limitado a peça

N
i
m
i
t
e
a
t
u
a
l

Figura 2.7 Classificação das roscas quanto a precisão; exemplo tendo como base o processo de controle/medição.

ROSCA MÉTRICA ISO

(1 mm < d < 50 mm)

BASE DO CRITÉRIO DE CLASSIFICAÇÃO	CLASSE DA ROSCA (valores em μm)		
	NORMAL	DE PRECISÃO	DE ALTA PRECISÃO
PRODUTO (diâmetro de flanco)	$IT \geq 28$	$28 > IT \geq 10$	$IT < 10$
PROCESSO DE FABRICAÇÃO (diâmetro de flanco)	$If \geq 20$	$20 > If \geq 10$	$If < 10$
PROCESSO DE CONTROLE (diâmetro de flanco)	$Im \geq \pm 5$	$\pm 5 > Im \geq \pm 2$	$Im < \pm 2$

Obs.: Para faixa compreendida entre 10 e 50 mm.

Figura 2.8. Quadro comparativo dos diversos critérios de classificação de roscas

2.2.1 Roscas normais

As roscas normais são roscas de uso geral fabricadas em máquinas ferramentas de produção chamadas genericamente de rosqueadeiras /28/ (são tornos, fresas, rosqueadeiras propriamente ditas /29/, laminadoras ou retificadoras /30/). O controle dimensional, nesta classe de rosca, é, geralmente, realizado por amostragem, uma vez que a tolerância das suas grandezas é bastante superior a incerteza dos processos normais de fabricação.

2.2.2 Roscas de precisão

São roscas cujos requisitos de tolerância são bastante estreitos. Destinam-se a aplicações especiais em uniões, transmissão de movimento ou como calibradores. Sua fabricação exige máquinas e cuidados especiais que mantenham, sob controle todas as etapas da sua fabricação. Nesta classe de precisão é comum que todas as roscas sejam submetidas a um controle dimensional. Como a tolerância das grandezas das roscas de precisão é pequena, o acabamento superficial, dos flancos dos filetes, deve ser de qualidade fina. Deste modo exige-se uma operação final de usinagem, de acabamento, que consiste em retificação, brunimento e/ou lapidação do perfil. Como consequência a rugosidade superficial, nos flancos dos filetes, deve ser $R_a < 1 \mu\text{m}$ /31/. Aliado ao acabamento, deve-se prever uma dureza adequada ao flanco da rosca para proporcionar uma conveniente resistência ao desgaste. Por esta razão exige-se que a dureza nos flancos seja de 650 a 800 HV (57 a 62 HRC) /32/.

2.2.3 Roscas de alta precisão

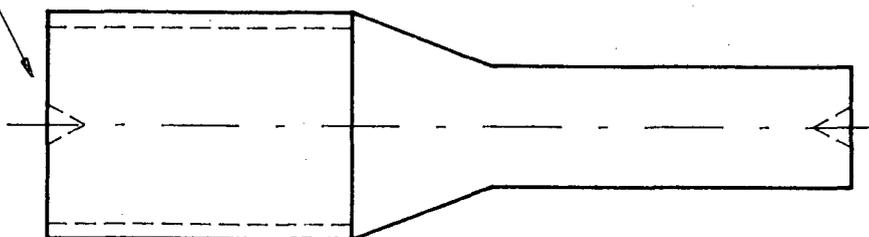
São roscas padrão cuja fabricação exige máquinas especiais em ambientes especiais (laboratórios) com condições mantidas sob controle durante toda operação. A operação final de usinagem consiste obrigatoriamente numa operação de lapidação/33/. As roscas de alta precisão possuem tolerâncias tão estreitas que são selecionadas por ajuste seletivo /34/.

2.3 SISTEMA DE REFERÊNCIA PARA MEDIÇÃO DE PADRÕES ROSCADOS

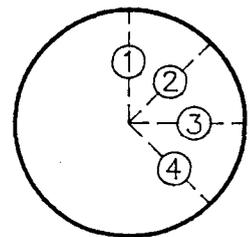
O padrão roscado, seja ele uma rosca de precisão ou de alta precisão, é um elemento de referência para outras medições e, por isto, sua calibração não pode ser conduzida da mesma maneira que são conduzidas as medições de roscas normais. Para uma rosca de alta precisão e, eventualmente, para uma rosca de precisão, não é suficiente saber se as dimensões das suas grandezas estão dentro do intervalo de tolerância ou não, pois sendo uma referência interessa saber quais são as dimensões de cada uma de suas grandezas determinantes, flanco a flanco, em um definido plano de medição. Para isto, é necessário numerar e gravar, na rosca, a posição dos planos de medição e numerar as grandezas determinantes da rosca. As posições dos planos de medição devem ser gravados na superfície de referência da rosca. Define-se a superfície de referência como sendo o plano normal ao eixo da rosca, que nos acoplamentos com peça rosca-da, está voltado para a peça. As posições dos planos de medição, que são axiais, serão gravadas na superfície de referência, inclinadas entre si de 45°, e em número de quatro com

o objetivo de cobrir toda a circunferência (figura 2.9). A gravação da posição dos planos de medição é realizada, partindo do centro da superfície circular até a borda, com o objetivo de definir a posição dos semi-planos de medição, cuja origem é o eixo da rosca, utilizados nas medições das grandezas determinantes. Com a finalidade de permitir a localização das grandezas determinantes medidas, elas devem ser numeradas, em cada plano de medição, a contar da superfície de referência e a partir do primeiro filete completo (fig. 2.9). Com o objetivo de definir corretamente o filete que foi considerado como o primeiro, deve ser informado, também, a distância "f", para aquele plano de medição, que corresponde a distância, da superfície de referência até a posição de início do filete considerado como primeiro, medida segundo a direção do eixo da rosca (fig. 2.10 e 2.11). Nos métodos de medição do passo e do diâmetro de flanco, que conseguem individualizar o valor da grandeza flanco a flanco, se colocará um índice "linha", no

SUPERFÍCIE DE REFERÊNCIA



(VISTA FRONTAL)



SUPERFÍCIE DE REFERÊNCIA
(VISTA LATERAL)

Figura 2.9. Padrão roscado: superfície de referência de um padrão roscado; semi-planos de medição de 1 a 4.

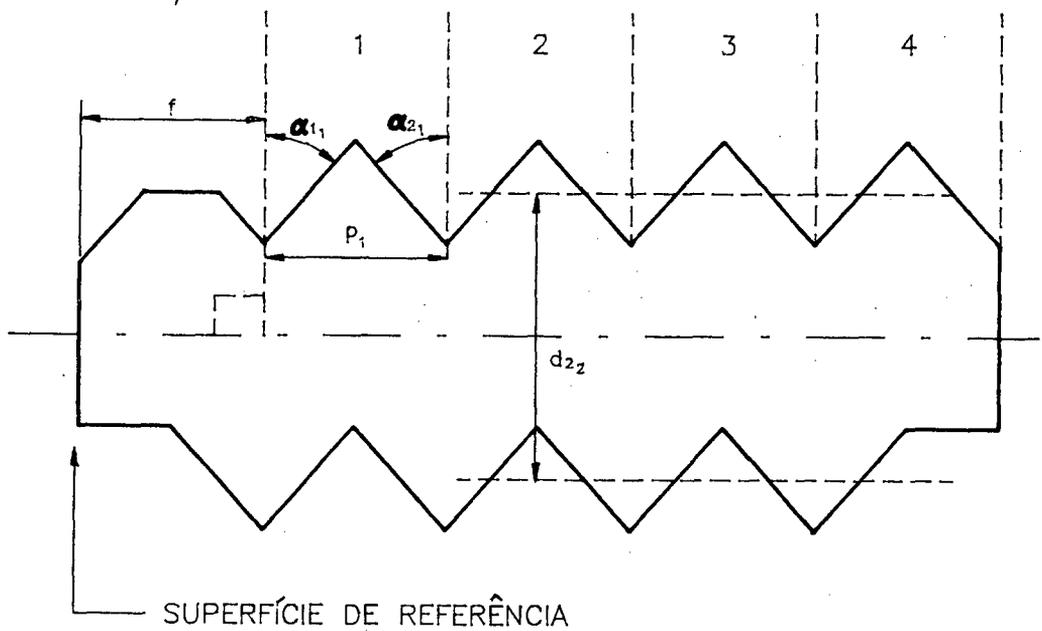


Figura 2.10. Numeração dos filetes para a medição das grandezas determinantes

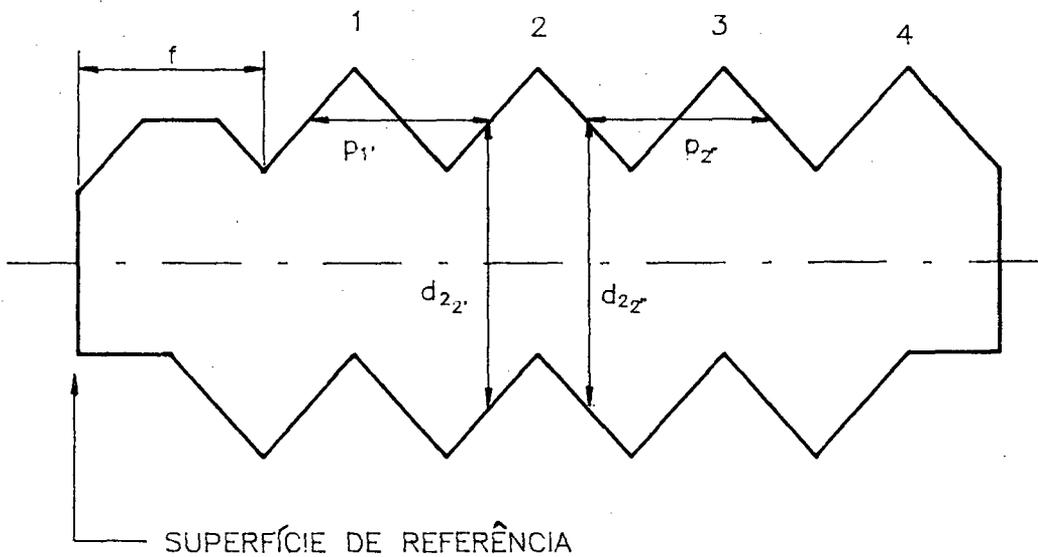


Figura 2.11 Numeração das grandezas determinantes para processos de medição que individualizam o valor das grandezas flanco a flanco

sub-índice referente ao filete, para designar a primeira das grandezas, a partir da superfície de referência, e um índice "duas linhas" para designar a segunda (fig. 2.11).

2.4. PROPOSTA DE DEFINIÇÕES PARA AS GRANDEZAS DETERMINANTES

Como consequência desta necessidade de especificar os planos de medição e a superfície de referência, as definições das grandezas determinantes devem ser adequadas a estas novas restrições. As novas definições, a seguir apresentadas, atendem as exigências tanto das roscas normais como de precisão ou de alta precisão.

- PASSO (p) é a distância, medida paralelamente ao eixo da rosca, entre pontos correspondentes de dois perfis adjacentes, no mesmo semi-plano de medição cuja origem é o eixo da rosca. Sempre que for necessário especificar o valor de um determinado passo, eles deverão ser numerados, em cada plano de medição, a partir da superfície de referência (fig. 2.10 e 2.11).

- ÂNGULO DE FLANCO (α_f) é o ângulo formado, num semi-plano de medição com origem no eixo da rosca, por um flanco e por uma perpendicular ao referido eixo. Sempre que for necessário especificar um determinado ângulo de flanco, deve-se numerá-los a partir do plano de referência (fig. 2.10). Flanco de guia é a "face do filete de rosca que, nos acoplamentos com peça roscada, está voltada para a peça"

/20/. Ângulo de flanco de guia (α_1) é o "ângulo entre o flanco de guia e a normal ao eixo" (fig. 2.10). Flanco seguidor é a "face do filete da rosca, oposta ao flanco guia"

/20/. Ângulo de flanco seguidor (α_2) é o "ângulo entre o flanco seguidor e a normal ao eixo" (fig. 2.10).

- **DIAMETRO DE FLANCO (d_2)** é distância, medida ortogonalmente ao eixo da rosca, entre os centros do perfil nominal de flancos diametralmente opostos. Nas roscas de perfil simétrico este valor é igual a distância, medida ortogonalmente ao eixo, entre pontos do perfil de flancos diametralmente opostos. Sempre que for necessário especificar o valor de um determinado diâmetro de flanco eles serão numerados a partir do plano de referência (fig. 2.10 e 2.11).

2.5 CARACTERIZAÇÃO DOS ERROS NAS GRANDEZAS DETERMINANTES DE ROSCAS DE PRECISÃO

Muitos tipos e causas de erros, que são desprezáveis quando do estudo das roscas convencionais, não são desprezáveis quando se trata de roscas de precisão, o que justifica o estudo especial que será dado neste item. Como exemplo pode-se citar o caso do passo e do ângulo de flanco. A maioria das normas /18,19,23,25,36/ não especificam tolerâncias para o passo e ângulo de flanco de roscas convencionais. Isto não significa que não exista limite nenhum para os erros de passo e ângulo de flanco. O que acontece é que tais erros são limitados pela sua influência sobre o diâmetro de flanco. Na prática a

tolerância do diâmetro de flanco limita os erros admissíveis, também, àquelas grandezas (ver item 4.3.1 e fig. 4.9).

Além dos motivos apresentados, o estudo dos tipos de erros possibilita avaliar os métodos de medição, quanto a sua eficiência na detecção de determinados erros.

2.5.1 Erros do passo

Os erros do passo são: erro específico de cada passo, em cada plano de medição, " E_p " e o erro do passo " Et_p ", referente a toda a rosca. O erro específico de cada passo é a diferença entre o valor de cada passo medido e o valor nominal do passo. O erro do passo " Et_p " corresponde ao maior valor encontrado nas diferenças entre: as distâncias entre dois quaisquer filetes (ou flancos) da rosca e as distâncias nominais para estes mesmos filetes (ou flancos), de acordo com a definição da tolerância dada pela norma. Segundo a norma NBR 8225 /22/ "A tolerância do passo é o maior desvio permissível entre dois filetes quaisquer da rosca". Para a circunstância de que a medição tenha sido executada em diversos planos, o erro do passo " Et_p " será o maior valor entre os valores dos erros do passo calculados para cada plano de medição.

Para o cálculo do erro do passo, o seguinte procedimento é o recomendado, pois facilita a determinação do seu valor e, também, a execução de um "software" de cálculo a ser empregado nos procedimentos computadorizados. A partir dos valores medidos para o passo [quando a medição se referir a rosca padrão, os passos deverão ser numerados a partir da superfície de re-

ferência (fig. 2.10)] somam-se, algebricamente, um a um, todos os erros específicos de cada passo E_{p_i} ; o erro do passo " E_{t_p} " será a diferença entre o valor máximo atingido pelo somatório e o valor mínimo deste mesmo somatório. Caso o valor máximo e o valor mínimo do somatório forem de mesmo sinal, o erro do passo será igual ao valor máximo, em módulo, deste somatório. Existem métodos de medição que separam os passos do flanco esquerdo dos passos do flanco direito [passo do flanco esquerdo são os passos, cuja posição o sub-índice tem uma linha (fig. 2.11) e passos de flanco direito são passos cujos sub-índice tem duas linhas (fig. 2.11)]. Nestes casos os somatórios dos erros específicos devem ser separados para cada lado do flanco do filete. O erro do passo (da rosca) será o de maior valor entre os dois erros calculados. A figura 2.12 ilustra o cálculo do erro do passo de acordo com o procedimento recomendado. O erro do passo do flanco esquerdo é de $1,2 \mu\text{m}$ e o erro do passo do flanco direito é de $1,0 \mu\text{m}$; logo o erro do passo " E_{t_p} " é de $1,2 \mu\text{m}$.

Se, por exemplo, a rosca da figura 2.12. não possuisse os dois primeiros filetes, o primeiro passo medido seria o de número 3, da figura, e assim por diante. Diante desta circunstância, quando da determinação do erro do passo, o somatório, dos erros específicos de cada passo do flanco esquerdo " E_{p_i} ", seria sempre positivo (0,5; 1,2; 1,1) e, portanto, o erro do passo " E_{t_p} " seria igual ao valor máximo deste somatório, que para este exemplo é, também, $1,2 \mu\text{m}$. Normalmente, os certificados de calibração (inclusive de laboratórios internacionais como o PTB (fig. 2.13)] indicam somente o valor do passo médio e a

respectiva incerteza de medição, referente ao resultado (passo médio). Entretanto, estas informações são insuficientes para julgar adequadamente o passo, como ver-se-á a seguir. Seja, por exemplo, os seguintes valores medidos, do passo, na sua respectiva ordem, a partir da superfície de referência: 3,002; 2,998; 3,002; 2,998; 3,002 e 2,998 mm; e um segundo calibrador cujos passos apresentam os mesmos valores numéricos, porém em outra ordem, numerada a partir da superfície de referência: 3,002; 3,002; 3,002; 2,998; 2,998 e 2,998 mm. Nos dois casos o passo médio é igual ao nominal, o desvio padrão é o mesmo, e, conseqüentemente, a incerteza de medição, referente ao resultado, também será a mesma, porém o erro do passo não é o mesmo. No primeiro exemplo o erro do passo é de 2 μm e no segundo é de 6 μm , valor este que está fora do intervalo de to-

passo nominal = 3,0000 mm				
n	valor medido [mm]	erro E_{p_i} de ca- da passo [μm]	Somatório [μm]	
			$S_i = \sum_{i=1}^n E_{p_i}$	
			esquerdo	direito
1	2,9991	- 0,9	- 0,9	
2	2,9997	- 0,3		- 0,3
3	3,0005	0,5	- 0,4	
4	3,0005	0,5		0,2
5	3,0007	0,7	0,3	
6	3,0005	0,5		0,7
7	2,9999	- 0,1	0,2	
8	2,9995	- 0,5		0,2

Figura 2.12. Cálculo do erro do passo. Para o exemplo:

$$E_{t_p} = S_{\max} - S_{\min} = 0,3 - (- 0,9) = 1,2 \mu\text{m}$$

Physikalisch-Technische Bundesanstalt



Kalibrierschein

Gegenstand: 1 Gewinde-Lehrdorn M 22
 Hersteller: ---
 Hersteller-Nr.: ---
 Antragsteller: Fundação CERTI-Florianopolis/Brasilien
 Gesch.-Nr.: PTB 5.22 - 4219.30/88
 Amtliches Zeichen: 5.22 - 1050 PTB 88

Am Gewinde-Lehrdorn wurden die in der nachfolgenden Tabelle aufgeführten Gewinde-Bestimmungsgrößen gemessen.

Die angegebenen Werte sind als Mittelwerte aus Messungen in verschiedenen Abständen von der Stirnfläche berechnet.

Gewinde-Bestimmungsgröße	Istwert		Messunsicherheit (mm)
	Ebene 1-1 (mm)	Ebene 3-3 (mm)	
Flankendurchmesser	20,381	20,381	0,003
größte Summensteigungsabweichung	+ 0,001	+ 0,001	0,002
Teilflankenwinkel	-	30°04' / 29°54'	3'

...

Kalibrierscheine ohne Unterschrift und ohne Dienstsiegel haben keine Gültigkeit.
 Die Kalibrierscheine dürfen nur unentgeltlich weiterverleihen werden.
 Auszug- und Änderungen bedürfen der Genehmigung der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, Bundesallee 100, Postfach 33 45, D-3300 Braunschweig

PTB-370033 5 86

Blatt 2 zum Kalibrierschein 5.22 - 1050 PTB 88

Die Messunsicherheiten für diesen Prüfling gelten für ein Vertrauensniveau (1 - α) von mindestens 95%.

Die Messungen wurden bei + 20 °C durchgeführt.

Der Gewinde-Lehrdorn wurde mit dem amtlichen Zeichen 5.22 - 1050 PTB 88 gekennzeichnet.



Im Auftrag

(P. Grundmann)

Braunschweig, den 9. Aug. 1988

Figura 2.13. Certificado de calibração de rosca de precisão /34/.

lerância para roscas de precisão, que é de $5 \mu\text{m} / 22/$. Fica, assim, provado que as informações apresentadas atualmente nos certificados de calibração são insuficientes. Por tais razões, sugere-se que estes certificados de calibração passem a indicar, junto com o passo médio, o erro do passo e a incerteza de medição de cada passo. Estas alterações são sugeridas, porque é fundamental, para uma correta avaliação de uma rosca de precisão, o conhecimento dos erros da rosca e dos erros de medição. A incerteza de medição deve constar, também, porque a incerteza referente ao resultado engloba a dispersão dos valores do passo mas nada informa sobre a distribuição destes valores na rosca. A não ser, é lógico, que o certificado informe o valor de cada passo da rosca e a respectiva incerteza de medição, ficando para o técnico, que analisar o certificado, a avaliação dos erros reais. Esta sugestão, de que o certificado deve indicar o valor de cada medida, com a respectiva incerteza de medição, e não só a sua média, vale, também, para as outras grandezas determinantes. A figura 2.14. apresenta uma sugestão, quanto a apresentação dos resultados de uma medição do passo de roscas de precisão. O número da posição no exemplo de apresentação das medidas corresponde ao número da posição dos passos, a partir da superfície de referência. Embora o exemplo apresentado na figura seja para a medição do passo, a mesma metodologia deve ser utilizada na apresentação dos resultados da medição das outras grandezas.

2.5.2 Erros do diâmetro de flanco

O erro do diâmetro de flanco é o erro específico " $E_{(d)_i}$ " de cada diâmetro de flanco que é a diferença entre o valor de ca-

da diâmetro medido e o seu valor nominal. Além deste erro é importante, ainda, o erro de posição do diâmetro de flanco que será tratado no item 2.7. A figura 2.15 apresenta uma sugestão, quanto a apresentação dos resultados de uma medição de diâmetro de flanco de roscas de precisão.

MEDIÇÃO DO PASSO [mm] ($I_m = \pm 0,4 \mu\text{m}$)				
Superfície de medição n° 2 (45°) $f = 3,2 \text{ mm}$				
Posição	Esquerdo	Erro [μm]	Direito	Erro [μm]
1	2,5005	0,5	2,5004	0,4
2	2,5000	0,0	2,5007	0,7
3	2,5006	0,6	2,5013	1,3
4	2,5026	2,6	2,5013	1,3
Passo médio = $2,5009 \pm 0,0009$				
Erro do passo = $3,7 \mu\text{m}$				

Figura 2.14 Exemplo de apresentação do resultado da medição de uma grandeza determinante de rosca de precisão: passo.

2.5.3 Erros do ângulo de flanco

Quanto ao ângulo de flanco os tipos de erros são: erro do ângulo de flanco específico " $E_{(\alpha_i)}$ ", que é a diferença entre o valor medido para cada ângulo e o respectivo valor nominal; e o erro devido ao fato dos ângulos de flanco (α_1 e α_2) não serem iguais. A normalização vigente não estabelece nenhum limite específico para este último erro, deixando o mesmo variar entre os limites fixados pela tolerância de cada ângulo de

flanco. A figura 2.16 apresenta uma sugestão, quanto a apresentação dos resultados da medição do ângulo de flanco de uma rosca de precisão.

MEDIÇÃO DO DIÂMETRO DE FLANCO [mm] ($I_m = \pm 3 \mu\text{m}$)				
Superfície de medição n° 4 (135°) $f = 3 \text{ mm}$				
Posição	Esquerdo	Erro [μm]	Direito	Erro [μm]
1	20,3798	- 2,2	20,3802	- 1,8
2	20,3811	- 0,9	20,3815	- 0,5
3	20,3806	- 1,4	20,3813	- 0,7
4	20,3815	- 0,5	20,3814	- 0,6
Diâmetro médio = 20,381 \pm 0,003				
Erro de posição (cilindricidade) = 2,0 μm				

Figura 2.15 Exemplo de apresentação do resultado da medição do diâmetro de flanco de uma rosca de precisão

2.6 CAUSAS DE ERROS NAS GRANDEZAS DETERMINANTES DE ROSCAS DE PRECISÃO

Tendo em vista que certas causas de erros são comuns a todas as grandezas determinantes, estas serão analisadas em primeiro lugar. Logo após, para cada uma das grandezas, serão analisados os erros, as causas e as consequências que são específicas.

MEDIÇÃO DO ÂNGULO DE FLANCO ($I_m = \pm 1,6'$)				
Superfície de medição n° 1 (0°) $f = 3$ mm				
Posição	α_1	Erro	α_2	Erro
1	29° 55,1'	- 4,9'	30° 1,7'	1,7'
2	29° 55,4'	- 4,6'	30° 0,6'	0,6'
3	29° 56,5'	- 3,5'	30° 0,7'	0,7'
4	29° 56,0'	- 4,0'	30° 3,5'	3,5'
Média	29° 56 ± 2'		30° 02' ± 2'	
Ângulo da rosca = 59° 58' ± 3'				

Figura 2.16 Exemplo de apresentação do resultado da medição do ângulo de flanco de uma rosca de precisão

2.6.1 Causas de erros que são comuns a todas grandezas determinantes

Como causas geradoras de erros devido à máquina ferramenta (retilidade, inclinação, posicionamento) é crítico o erro devido ao guinamento /37/ do carro porta-ferramenta, os erros nas guias da máquina ferramenta /38/ e as folgas do carro porta-ferramenta. No que se refere à ferramenta /39/ são mais significativos os erros causados pelo desgaste da ferramenta. A rigidez da peça e/ou de sua fixação à máquina ferramenta também são causas de erros nas grandezas determinantes das roscas de precisão.

2.6.2 Passo: causas de erros e suas conseqüências

Além das causas, já citadas, são causas de erros, devidos a máquina ferramenta, os erros do passo do fuso, erro na relação de engrenamento entre a árvore e o fuso, erros nas outras grandezas determinantes do fuso e os erros das engrenagens de sincronização do movimento árvore/fuso /40,41/. Dentre as causas de erros, são mais significativas as devidas à máquina ferramenta e entre estas, as mais significativas são as folgas, os erros de guia e os erros do passo do fuso.

Como conseqüência dos erros de passo, tem-se, para as roscas especiais, uma redução da área de contacto entre porca e parafuso, redução da vedação, redução da resistência aos esforços, erro no valor medido do diâmetro de flanco (ver item 4.3.1) e inconstância de movimento ou esforço em roscas de transmissão de movimento ou esforço.

2.6.3 Diâmetro de flanco: causas de erros e suas conseqüências

Além das causas genéricas, já apresentadas no item 2.6.1., os erros do diâmetro de flanco podem ser, ainda, causados por erros geométricos de movimento do carro porta-ferramenta, chamados de rolamento /37/.

Na formação do erro do diâmetro de flanco, dentre todas as causas de erros, são mais significativas aquelas devidas à máquina ferramenta e, entre estas, predominam as influências das folgas e dos erros de guias /3/.

Nas roscas de precisão, para aplicações especiais, como consequência dos erros no diâmetro de flanco existirá uma folga excessiva entre porca e parafuso, que, neste caso, causará perda da capacidade de vedação e redução da resistência aos esforços, ou uma interferência entre os mesmos, que dificultará ou até impedirá o seu rosqueamento.

2.6.4 Ângulo de flanco: causas de erros e suas conseqüências
Além das causas comuns (item 2.6.1.), são causas de erros os erros geométricos de rolamento do carro porta-ferramenta /37/, o mal posicionamento da ferramenta e o erro do ângulo da ponta da ferramenta /42/, medido sobre um plano que contenha o eixo da rosca.

Dentre estas causas são mais significativas, com relação à máquina ferramenta, as folgas e os erros de guias e, com relação a ferramenta, o posicionamento inadequado e o erro do ângulo da quina.

Para roscas de precisão (especiais), como consequência destes erros haverá uma redução da área de contacto entre porca e parafuso (redução da capacidade de vedação e diminuição da resistência) e erro no valor do diâmetro de flanco, quando medido por métodos mecânicos (ver item 4.3.1.).

2.7 GEOMETRIA GLOBAL DA ROSCA DE PRECISAO

Além das medições das grandezas determinantes, é importante, verificar, também, a cilindricidade da rosca, pois ela mostra qual é a distribuição da posição das referidas grandezas ao longo de toda rosca. A verificação da cilindricidade é realizada pela análise do valor e da posição do diâmetro de flanco ao longo da rosca. A posição do diâmetro de flanco é analisada pelo erro de posição do diâmetro de flanco, que é a variação da posição do diâmetro ao longo do comprimento da rosca em relação a posição ideal, para um dado plano de medição. É importante conhecer o erro de posição, pois em casos extremos, onde o eixo do diâmetro de flanco não é linear, pode acontecer que alguns diâmetros fiquem posicionados fora do intervalo de tolerância do mesmo (ver fig. 2.17).

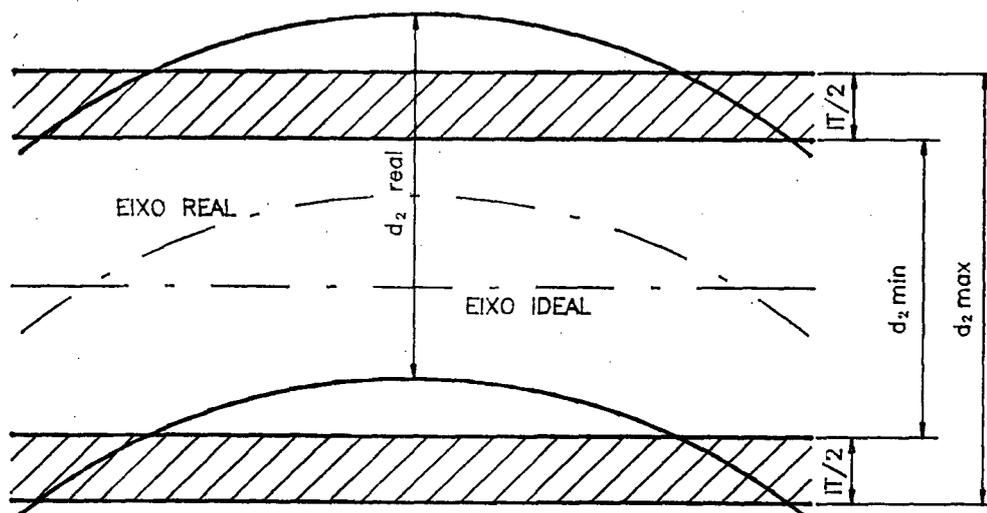


Figura 2.17. Posição dos diâmetros de flanco reais, de uma rosca com erro de cilindricidade, em relação ao intervalo de tolerância.

2.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A normalização em vigor não classifica, adequadamente, as roscas, no que diz respeito a precisão, e deixa a desejar por não limitar, especificamente, erros de geometria global, que poderiam inviabilizar a utilização da rosca.

Os certificados de calibração de roscas de precisão, que apresentarem resultados da medição, devem indicar o valor, flanco a flanco, de cada grandeza e a respectiva incerteza de medição para todas as grandezas determinantes (ver fig. 2.13), visto que, a indicação do valor da média e da incerteza do resultado (incerteza de medição mais dispersão do valor da grandeza ao longo da rosca) não possibilita uma correta avaliação da mesma.

3. ESPECIFICAÇÃO METROLÓGICA E OPERACIONAL DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO ADEQUADO PARA ROSCAS EXTERNAS DE PRECISÃO

As roscas possuem uma geometria complexa e, por este motivo, difícil de ser medida. Em decorrência disso, neste capítulo, serão estudadas as exigências que devem ser satisfeitas pelos sistemas de medição de roscas de precisão.

3.1 RELAÇÃO ENTRE A TOLERÂNCIA DE FABRICAÇÃO E A INCERTEZA DE MEDIÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO A SER UTILIZADO

Como muitas regras diferentes são utilizadas para definir a incerteza de medição aceitável a um sistema de medição encarregado de realizar uma dada medição, torna-se necessário justificar a regra que será empregada neste trabalho.

Quando um sistema de medição é utilizado como sistema de medição padrão para a calibração de um outro sistema de medição, existe uma relação que deve ser satisfeita pelas in-

certezas de medição dos dois sistemas, que é definida pela seguinte regra: A incerteza do sistema de medição padrão, numa operação de calibração, deve ser desprezável face a amplitude da incerteza de medição nominal do sistema de medição a calibrar.

A incerteza de medição (I_m) de um sistema de medição é calculada pela soma da dispersão de medição (DM) com o erro sistemático máximo do referido sistema de medição. A DM (dispersão da medição) é determinada a partir dos erros aleatórios e por tal motivo, apresenta um duplo sinal ($DM = \pm \dots$). Os erros sistemáticos, para um determinado ponto, apresentam um valor e um sinal definidos. Porém, para sistemas de medição de precisão ou escalas de precisão, quando se considera toda a faixa de operação, os erros sistemáticos apresentam valores (ora positivos, ora negativos) muito próximos entre si e da resolução do sistema de medição e, por tal razão, são representados pelo intervalo, de valores positivos e negativos, dentro do qual estão todos os erros sistemáticos individuais. E como normalmente nestes casos, os valores dos erros variam em torno do zero, os erros sistemáticos são, também, apresentados com um duplo sinal ($Es = \pm \dots$). Por este motivo, neste estudo a incerteza de medição é representada por um intervalo de valores que é simétrico em relação ao zero ($I_m = \pm \dots$).

De acordo com estudos realizados sobre a propagação da I_m dos sistemas de medição nas cadeias de medição, a I_m do resultado de uma calibração " I_{m_r} " é igual a média quadrática das incertezas " I_{m_i} " dos sistemas de medição que participam da

calibração /43/, desde que estas incertezas de medição estejam representadas numericamente por um intervalo que seja simétrico em relação ao zero ($Im = \pm \dots$).

$$Im_r = \sqrt{\sum Im_i^2} \quad (3.1)$$

Chamando a Im do sistema de medição utilizado como padrão de " Im_p " (incerteza de medição do padrão) e chamando a Im do sistema de medição a calibrar como " Im_c ", pode-se afirmar que:

$$Im_r = \sqrt{Im_p^2 + Im_c^2} \quad (3.2)$$

Em função da regra definida, no início deste item, seria desejável que:

$$Im_c = Im_r$$

Para o caso em que:

$$Im_p^2 \leq \frac{Im_c^2}{10} \quad (3.3)$$

resulta para a equação (3.2):

$$\begin{aligned} Im_r &= \sqrt{Im_c^2 + 0,1 Im_c^2} \\ Im_r &\cong 1,05 Im_c \cong Im_c \end{aligned} \quad (3.4)$$

Pelo resultado encontrado em (3.4), verifica-se que caso a relação apresentada em (3.3) seja utilizada, o sistema de medição padrão só participa com a vigésima parte da Im_c na formação da Im_r , o que, de acordo com a teoria dos algarismos

significativos, pode ser desprezável. Conseqüentemente, a partir da expressão (3.3) pode-se determinar a relação de incertezas de medição desejada, que é expressa por:

$$I_{mp} \leq \pm \frac{I_{mc}}{3} \quad (3.5)$$

A equação (3.5) é a equação, aceita em uma calibração, que fornece a maior incerteza admissível para o sistema de medição padrão, em função da incerteza de medição do sistema de medição a calibrar.

Quando o instrumento a calibrar é um padrão, um calibrador ou instrumento semelhante onde a grandeza a medir apresenta um intervalo de tolerância de fabricação ou de uso, ou mesmo na medição de uma peça qualquer, o raciocínio desenvolvido acima, para determinar qual é a incerteza de medição admissível ao sistema de medição a ser utilizado, também é válido para este caso, assim como as expressões obtidas. Como nas equações o intervalo de tolerância vem sempre representado pelo valor do tamanho do intervalo de tolerância "IT", o denominador da razão deve ser o dobro do denominador da equação 3.5, para que as equações tenham o mesmo significado. Portanto:

$$I_{mp} \leq \pm \frac{IT}{6} \quad (3.6)$$

Entretanto, muitos autores apresentam uma outra relação para estas incertezas de medição /44/, relação esta também chamada de "regra de ouro da metrologia" /45/:

$$I_{mp} \leq \pm \frac{IT}{10}$$

(3.7)

A relação (3.5) é muito crítica para ser utilizada na prática, por estar no limite do tolerável e por não deixar margem nenhuma de segurança contra pequenos fatores não previstos nem percebidos, que na soma venham a influir no resultado da medição. Esta relação só é justificável em cadeias de calibração longas, onde a adoção de outras relações faz com que a I_m , do primeiro sistema padrão, seja tão pequena, que seja impossível de ser obtida, e onde se tomam cuidados adicionais para manter sob controle todos os fatores, que possam influir sobre o resultado. Por este motivo, a relação apresentada em (3.7) é a mais empregada e, conseqüentemente, a que será adotada neste trabalho.

3.2 INCERTEZAS ADMISSÍVEIS EM UM SISTEMA DE MEDIÇÃO DE ROSCAS DE PRECISÃO

De todas as características metrológicas dos sistemas de medição, a mais importante é a incerteza de medição. Por este motivo ela será estudada em destaque neste item.

Uma vez definida a regra a ser utilizada (equação 3.7), pode-se, então, determinar as incertezas de medição admissíveis. A base para o cálculo destas incertezas de medição serão as roscas de precisão (definidas de acordo com o item 2.2.2. e a

norma ISO 1502 /46/, cujos diâmetros estão compreendidos entre 10 e 50 mm, por serem as dimensões mais utilizadas na indústria. Como a tolerância dos calibradores e contracalibradores roscados é definida em função da qualidade da rosca que será testada, será considerado que o índice de qualidade das roscas é o de número 6, de acordo com a norma /18/, por ser o índice de qualidade mais usado, entre as roscas normalmente verificadas por calibradores. Partindo destes pressupostos, para cada grandeza determinante será calculada a incerteza de medição admissível para o sistema de medição.

3.2.1 Incertezas de medição admissíveis para a medição do diâmetro de flanco de roscas de precisão

Dentro do intervalo considerado, a tolerância do diâmetro de flanco varia desde 28 μm para roscas com diâmetro externo de 50 mm até 10 μm para roscas com diâmetro de 10 mm. Para atender toda a faixa o sistema de medição, de acordo com a equação 3.7, deve apresentar uma incerteza de medição menor ou igual a $\pm \frac{10}{10} = \pm 1 \mu\text{m}$, podendo chegar a uma incerteza de $\pm \frac{28}{10} = \pm 2,8 \mu\text{m}$ para roscas com diâmetro externo igual a 50 mm.

3.2.2 Incertezas de medição admissíveis para a medição do passo de roscas de precisão

Dentro do intervalo de dimensões considerado, a tolerância do passo varia desde 12 μm para roscas com comprimento maior do que 32 mm até 10 μm para roscas com comprimento menor do que 32 mm. Para atender toda a faixa o sistema de medição deve apresentar uma incerteza de medição menor ou igual a $\pm 1 \mu\text{m}$, podendo chegar a uma incerteza de $\pm 1,2 \mu\text{m}$ para roscas com

comprimento maior.

3.2.3 Incertezas de medição admissíveis para a medição do ângulo de flanco de roscas de precisão

Dentro do intervalo considerado, a tolerância do ângulo de flanco varia desde 16' para roscas com diâmetro externo de 50 mm até 24' para roscas com diâmetro de 10 mm. Para atender toda a faixa o sistema de medição deve apresentar uma incerteza de medição menor ou igual a $\pm 1,6'$, podendo chegar a uma incerteza de $\pm 2,4'$ para roscas com diâmetro externo igual a 10 mm.

3.3 ASPECTOS FUNCIONAIS E OPERACIONAIS DESEJÁVEIS

Dentre os aspectos funcionais e operacionais desejáveis os mais importantes são os seguintes:

- a) medir cada grandeza determinante individualmente flanco a flanco;
- b) possibilitar a determinação do valor de todos os erros das grandezas determinantes, de acordo com as definições constantes no item 2.5;
- c) medir indistintamente roscas cônicas ou cilíndricas.
- d) executar a medição de todas as grandezas determinantes da rosca com uma única fixação da mesma;
- e) diminuir sensivelmente o tempo total necessário a realização das medidas em roscas de precisão; os métodos, hoje existentes, consomem mais de quatro horas para realizar as medições das grandezas determinantes;

- f) reduzir a influência do metrologista no resultado das medições;
- g) reduzir a complexidade das medições simplificando a operação do sistema de medição.

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na medição de roscas de precisão, a incerteza de medição desejável é inferior à metade das I_m obtidas pelos melhores métodos de medição, hoje existentes, de acordo com as análises que serão apresentadas no próximo capítulo, razão pela qual é a característica metrológica mais crítica.

Quanto aos aspectos funcionais e operacionais, uma automatização da medição deve reduzir, consideravelmente, as deficiências que persistem neste momento.

4. AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS EXISTENTES DE MEDIÇÃO DE ROSCAS EXTERNAS DE PRECISÃO

Foram poucos os progressos havidos nos métodos de medição de roscas de precisão até a década de 80 /47/. Os maiores avanços devem-se a melhores escalas (leitura digital e menores incertezas de medição). Alguns sistemas novos foram pesquisados, porém os resultados obtidos não foram significativos a ponto de substituir os métodos de medição usuais.

Na década atual, com a utilização de sensores ópticos no controle dimensional, é que começaram a surgir os primeiros resultados promissores. Em função destes resultados, alguns destes métodos de medição poderão vir a substituir os métodos atuais nas medições de roscas de precisão.

Neste capítulo serão analisados os métodos de medição usuais, para cada grandeza característica e, também, aqueles métodos que foram propostos com o objetivo de resolver as principais dificuldades no controle da respectiva grandeza. No final des-

te capítulo, apresenta-se um resumo, através de um quadro geral comparativo dos métodos de medição apresentados, onde constam as principais características metrológicas e operacionais de cada um.

4.1 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DO PASSO

O método mais utilizado na medição do passo é o método de medição em comparador Abbe, com sensor esférico apoiado sobre os dois flancos da rosca. Seguem, em importância, quanto a utilização, os métodos ópticos, onde a medição é executada sobre a silhueta projetada da rosca.

4.1.1. Medição com sensor esférico em comparador Abbe

É o mais utilizado dos métodos de medição do passo. As posições de leitura são dadas por um sensor esférico que é apoiado sobre os flancos da rosca, vão após vão (fig. 4.1) /48/. A incerteza de medição é de $\pm 2 \mu\text{m}$ /35/.

As principais fontes de erros de medição deste método são:

- a) o não paralelismo entre o eixo da rosca e a direção da escala de medição;
- b) rotação da rosca durante a medição;
- c) força de atrito estático, relativa ao deslocamento do carro porta sensor, variável dependendo da posição do mesmo;
- d) erros da escala do comparador;
- e) diferença de temperatura entre a rosca e o sistema de medição, em relação a temperatura de referência (20°C).

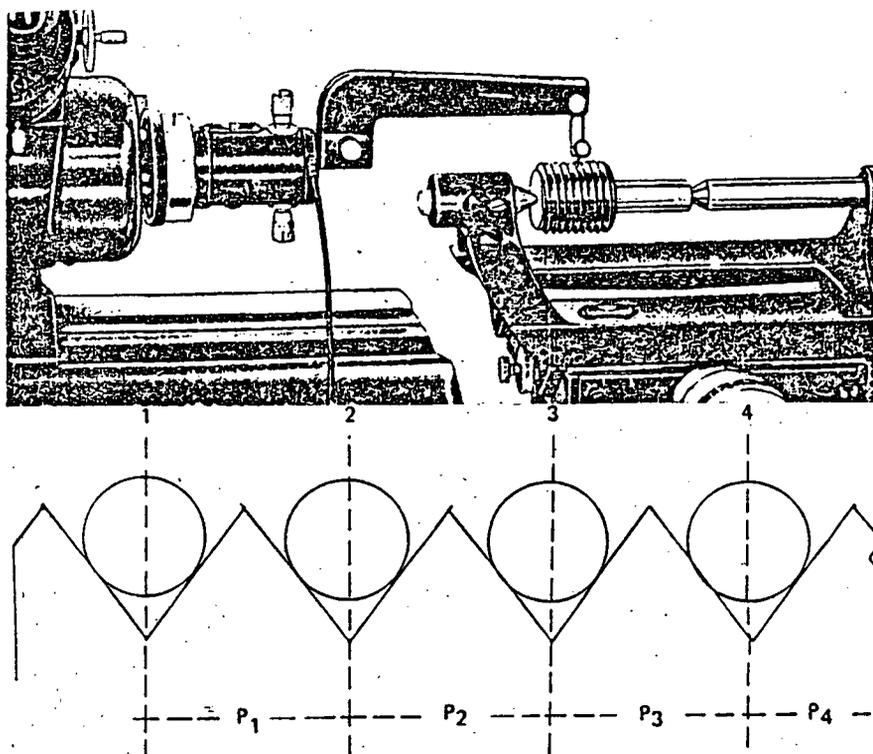


Figura 4.1. Medição do passo com sensor esférico em comparador Abbe /48/.

Entre estas fontes de erros, para a formação da incerteza de medição, são mais significativos os erros "a", "b" e "c".

Em função do que foi exposto, conclui-se que o método usual de medição do passo apresenta, principalmente, os seguintes problemas:

- a) a incerteza de medição, obtida com este método ($\pm 2 \mu\text{m}$) é maior que a desejável ($\pm 1 \mu\text{m}$, item 3.2.2.);
- b) a medição não atende corretamente as especificações da norma, pois, enquanto a norma define o passo como sendo a distância entre pontos correspondentes de perfis adjacentes, o sistema mede a distância entre as posições sucessivas do centro do sensor esférico (o que corresponde, aproximada-

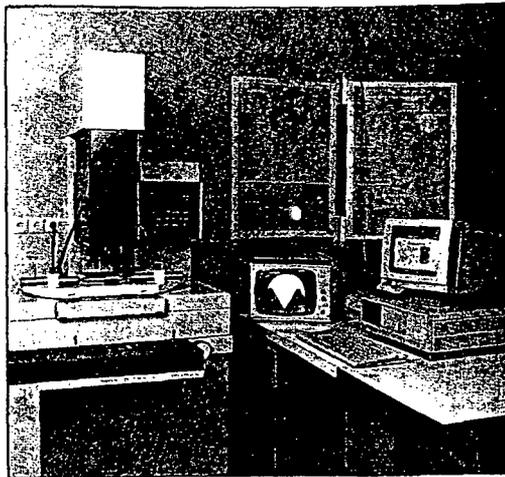
- mente, a distância entre os centros de vãos adjacentes);
- c) não individualiza os passos do flanco esquerdo daqueles do flanco direito com decorrência do item "b";
 - d) a medição é muito demorada (mais do que uma hora);
 - e) na medição do passo de roscas cônicas existe um erro, devido a conicidade, que deve ser compensado matematicamente.

4.1.2 Outros métodos de medição do passo

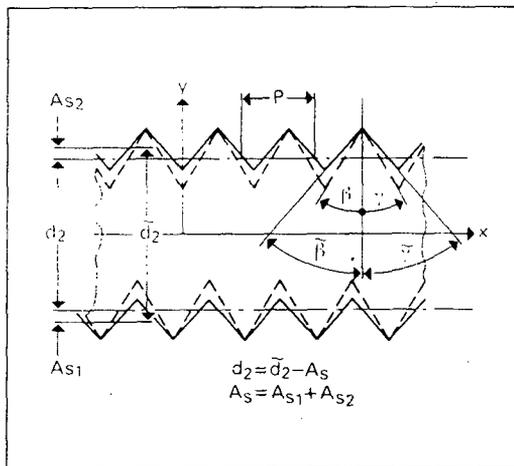
O passo também pode ser medido por métodos ópticos, seja com apalpação óptica em um só flanco ou com apalpação óptica nos dois flancos /49/. Dada a grande dificuldade de execução das medições, devido aos cuidados necessários para garantir uma precisão adequada, tais métodos não são, em geral, empregados na medição de roscas de precisão.

Um método proposto recentemente, já disponível comercialmente, utiliza um fotodetector para definir a posição da silhueta projetada em um microscópio óptico com mesa de duas coordenadas /16/ (figura 4.2.). Não foram publicados dados quanto a sua incerteza de medição mas estima-se que a mesma seja da ordem de $\pm 1 \mu\text{m}$. O princípio pode ser utilizado para a medição de roscas cônicas, dependendo unicamente de um software adequado. Este é o melhor dos métodos de medição do passo entre os disponíveis comercialmente.

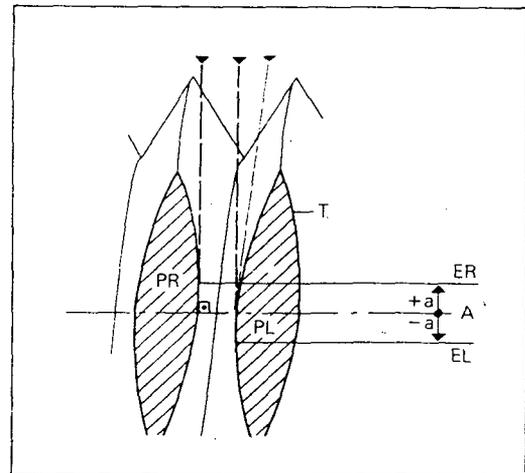
Um outro método de medição sem contato utiliza hologramas termoplásticos (fig 4.3) /8/. Neste método o flanco da rosca é exposto ao feixe laser gerando-se, conseqüentemente, um holograma. O sinal gerado pelo feixe que atravessa o holograma é



a)



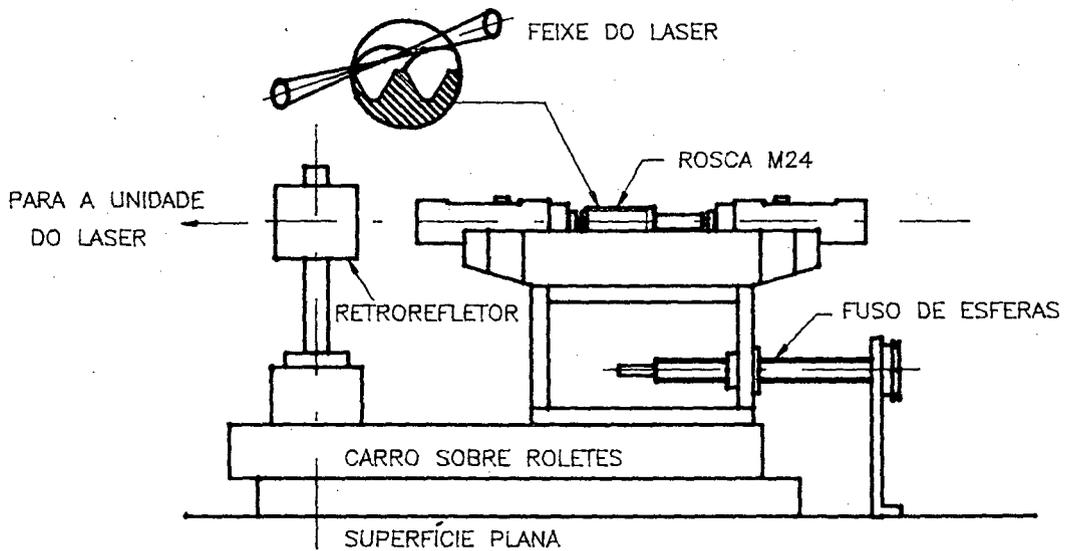
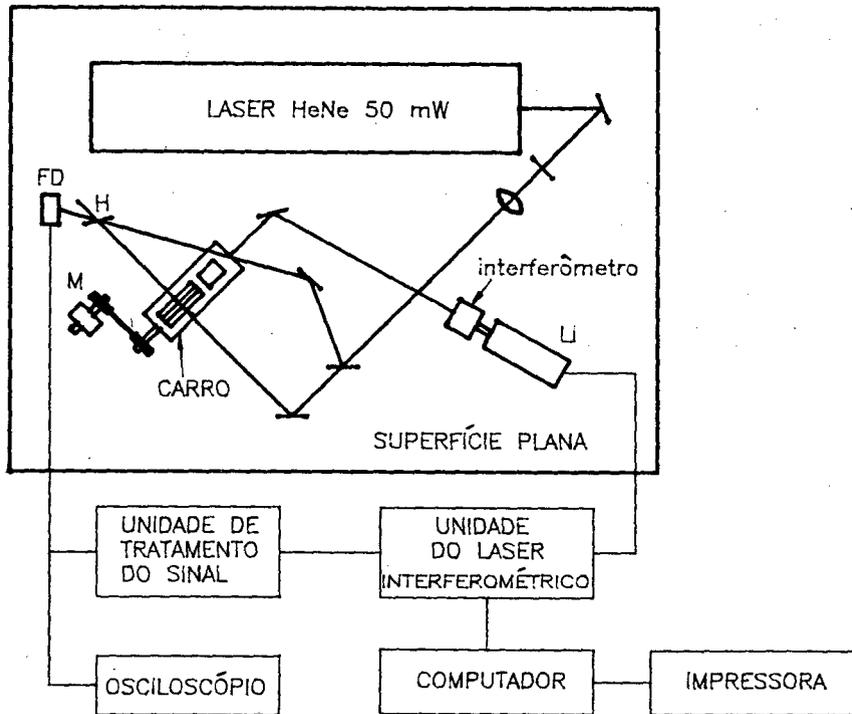
b)



c)

- a) vista geral do sistema de medição;
- b) diferença entre o perfil medido e o perfil real: linha traçada perfil real; linha cheia perfil medido;
- c) deslocamento da objetiva (foco) $\pm a$; devido a medição da rosca com eixos ortogonais.

Figura 4.2. Medição de rosca em microscópio de coordenadas com sensor óptico /16/.



H = holograma

LI = laser interferométrico

M = motor CC

FD = fotodetector

Figura 4.3. Medição do passo com holografia interferométrica /4/.

medido através de um fotodetector. Quando a rosca se desloca, a tensão fornecida pelo fotodetector atinge a um máximo toda vez que se repetir a condição em que o holograma foi gerado, ou seja, a cada deslocamento correspondente a distância de um passo. Os deslocamentos da rosca de um flanco até o outro são medidos com um laser interferométrico. As medidas executadas por este método apresentam um desvio padrão de $0,3 \mu\text{m}$ /8/. Este princípio não é indicado para a medição de roscas cônicas.

O passo de roscas com diâmetro acima de 50 mm pode ser medido em máquinas de medir por coordenadas - CMM. As incertezas de medição obtidas são de $\pm 1 \mu\text{m}$ /7,50/. Um novo transdutor optoeletrônico /51/ foi desenvolvido, recentemente, para substituir o apalpador mecânico de máquinas de medir por coordenadas.

As roscas de pequeno diâmetro (menores do que 3 mm) são difíceis de serem medidas pelos métodos convencionais. Novos métodos estão sendo pesquisados, mas nenhum deles atende às exigências, quanto às incertezas para a medição de roscas de precisão. O método que mede o passo, utilizando-se da Transformada Óptica de Fourier, apresenta, ainda, uma incerteza de medição muito elevada ($\pm 5 \mu\text{m}$), fig.4.4 /52/.

Para a medição de fusos, dá-se preferência à realização de ensaios funcionais. Os fusos com esferas recirculantes são medidos com laser interferométrico, obtendo-se uma incerteza de medição do passo de $\pm 0,7 \mu\text{m/m}$ /53/.

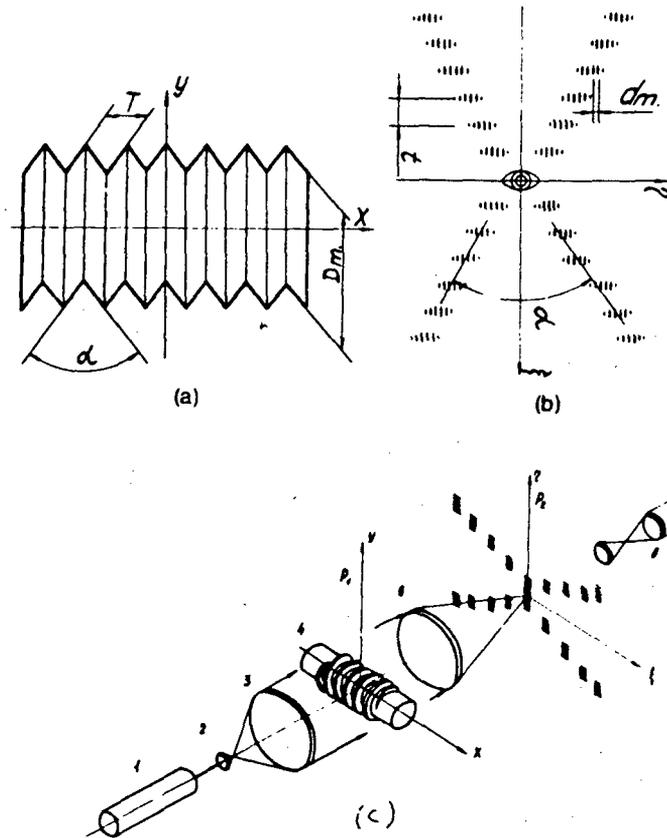


Figura 4.4. Medição de roscas pela Transformada Óptica de Fourier [52]; a) Rosca; b) sua correspondente transformada óptica e c) esquema óptico utilizado.

4.2 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DO ÂNGULO DE FLANCO

Não existe método mecânico de medição do ângulo de flanco para roscas com diâmetro menor do que 50 mm, pois as incertezas de medição apresentadas pelos perfilômetros são ainda muito elevadas para a medição de roscas de precisão. Por este motivo o método óptico é o mais empregado, inclusive para roscas com diâmetro acima de 50 mm.

4.2.1 Método óptico

O ângulo de flanco é medido, quase que com exclusividade, por métodos ópticos (fig. 4.5) em microscópios de medição ou projetores de perfis /47/. A incerteza de medição é da ordem de $\pm 3'$ /54/ originada pelas seguintes principais fontes de erros:

- a) não paralelismo do eixo da rosca com a direção de medição;
- b) dificuldade no alinhamento do reticulado da ocular do microscópio com o limite da imagem projetada;
- c) erro da escala do sistema de medição, principalmente, devido ao erro de concentricidade entre o eixo da escala e o respectivo eixo de rotação;
- d) cansaço visual do metrologista (fadiga) em consequência da dificuldade de alinhamento do reticulado com o limite da imagem projetada;
- e) folgas entre as partes móveis e erros de guias.

Na formação da incerteza de medição do método óptico são mais significativos os erros "b" e "d", que na realidade são causados pela dificuldade de alinhamento do reticulado (erro b). Num segundo plano, é, também significativo, o erro resultante da combinação dos erros "c" e "e".

Como consequência do que foi abordado, constata-se que o método de medição óptica do ângulo de flanco apresenta sérios problemas dos quais os principais são:

- a) é uma medição muito demorada, levando mais de uma hora para ser realizada;
- b) nas dimensões mais usuais ($d < 50$ mm) não existe método de medição mecânico;

- c) a incerteza de medição do método óptico é altamente dependente do metrologista;
- d) o valor das melhores incertezas de medição ($\pm 3'$) /35/ é quase o dobro da incerteza admissível ($\pm 1,6'$), de acordo com o item 3.2.3.

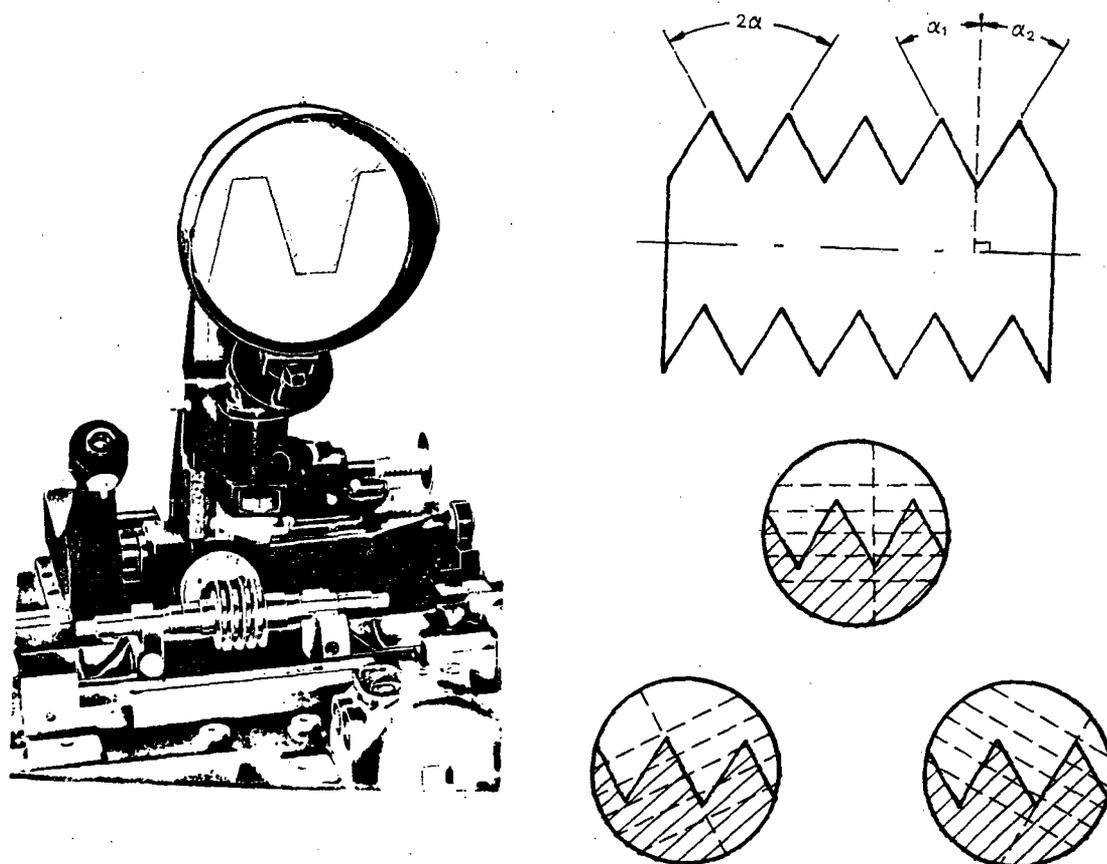


Figura 4.5. Medição do ângulo de flanco por métodos óptico

4.2.2 Outros métodos de medição do ângulo de flanco

Um outro método óptico (fig.4.6) utiliza calibradores de forma piramidal, num microscópio de medição ou projetor de perfis, para verificar se o ângulo está dentro do intervalo de tolerância especificado /6/. Com este método consegue-se com-

parar tolerâncias tão estreitas como 5 minutos /6/.

As roscas com diâmetros maiores do que 50 mm são medidas em máquinas de medir por coordenadas /55/, com uma incerteza equivalente a dos métodos ópticos.

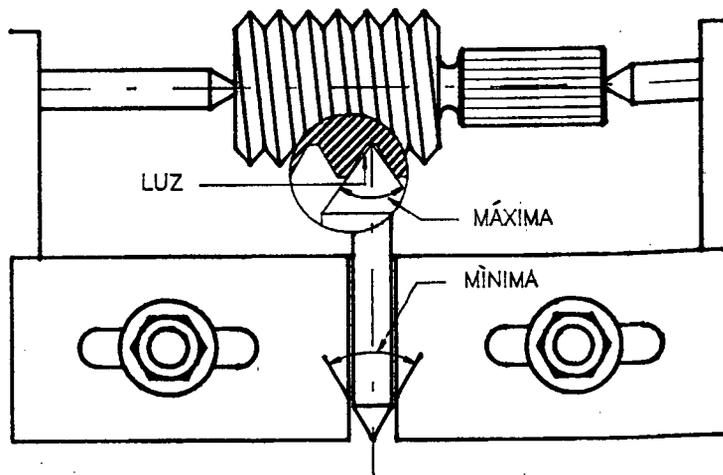


Figura 4.6 Calibrador utilizado para verificar o ângulo de flanco de roscas /6/

O sistema de medição referido anteriormente no item 4.1.2, que utiliza um sensor óptico em um microscópio de coordenadas /16/ (fig. 4.2.) mede ângulos de flanco de roscas cilíndricas e cônicas com compensação matemática do erro devido a não inclinação do eixo do microscópio, segundo o ângulo de avanço da rosca. Ainda não estão disponíveis os dados referentes as incertezas de medição, porém estima-se, por se tratar de método óptico, que a incerteza deve se manter em torno de $\pm 3'$.

Um outro método desenvolvido para medir o ângulo de flanco de

roscas internas e externas, porém com diâmetros maiores que 50 mm (fig.4.7) /5/, inclina o eixo da rosca, colocada em cima de uma mesa seno, segundo um ângulo igual ao ângulo de flanco. Um sensor que se desloca sobre o flanco, é sensível às diferenças de forma e de posição do mesmo. Caso o perfil e o ângulo de flanco estejam corretos, nenhuma diferença deverá ser indicada pelo sistema de medição. Este princípio pode ser aplicado, indistintamente, a roscas cônicas ou cilíndricas. A incerteza de medição do método é de $\pm 2'$ /5/.

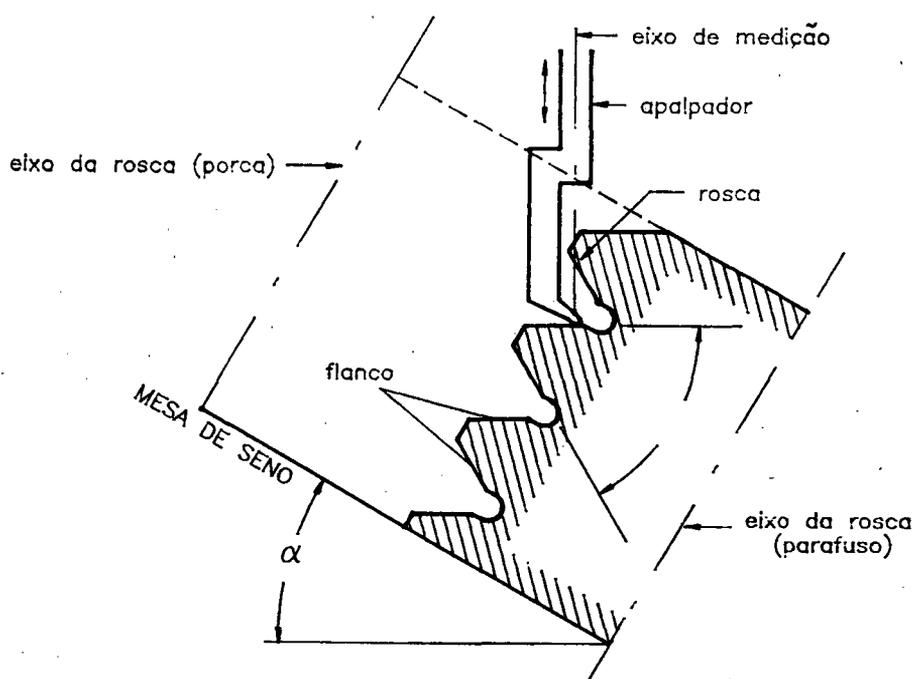


Figura 4.7. Medição do ângulo de flanco na máquina de medir por coordenadas com sensor especial /5/

Para roscas pequenas ($d < 3$ mm) a medição pela Transformada Óptica de Fourier (fig. 4.1) /52/ fornece resultados com incertezas de medição de $\pm 15'$, que ainda são incompatíveis com as tolerâncias especificadas para a dimensão (IT= 50'). Não é

indicado para a medição de rosca de precisão e nem para a medição de rosca cônica.

4.3 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DO DIÂMETRO DE FLANCO

Os melhores resultados estão sendo obtidos com o método de medição por três arames. Segue em importância, devido a sua grande utilização, a medição por métodos ópticos.

4.3.1 Método de medição por três arames

O método de medição do diâmetro de flanco de roscas externas de precisão mais usual é o método de medição por três arames /56/ (fig. 4.8), executado em máquinas de medir, tipo Abbe. De acordo com a norma DIN 2257:2 /57/, a incerteza de medição, deste método, é calculada pela seguinte expressão:

$$I_{d_2} = \pm \sqrt{I_{z_0}^2 + (3I_{d_D})^2 + (0,866I_P)^2 + [(d_D - d_{D_0}) \cdot I_{\alpha/2}]^2}$$

onde:

I_{d_2} = Incerteza do diâmetro de flanco medido por três arames;

I_{z_0} = Incerteza do comparador Abbe = $\pm 1,5 \mu\text{m}$

I_{d_D} = Incerteza do diâmetro do arame padrão = $\pm 0,5 \mu\text{m}$

I_P = Incerteza de medição do passo = $\pm 2 \mu\text{m}$

d_D = diâmetro do arame padrão utilizado

d_{D_0} = diâmetro ótimo do arame padrão

$I_{\alpha/2}$ = Incerteza de medição do ângulo de flanco = $\pm 3'$

Para permitir o cálculo da incerteza de medição do diâmetro de flanco, o valor de $(d_D - d_{D_0})$ será considerado como sendo igual a 0,2 mm (valor médio), visto que, ele é variável e depende do diâmetro da rosca que está sendo medida.

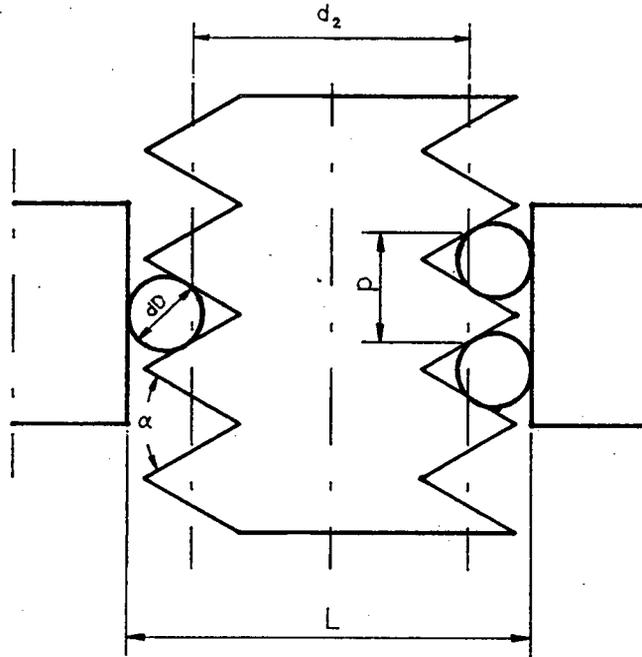


Figura 4.8. Medição do diâmetro de flanco por três arames /48/

$$I_{d_2} = \pm \sqrt{(1,5)^2 + (3 \times 0,5)^2 + (0,866 \times 2)^2 + (0,2 \times 3)^2}$$

$$\cong \pm 3 \mu\text{m}$$

A partir do valor "L", medido por este método (fig. 4.8), o valor do diâmetro de flanco é calculado por:

$$d_2 = L - d_D \cdot \left(1 + \frac{1}{\text{sen}(\alpha/2)}\right) + (p/2) \cdot \text{cotg}(\alpha/2) - k_1 + k_2 \quad /48/$$

onde: k_1 = coeficiente de encostamento e

k_2 = coeficiente de achatamento /48/.

A expressão de cálculo do erro no valor do diâmetro de flanco medido, devido ao erro das outras grandezas, obtém-se pela derivada parcial da expressão acima em relação à variável (grandeza) cuja influência se deseja conhecer /58/. A influência dos erros do passo e do ângulo de flanco na formação do valor do diâmetro de flanco pode ser visualizada na figura 4.9.

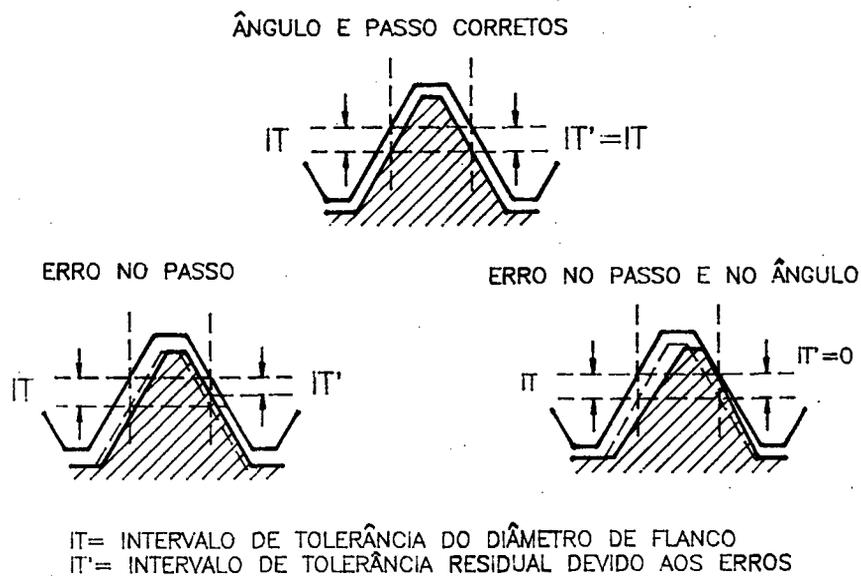


Figura 4.9. Influência do erro do passo e do ângulo de flanco sobre o diâmetro de flanco /31/.

As principais fontes de erros deste método são:

- a) a não ortogonalidade entre o eixo da rosca e a direção de medição;
- b) o não paralelismo entre os sensores do sistema de medição;
- c) os erros em outras grandezas (d_p , α_f , p);
- d) erros da escala do sistema de medição;

- e) diferença de temperatura entre a peça e o sistema de medição em relação a referência de 20°C;
- f) elasticidade do material da rosca diferente daquela utilizada no cálculo do coeficiente de achatamento;
- g) erros de guia e folgas no carro do sistema de medição (erros de segunda ordem, dada a observância do princípio de Abbe).

Os erros "a", "b", "c" e "d" são os mais significativos na formação do erro resultante que vai originar a incerteza de medição. O erro devido a outras grandezas "c" pode ser eliminado por intermédio de cálculo, desde que se conheçam os verdadeiros valores das mesmas.

Este processo não é indicado para a medição de roscas cônicas, já que depende de outros fatores como: o conhecimento da conicidade real, a compensação matemática do valor medido, devido a esta conicidade, e a determinação da posição correta de medição do diâmetro de flanco.

A partir dos aspectos abordados, conclui-se que a medição do diâmetro de flanco pelo processo dos três arames apresenta diversos problemas dos quais os principais são:

- a) a incerteza de medição do método ($\pm 3 \mu\text{m}$) é maior do que a desejável ($\pm 1 \mu\text{m}$);
- b) este método apresenta grande quantidade de fontes de erros;
- c) é uma medição muito demorada, levando mais de uma hora para a sua total realização;
- d) o diâmetro medido por este método é um diâmetro médio refe-

- rente ao diâmetro de dois vãos consecutivos;
- e) não determina a posição do diâmetro medido;
 - f) não é indicado para a medição de roscas cônicas.

4.3.2 Outros métodos de medição do diâmetro de flanco

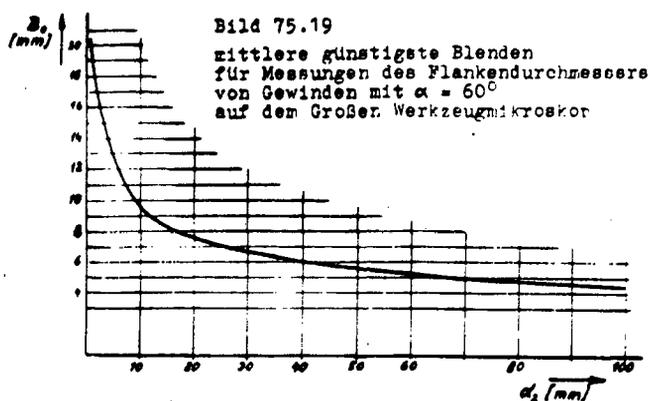
O diâmetro de flanco também pode ser medido por métodos ópticos, seja na imagem projetada, seja com os gumes auxiliares de medição /48/. Dada a grande dificuldade de execução das medições, devido aos cuidados necessários para garantir uma incerteza de medição adequada, eles não são, em geral, empregados na medição de roscas de precisão. Por se tratar de um método óptico, deve-se tomar cuidados com relação a abertura do diafragma, visto que, esta varia com a dimensão do diâmetro que está sendo medido (fig. 4.10). Este método é indicado, também, para a medição de roscas cônicas.

O sistema de medição com sensor óptico (fig. 4.2) utiliza um método de medição derivado do método óptico, por isso apresenta alguns de seus problemas. As medições são realizadas sem a inclinação do microscópio e, como consequência, a medição não é executada num plano axial da rosca. Os erros devidos a esta mudança de plano de medição são compensados matematicamente junto com os erros devidos a abertura do diafragma. Os valores referentes a incerteza de medição do método, ainda não estão disponíveis, porém estima-se que ela não seja maior do que $\pm 3 \mu\text{m}$. Por este método mede-se também roscas cônicas.

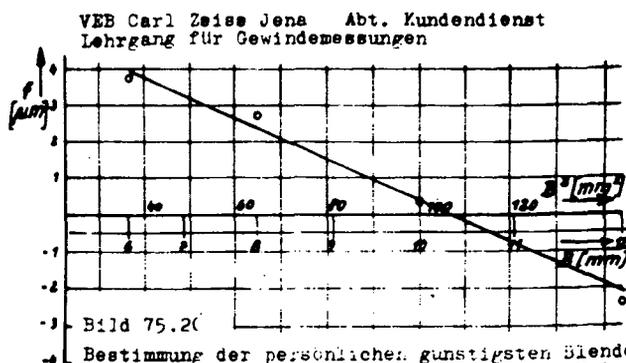
Para roscas pequenas ($d < 3 \text{ mm}$), está sendo estudada a medição através da Transformada Óptica de Fourier (fig. 4.4) /52/ mas

as incertezas de medição são muito elevadas ($\pm 5 \mu\text{m}$) para a medição de roscas de precisão. Além disso, o método não é indicado para a medição de roscas cônicas.

As roscas com diâmetros acima de 50 mm são de preferência medidas em máquinas de medir por coordenadas-CMM com uma incerteza de medição de $\pm 4 \mu\text{m} / 50\%$. Acessórios especiais desenvolvidos no National Research Laboratory of Metrology, Japão, reduziram esta incerteza para $\pm 2 \mu\text{m} / 7\%$. Com um sensor óptico adaptado a uma CMM $/51\%$, obtém-se medições com incerteza de $\pm 3 \mu\text{m}$. As roscas cônicas podem ser, também, medidas em CMM.



VEB Carl Zeiss Jena Abt. Kundendienst
Lehrgang für Gewindemessungen



Bestimmung der persönlichen günstigsten Blende
eines bestimmten Beobachters für Gewinde M 8
durch Messungen eines bekannten Gewindeleh-
dornes mit $d_{2\text{ist}} = 7.192 \text{ mm}$ bei den
Blendenstellungen: $f = 6, 8, 10, 12 \text{ mm}$

a)

b)

- a) exemplo de curva relacionando a abertura ótima do diafragma com o diâmetro de flanco de roscas métricas;
- b) Exemplo do método de determinação da abertura ótima do diafragma para uma rosca M8.

Figura 4.10. Relação entre a abertura do diafragma e o diâmetro de flanco de uma rosca $/57\%$.

4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A figura 4.11. apresenta um quadro resumo dos métodos de medição de roscas externas de precisão com suas incertezas de medição e principais características operacionais. Ao analisar este quadro, verifica-se que roscas com diâmetro abaixo de 5 mm só podem ser medidas por métodos ópticos.

Ainda com referência a análise do quadro, constata-se que as roscas cônicas, com diâmetro < 50 mm, só são medidas por métodos ópticos ou optoeletrônicos.

O sistema optoeletrônico de medição de roscas /16/, pelo fato de não inclinar o microscópio em relação a perpendicular ao eixo da rosca, é obrigado a deslocar a objetiva, segundo o eixo Z de $\pm a$ (fig. 4.2.c.), quando passa de um flanco para outro, a fim de focar a imagem. Em função deste deslocamento a medição não é realizada no plano axial da rosca o que exige uma correção sobre o valor medido. Estes deslocamentos sucessivos, para cima e para baixo ($\pm a$), se constituem em mais uma fonte de erros, além de dificultar a automação da medição. Por tudo isso a medição da rosca é mais demorada do que a medição com uma metodologia que seja semelhante e não precise executar estes deslocamentos.

Ao analisar o conjunto dos métodos de medição de roscas de precisão, chega-se as seguintes conclusões:

- a) cada grandeza exige para a sua medição uma montagem específica em diferentes sistemas de medição;

SISTEMA DE MEDIÇÃO SM	FAIXA DE OPERAÇÃO [mm]	INCERTEZA DE MEDIÇÃO			MEDE ROSCA CONICA
		P	d _z	α _i	
Comparador Abbe	5 < d < 100	± 2	± 3	-	não
Microscópio ou Projetor de perfis	0 < d < 100	± 2	± 3	[± 3]	sim
Sistema Optoeletrônico	10 < d < 100	± 1	± 3	[± 3]	sim
Holografia interferométrica	1 < d < 100	± 1	-	-	não
CMM-Máquina de medir por coordenadas	d > 50	± 1	± 2	[± 3]	sim
Transformada Óptica de Fourier	0 < d < 3	± 5	± 5	[± 15]	não
Laser Interferométrico: fusos	d > 10	± 1	-	-	-
Calibrador angular com limites	d > 10	-	-	[± 1]	sim
Mesa seno com apalpador especial	d > 50	-	-	[± 2]	sim

Figura 4.11. Quadro resumo dos principais sistemas de medição de roscas de precisão com suas características metrológicas e operacionais.

- b) a calibração de roscas de precisão é muito demorada levando no conjunto aproximadamente quatro horas;
- c) as incertezas de medição são maiores em todos os métodos, do que aquelas que seriam desejáveis de acordo com o item 3.2;
- d) o resultado da medição do ângulo de flanco, pelo método usual, é muito dependente da experiência do operador;
- e) os métodos usuais de medição do passo e do diâmetro de flanco não são indicados para medição de roscas cônicas.

5. O SISTEMA DE MEDIÇÃO DE ROSCAS EXTERNAS DE PRECISÃO

Com a finalidade de atender aos requisitos necessários à medição de roscas de precisão foi pesquisado, idealizado, e desenvolvido um Sistema Optoeletrônico para Medição Automatizada de Roscas - OSSAM (Optoelectronic System for Screw Automated Measuring).

As características metrológicas e operacionais que foram diretrizes durante a fase de idealização do OSSAM são: incerteza de medição nos níveis definidos em 3.2; medir todas as grandezas determinantes com uma única fixação da rosca no sistema de medição e reduzir sensivelmente o tempo necessário à medição das grandezas determinantes.

Neste capítulo apresenta-se: o sistema idealizado, para atender a estas exigências, e, também, o sistema experimental utilizado com o objetivo de comprovar a viabilidade do sistema proposto.

5.1 SISTEMA OPTOELETRÔNICO PARA MEDIÇÃO AUTOMATIZADA DE ROSCAS - OSSAM

O sistema proposto tem como princípio fundamental a medição por coordenadas. Na formação do sistema de medição (COSSAM) participam diversos módulos. Basicamente, o OSSAM é formado por: um módulo posicionador, um módulo apalpador e um módulo controlador. A figura 5.1. mostra o esquema geral das interligações entre os diversos módulos que compõem o OSSAM.

5.1.1 Módulo posicionador

O módulo posicionador tem a finalidade de fornecer as coordenadas dos pontos de medição. As grandezas determinantes de uma rosca devem ser medidas segundo direções de medição diferentes umas das outras. Por exemplo, o passo é medido segundo uma direção paralela ao eixo da rosca, enquanto que o diâmetro de flanco é medido segundo uma direção ortogonal à direção anterior, ou seja, ortogonal ao eixo da rosca. Já o ângulo de flanco, por apresentar uma dada inclinação em relação às direções de medição das outras grandezas, necessita de deslocamentos segundo as duas direções ortogonais para ser medido. Por estes motivos o sistema deve possuir uma mesa de coordenadas, com deslocamentos em duas direções ortogonais entre si, sobre a qual será fixada a rosca a ser medida.

Além dos deslocamentos ortogonais da mesa, o OSSAM deve permitir, também, um giro relativo entre a mesa e o eixo da unidade óptica (apalpador), de um ângulo igual ao ângulo de avanço da rosca ($\pm \beta$), a fim de que, as medições se realizem num plano

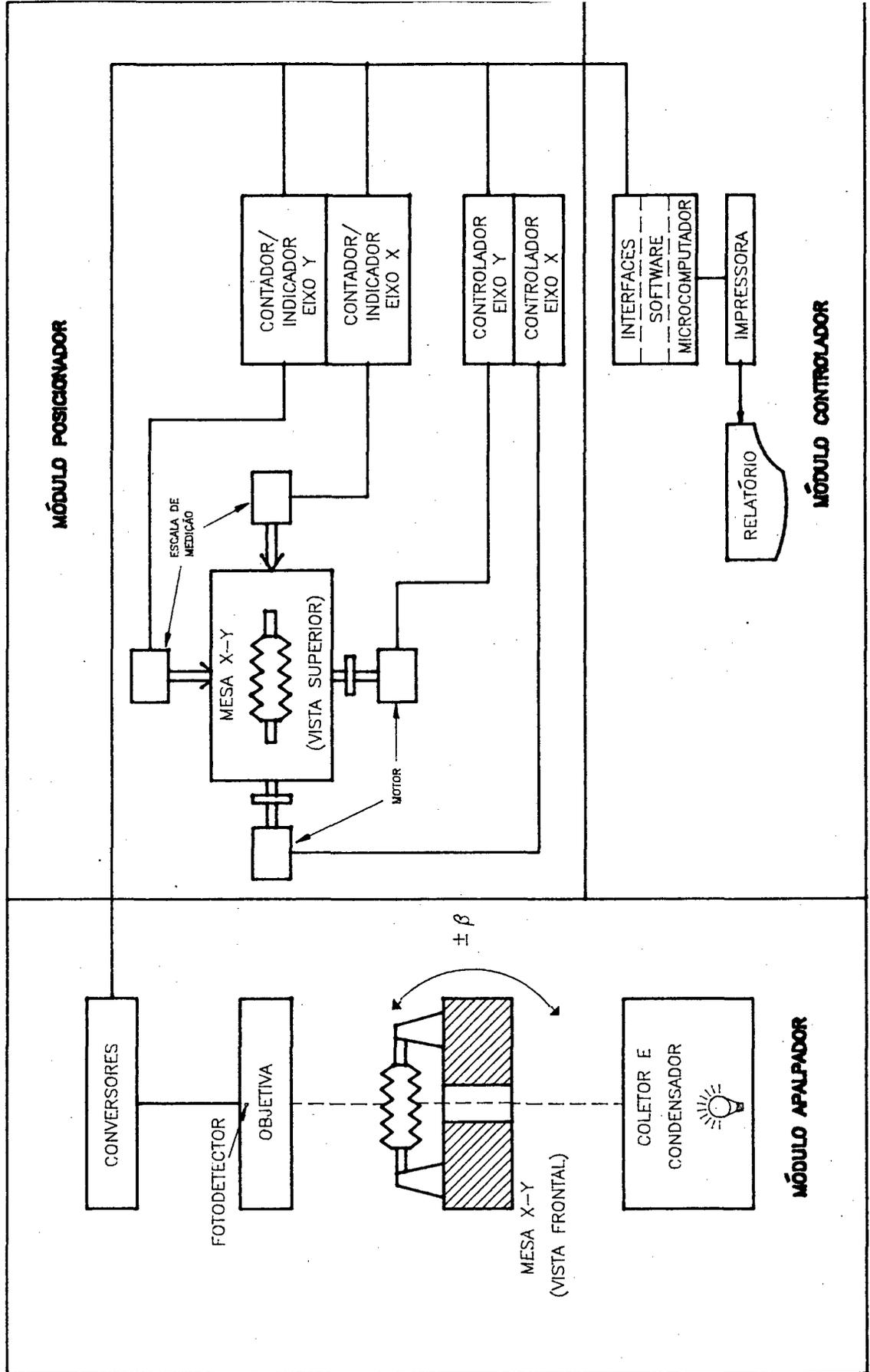


Figura 5.1. Sistema Optoeletrônico para Medição Automatizada de Roscas - OSSAM

em que ambos os flancos de um filete estejam, simultaneamente, focados pela objetiva. Para satisfazer a esta exigência a faixa de variação da inclinação não deve ser menor que $\pm 6^\circ$.

Em função do exposto, o sistema deve permitir que os deslocamentos da mesa possam ser ora contínuos ora intermitentes, a fim de atender aos requisitos das diversas grandezas que devem ser medidas. A velocidade máxima admissível para os deslocamentos contínuos depende de vários fatores: modelo do processador do microcomputador, do tempo de resposta do sensor utilizado, da precisão desejada. Com o objetivo de que o sistema possibilite medições por "scanning" é necessário que os deslocamentos contínuos possam ser realizados alternadamente, em sentidos opostos. Para atender a estes requisitos, são necessários dois motores independentes com controladores programáveis através do microcomputador.

Devido ao fato que as incertezas de medição desejáveis para as grandezas determinantes da rosca são menores do que $1 \mu\text{m}$ (item 3.2.), a resolução das escalas de medição deve ser menor ou igual a $0,1 \mu\text{m}$ e a incerteza de qualquer indicação da escala não deve ser maior do que $\pm 0,2 \mu\text{m}$, pois este valor participa integralmente da composição do valor da incerteza de medição.

O erro de linearidade dos deslocamentos, para o comprimento da rosca que será medida, não pode ser maior do que $0,2 \mu\text{m}$. Os erros de alinhamento entre o eixo da rosca e a direção do deslocamento são eliminados pelo método de medição. O erro de ortogonalidade para os deslocamentos da mesa deve ser menor ou

igual a 10 μm em cada 100 mm de deslocamento. Todos estes limites para os valores máximos dos erros são necessários para que se obtenha uma incerteza de medição compatível com a especificada no item 3.2.

5.1.2 Módulo apalpador

O módulo apalpador tem a finalidade de executar a detecção dos pontos do flanco do filete da rosca. Para tal, a imagem da rosca é projetada sobre o sensor por uma unidade óptica e os pontos do flanco são detectados pelo limite sombra/luz daquele ponto. A detecção do limite entre sombra e luz é obtido através de um transdutor optoeletrónico. O transdutor optoeletrónico é composto por um foto-sensor e por uma unidade eletrónica de conversão do sinal gerado pelo sensor. O sensor é um fotodetector que fornece um sinal de corrente proporcional a área iluminada, quando submetido a um feixe de raios luminosos de intensidade constante. O sinal gerado pelo sensor é dirigido para um circuito eletrónico encarregado de executar a conversão deste sinal.

A unidade de conversão do sinal é um circuito eletrónico, que tem como função amplificar o sinal recebido do fotodetector e gerar um "trigger", toda vez que a tensão do sinal tratado cruzar o nível zero devido a passagem de uma sombra sobre o fotodetector (ver item 6.3.2.). O sinal gerado pela unidade está ligado aos contadores, com o objetivo de fixar o valor da posição, e ao microcomputador para ativar a rotina de leitura da posição dos pontos do flanco da rosca.

A unidade óptica (fig. 5.2.) é composta de elementos, cuja configuração já está consagrada em microscópios de projeção episcópica, porém com uma iluminação formada pelo conjunto de elementos conhecido como "iluminação de Köhler" /59/. A unidade óptica é formada por vários conjuntos de lentes, cuja finalidade é a de iluminar e projetar o objeto a ser medido. Assim, as lentes que compõem o coletor projetam o ponto de luz no foco do condensador. O condensador tem a finalidade de projetar este ponto ao infinito e projetar o diafragma de campo no plano objeto. O diafragma de abertura regula a intensidade luminosa sobre o plano objeto. O diafragma de campo limita o campo iluminado no plano objeto para reduzir as reflexões e dispersões do feixe de luz, o que, por consequência, melhora a definição da imagem. O tamanho do campo iluminado deve ser igual ao necessário para iluminar toda a superfície sensível do fotodetector. As lentes que formam a objetiva têm a tarefa de projetar ao infinito uma imagem do objeto a ser medido. As lentes intermediárias interceptam a projeção desta imagem ao infinito e a projetam no plano imagem. A superfície sensível do fotodetector deve ser colocada exatamente neste plano imagem.

5.1.3 Módulo controlador

O módulo controlador das unidades do OSSAM é formado por um microcomputador com interfaces que possibilitem a sua comunicação com as outras unidades do sistema, mais uma impressora e um adequado software.

As informações digitais referentes à posição do flanco da ros-

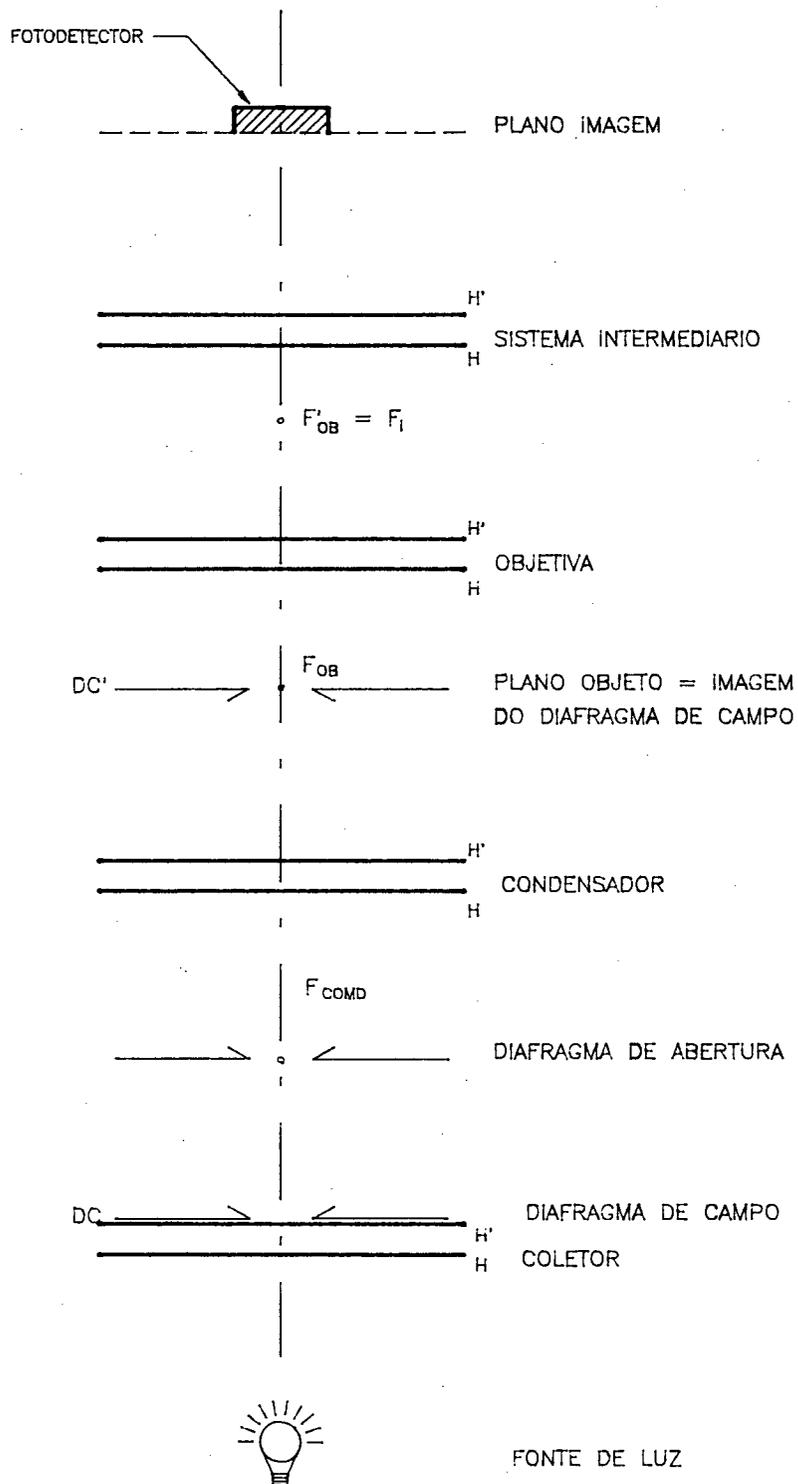


Figura 5.2. Esquema da unidade óptica do OSSAM.

ca chegam ao microcomputador, através de uma interface paralela. Caso o contador da escala não possua o "hardware" que fixe o valor das coordenadas da posição quando da chegada do "trigger", este "hardware" deve fazer parte da interface paralela. O citado "hardware" consiste de um circuito integrado com "latch", no qual o tempo necessário para fixar uma leitura seja tão pequeno que não reduza a precisão da determinação da coordenada do ponto. A seguinte condição deve ser satisfeita:

$$\frac{\text{velocidade da mesa}}{\text{atraso na leitura}} \ll \frac{\text{resolução da escala}}{2}$$

O "software" executa o gerenciamento do sistema e realiza a documentação da medição, gravando os dados no "winchester" do microcomputador ou em disquetes e imprimindo relatórios pela impressora. Para atender tais objetivos o "software" deve:

- a) possibilitar a execução de testes de repetibilidade da leitura das coordenadas dos pontos dos flancos da rosca com o objetivo de testar o perfeito funcionamento do sistema de medição antes do início das medições;
- b) comandar os controladores dos motores de modo a atender os requisitos da medição que está sendo executada;
- c) executar a leitura da posição de cada ponto do flanco quando da chegada do "trigger";
- d) testar, ao fim de cada ciclo, as leituras e caso exista alguma leitura que não se enquadre dentro dos limites determinados, repetir o ciclo;
- e) quando da medição por "scanning" executar a regressão da reta, após o levantamento das coordenadas dos pontos dos

flancos da rosca, e calcular a precisão da representabilidade do flanco da rosca pela reta; em função deste resultado autorizar ou não a continuidade da medição;

f) executar o cálculo: do valor das grandezas, após a conclusão das medições, e do valor de seus erros;

g) documentar os dados e resultados das medições no "winchester" e/ou disquetes e com relatórios impressos;

h) possibilitar uma verificação a qualquer momento, durante as medições, das temperaturas do OSSAM e da rosca.

5.2 OSSAM: METODOLOGIA DE MEDIÇÃO

A metodologia de medição de roscas do OSSAM é a medição por coordenadas que foi desenvolvida tendo como base o método óptico de medição. Dois processos diferentes, de medição, ambos automatizados, podem ser utilizados: a medição individual de uma dada grandeza da rosca ou a medição simultânea de todas as grandezas determinantes da mesma.

5.2.1 A preparação para a medição

A peça deve ser fixada sobre a mesa, geralmente, entre pontas, e o eixo da rosca inclinado, em relação ao eixo óptico do sistema, de um ângulo igual ao ângulo de avanço a fim de reduzir, a níveis aceitáveis, a deformação da silhueta na projeção dos flancos da rosca. Esta inclinação é realizada em um plano, perpendicular ao plano da mesa, que contenha o eixo da rosca. O ângulo da inclinação entre os eixos pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$\text{ângulo de inclinação} = \beta = \text{arc tg } \frac{P}{\pi \cdot d_2}$$

A limpeza da peça, neste método, é fundamental para obtenção de resultados corretos, sendo inclusive mais crítica do que na maioria dos outros métodos de medição. Um único fio de algodão já é suficiente para que sejam obtidos resultados errados.

Antes de iniciar a medição propriamente dita, é recomendável a realização de um teste de repetibilidade de detecção dos flancos da rosca para uma certificação de que todo o sistema está funcionando corretamente. Neste teste deseja-se que a repetibilidade da leitura da posição dos pontos dos flancos seja igual ou menor do que $0,2 \mu\text{m}$ (ver fig. 6.8).

5.2.2 Medição individual das grandezas

A medição individual de uma certa grandeza é realizada pelo deslocamento da rosca, segundo o eixo X ou Y, de modo que as imagens projetadas, de dois convenientes flancos do filete da rosca, se desloquem sobre o fotodetector. Por este procedimento podem ser medidas grandezas como passo, diâmetro de flanco, diâmetro maior e diâmetro menor. A principal vantagem deste procedimento é a rápida determinação do valor de uma dada grandeza.

5.2.3. Medição simultânea das grandezas determinantes

Para a medição simultânea de todas as grandezas determinantes da rosca, adota-se um procedimento diferente do anterior. No plano de medição escolhido realiza-se um "scanning" sobre a

imagem projetada da rosca de modo, que se obtenham as coordenadas de diversos pontos de cada flanco em ambos os lados, posterior $(y_i; x_i)$ ou anterior $(y'_i; x'_i)$, da projeção da rosca (fig. 5.3). Com as coordenadas conhecidas para os diversos pontos de cada flanco, realiza-se uma regressão linear, obtendo-se deste modo uma reta para cada flanco. As dimensões das grandezas determinantes são calculadas a partir destas retas.

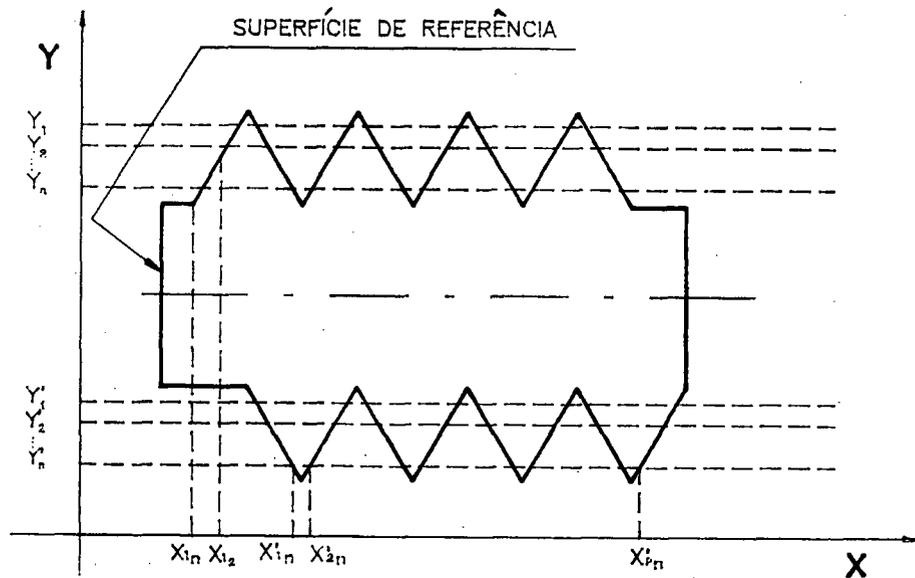


Fig. 5.3. "Scannig" dos flancos dos filetes da rosca.

O valor dos passos é calculado através da distância, medida segundo a direção do eixo da rosca, entre as retas paralelas que representam dois flancos consecutivos. Deste modo individualizam-se os passos dos flancos esquerdos e os passos dos flancos direitos. A partir dos valores calculados para os passos, o erro do passo é, facilmente, determinado pelo procedi-

mento apresentado no capítulo 2.

O valor do ângulo de flanco é calculado através dos coeficientes angulares das retas representativas dos flancos das rosca. Tanto α_1 como α_2 são obtidos simultaneamente. Como o ângulo medido tem um erro, devido a inclinação da rosca segundo o ângulo de avanço, o ângulo correto deve ser calculado, projetando o ângulo medido, segundo o plano axial da rosca. O ângulo da rosca (2α) é calculado somando-se os valores dos ângulos α_1 e α_2 .

Por fim, o diâmetro de flanco é a distância, medida ortogonalmente ao eixo da rosca, entre as retas representativas de flancos diametralmente opostos. Com este procedimento determina-se o valor dos diâmetros de flanco ao longo de toda a rosca, flanco a flanco, possibilitando a individualização de cada um dos diâmetros de flanco. A partir das ordenadas do centro de cada diâmetro de flanco calcula-se o valor dos erros de posição do diâmetro de flanco.

Como este é o procedimento que foi adotado para os experimentos, ele será melhor detalhado no capítulo 7. A principal vantagem deste procedimento, em relação ao anterior, é a redução do tempo necessário à medição dos valores de todas as grandezas determinantes da rosca.

5.2 O SISTEMA EXPERIMENTAL

Com base no sistema projetado, foi montado um experimento com o objetivo de demonstrar a viabilidade técnica e os ganhos de precisão do OSSAM. Face a escassez de recursos e a indisponibilidade de determinados instrumentos, não foi possível montar o sistema experimental com todos os requisitos desejados, o que, certamente, levaria a melhores resultados. Devido a tais limitações o experimento foi montado com as características descritas a seguir.

5.3.1 Parte física

O experimento foi montado em um microscópio universal de medição (fig. 5.4.), com o aproveitamento da óptica original, na qual foi retirada a lente ocular com a finalidade de alcançar o plano imagem das lentes intermediárias e nesta posição instalar o fotodetector. A diferença mais significativa entre a unidade óptica proposta e a experimental consiste na inexistência de diafragma de campo. Para a implementação deste diafragma, seria necessário alterar a óptica do microscópio, adaptando-o às necessidades da pesquisa. Porém, com este procedimento o microscópio perderia as suas características originais e ficaria com capacidade de executar medições somente segundo o princípio proposto. A outra solução possível seria projetar uma nova unidade óptica para o microscópio, que contemplasse a possibilidade de colocação e retirada de um subsistema, que contenha o diafragma de campo com as respectivas lentes. Por motivos óbvios, optou-se por manter a configuração original, reforçado pelo fato de estimar-se que os erros, de-

correntes da não utilização de diafragma de campo, não causariam perdas significativas de precisão.

Como sensor, foi utilizado um micro-fotodetector de quadrantes (fig. 6.13) visto que ele possibilita usar a passagem do valor da tensão gerada por zero para que o transdutor gere um "trigger" (ver item 6.3). Uma vez que o referido fotodetector não possui um amplificador operacional adaptado ao mesmo, foi preciso levar o sinal gerado, livre de interferências externas, até a unidade conversora do sinal. Com este objetivo utilizou-se um cabo blindado, no qual a blindagem foi aterrada diretamente no terminal terra da fonte (figura 5.5.). Não foi utilizado um fotodetector com as formas desejadas para as superfícies ativas, por que o mesmo não foi encontrado, disponível comercialmente.

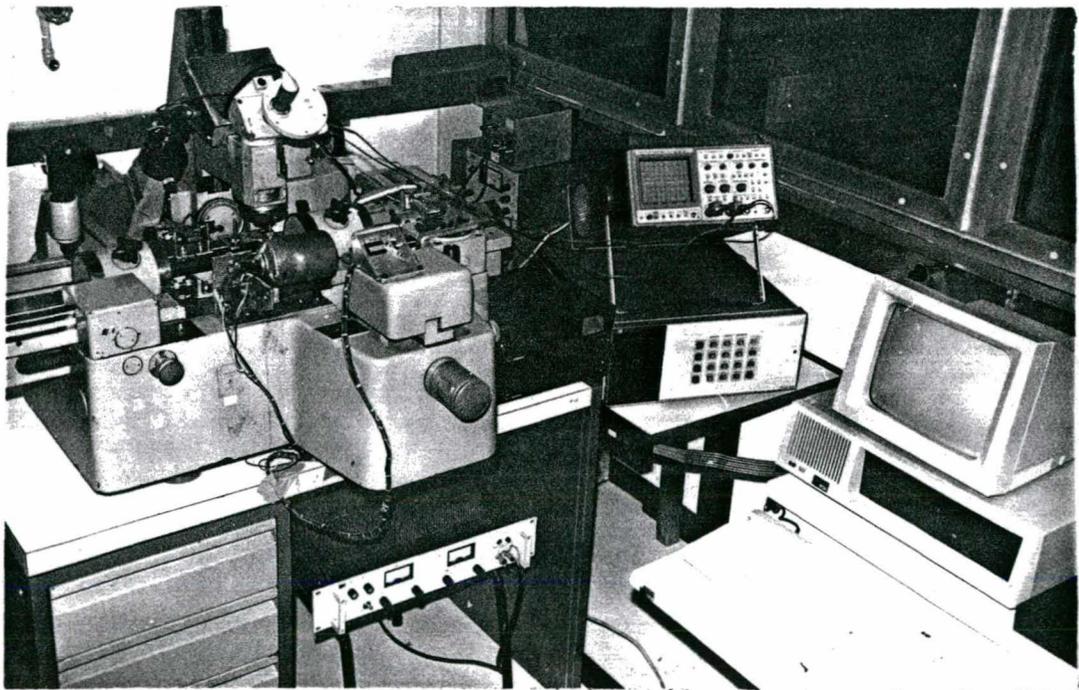


Figura 5.4. Fotografia do experimento adaptado a um microscópio universal de medição

Optou-se por utilizar, para o eixo X, um comparador digital, com escala eletro-óptica, faixa de operação de 30 mm e contador com incremento digital de $0,1 \mu\text{m}$ e, para o eixo Y, utilizou-se a escala óptica do próprio microscópio, visto o Laboratório não dispor das escalas desejadas.

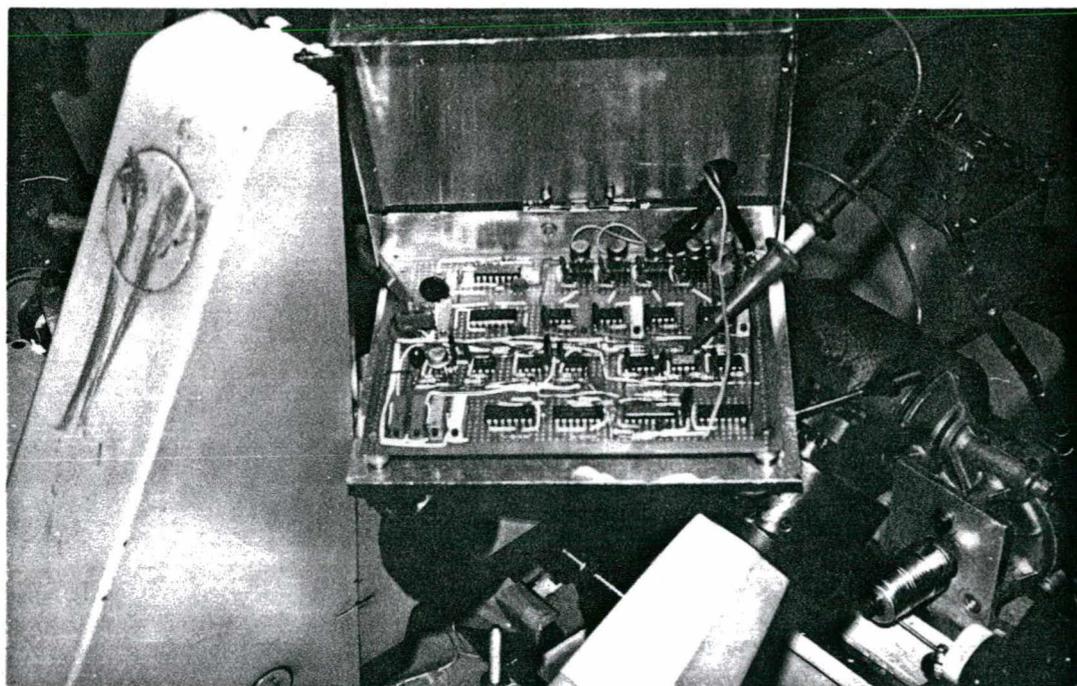


Figura 5.5 Fotografia da unidade de conversão do sinal e sua ligação ao fotodetector.

Com a finalidade de promover os deslocamentos da mesa, adquiriu-se dois motores a passo e, para testes, um controlador não programável, devido aos escassos recursos disponíveis. Durante os experimentos verificou-se que a velocidade desejada, para deslocamento da mesa (item 6.2.4.), coincidia com a frequência de ressonância do motor a passo. Como não haviam mais recursos para a aquisição de um redutor de velocidade, recorreu-se a um motor de corrente contínua, já utilizado durante os testes de

viabilidade do sistema /10/. Dispositivos de fins de curso limitam o deslocamento da mesa e ativam o circuito eletrônico de inversão do sentido de deslocamento (fig. 5.6.). Em virtude da dificuldade de instalação dos motores a passo, optou-se por executar manualmente os deslocamentos do eixo Y, uma vez que os mesmos são pequenos e esporádicos.

O microcomputador disponível é um IBM-PC compatível com "clock" de 4,77 MHz, 704 quilobytes de RAM e "winchester" de 10 megabytes.

5.3.2 "Software"

O programa desenvolvido para gerenciar o OSSAM atende a todos

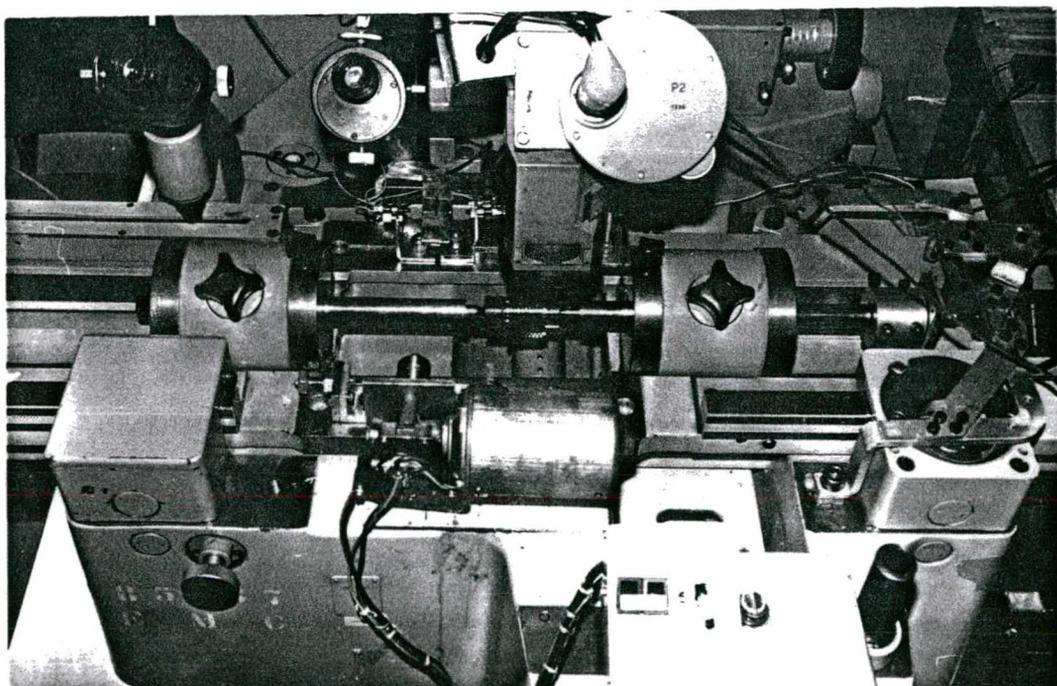


Figura 5.6 Fotografia da mesa, com a rosca, e respectivos elementos de movimentação.

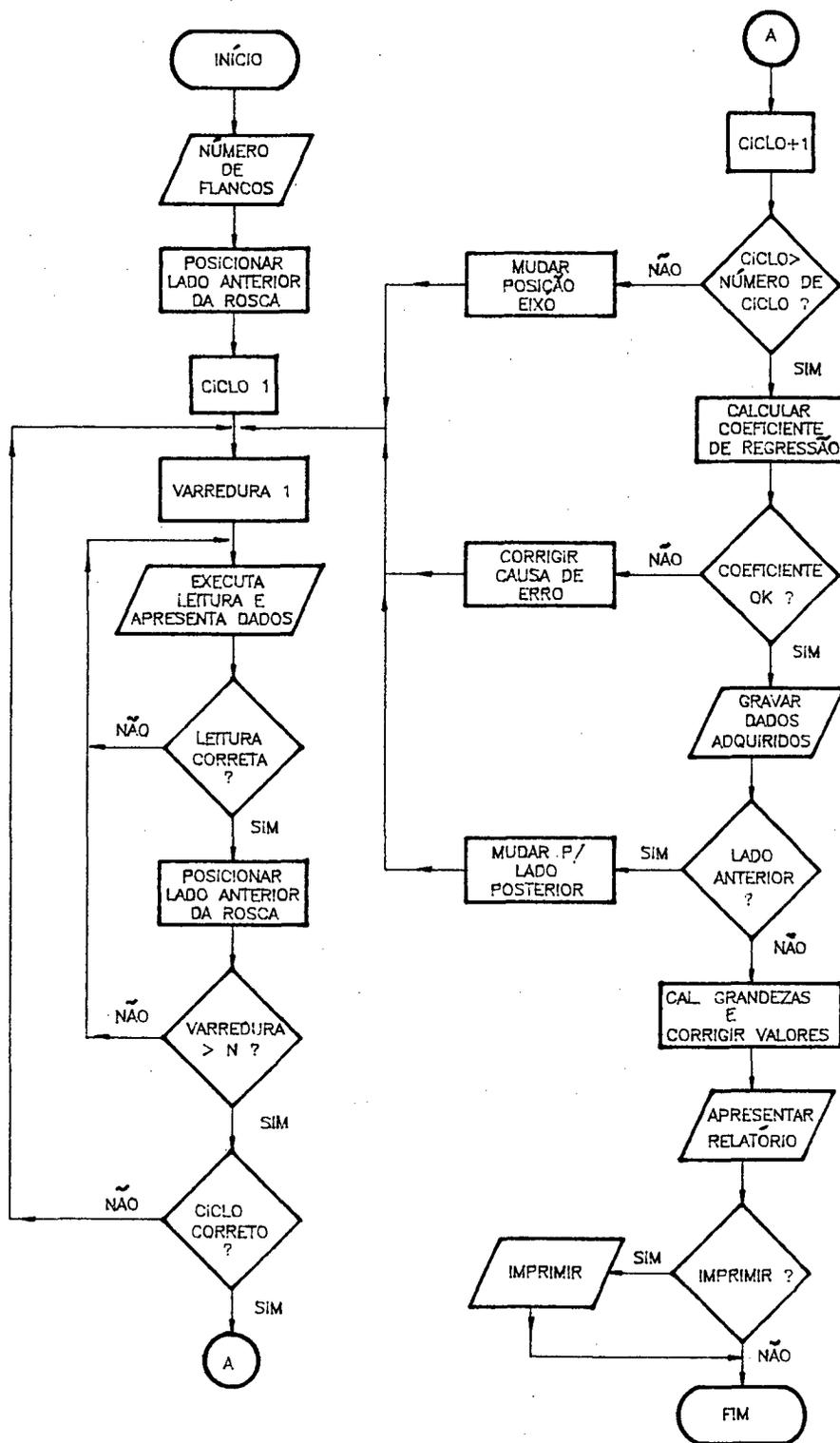


Figura 5.7 Software: Fluxograma do programa de aquisição de dados com o OSSAM

os requisitos constantes do projeto (item 5.1.3.). Foi elaborado em linguagem Turbo Pascal 5.0, sendo que o fluxograma, do programa que gerencia a aquisição de dados, é mostrado na figura 5.7. Devido ao fato de que o contador da escala do eixo X não fixa a leitura da posição e que a interface paralela não estava aceitando a programação para executar esta atividade, teve-se que executar uma rotina de leitura da posição, em Assembly, para reduzir sensivelmente o tempo necessário a identificação da chegada do "trigger" e a realização da leitura, com o objetivo de não prejudicar a precisão da medição.

5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em decorrência das inúmeras dificuldades encontradas para a implementação do sistema experimental, muitas das soluções adotadas são inferiores àquelas que foram projetadas. Em vista desta solução, pode-se prever que o sistema projetado, que é factível na prática, deverá apresentar melhores características que o atual sistema experimental, o que se traduz em uma maior segurança às conclusões apresentadas neste trabalho, que são oriundas dos resultados obtidos com o sistema experimental.

6. DETECÇÃO DA POSIÇÃO DE UM PONTO DO FLANCO DA ROSCA

No sistema optoeletrônico desenvolvido, a detecção da posição de um ponto do flanco da rosca é realizada pela detecção do limite sombra/luz, através de um transdutor optoeletrônico (fig. 6.1). O transdutor optoeletrônico é composto de um sensor (fotodetector) e de uma unidade de conversão do sinal (circuito eletrônico). Internacionalmente, as pesquisas iniciais, referentes a sistemas de medição optoeletrônicos, foram realizadas com o emprego de fotodetectores que possuíam uma única superfície ativa /60/. Logo descobriu-se que este sensor não atendia aos requisitos de uma medição mais precisa. Um fabricante de instrumentos de medição, buscando achar uma solução para este problema colocou um arame vibrando na frente do fotodetector e passou a utilizar como referência, para a leitura, a posição na qual o tempo em que a sombra do arame está sobre a parte iluminada do fotodetector é igual ao tempo em que o arame está sobre a parte sombreada /61/. Com este artifício foi possível realizar as primeiras medições automatizadas de precisão, com este tipo de fotodetector /14/, porém

não na medição de roscas. Também na medição de roscas foram utilizados, inicialmente, fotodetectores com uma única superfície ativa /11/. Por estes motivos, este mesmo tipo de fotodetector foi utilizado nos experimentos iniciais deste trabalho /17/. Em função disto, a primeira parte deste capítulo é dedicada ao estudo do transdutor com este tipo de fotodetector e a análise dos problemas referentes a utilização deste sensor de posição. Não se está afirmando que o fotodetector com uma superfície ativa não possa ser empregado como sensor de posição. Existem, inclusive, alguns tipos de medições, de precisão, em que este sensor é indicado, como é o caso da medição do passo de um calibrador roscado /62/.

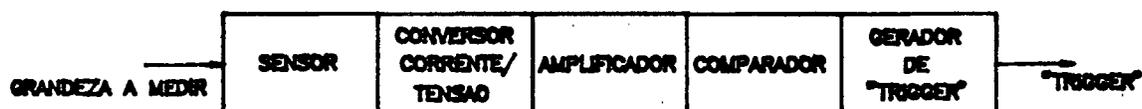


Figura 6.1 Unidades do transdutor optoeletrônico

Ao constatar as dificuldades citadas acima, os pesquisadores passaram a utilizar, como sensor, fotodetectores com mais de uma superfície ativa. O primeiro trabalho publicado /12/ aplicou este tipo de sensor na medição da largura de fendas em chapas. Em 1987, surgiu o primeiro produto comercial com este tipo de sensor /13/. Dois anos após, foram publicadas as primeiras informações sobre a sua utilização na medição de roscas, embora a medição não fosse de roscas de precisão /15/.

Os experimentos, referentes a este trabalho, seguiram o mesmo caminho. Após a constatação de que os resultados das medidas, utilizando o fotodetector com uma superfície ativa, não eram satisfatórios, passou-se a executar os testes com fotodetectores com mais de uma superfície ativa, cujas características compõem a segunda parte deste capítulo.

Atualmente, as pesquisas estão sendo dirigidas para a utilização de CCD (charge coupled device) /63/ com a finalidade de agilizar o levantamento de dados, através da determinação simultânea da posição de diversos pontos. A precisão necessária é obtida pela leitura da posição de sub-pixels /64/, que melhoram a resolução óptica /65/ através do emprego de câmeras especiais para microscópio /66/.

6.1 TRANSDUTOR OPTOELETRÔNICO

O transdutor optoeletrônico (fig. 6.1) é parte integrante do módulo apalpador, do sistema proposto (OSSAM) (fig. 5.1), encarregado de fornecer um sinal ("trigger"), quando da detecção da fronteira entre sombra e luz. Esta detecção começa pelo fotodetector, que fornece uma corrente (ou tensão) proporcional a área que está iluminada. Este sinal (geralmente de corrente) é levado para um circuito eletrônico onde inicialmente é convertido em tensão e depois amplificado. Após, o sinal é comparado com um nível pré-determinado de tensão e desta comparação surge um sinal que devidamente tratado gera um "trigger". Este "trigger" está ligado ao módulo de posicionamento e ao módulo

controlador para acionar a leitura das coordenadas deste ponto. Este é o princípio básico de funcionamento do transdutor optoeletrônico que tem características específicas para cada tipo de fotodetector. Nos itens seguintes (6.2 e 6.3) serão estudados os transdutores com sensores de uma e de mais de uma superfície ativa, bem como as características metrológicas do sistema de medição que utiliza estes tipos de transdutores.

6.2 TRANSDUTOR COM SENSOR DE UMA SÓ SUPERFÍCIE ATIVA

Este item inicia com o estudo da unidade de conversão do sinal, utilizada nos experimentos, que é específica para este tipo de fotodetector.

Durante os testes realizados com um sensor de uma superfície ativa foi utilizado o fotodetector fotovoltaico PIN-5DP (fig. 6.2) com as seguintes características básicas /67/: superfície ativa circular com diâmetro de 2,54 mm, sensibilidade de 0,35 A/W e 1 μ s de tempo de resposta (67%) /68/.

6.2.1 Circuito eletrônico do transdutor

O circuito eletrônico, que recebe o sinal gerado pelo fotodetector fotovoltaico, fornece um outro sinal ("trigger") sob condições definidas (fig. 6.3). Com estas finalidades o sinal recebido do fotodetector é amplificado por duas vezes (1 e 2) e a seguir comparado com uma tensão de referência (3), tensão esta cuja definição é detalhada no item 6.2.3. O sinal de saída do comparador (4) passa por dois mono-estáveis (5 e 6) que geram os "triggers" referentes, respectivamente, a entrada

e a saída do flanco da rosca. Uma porta "and" unifica os sinais de saída (7).

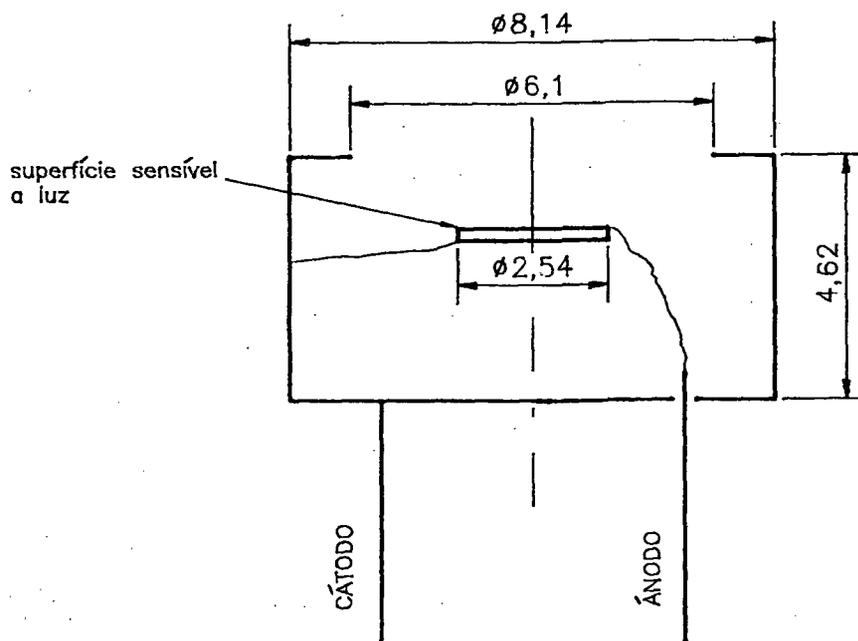


Figura 6.2 Dimensões básicas (mm) do fotodetector foto-voltaico tipo PIN-5DP /67/.

6.2.2 Função característica do sinal gerado pelo sensor

Para a dedução da função característica teórica serão adotadas as seguintes hipóteses simplificativas:

- a) a intensidade luminosa, gerada pela fonte de luz, distribui-se uniformemente sobre toda superfície ativa do fotodetector. O erro gerado pela não uniformidade de distribuição da intensidade luminosa pode ser desprezado visto que a lâmpada é alimentada por uma fonte estabilizada e o diâmetro do feixe luminoso, que incide sobre o fotodetector, é pequeno (85 μm):

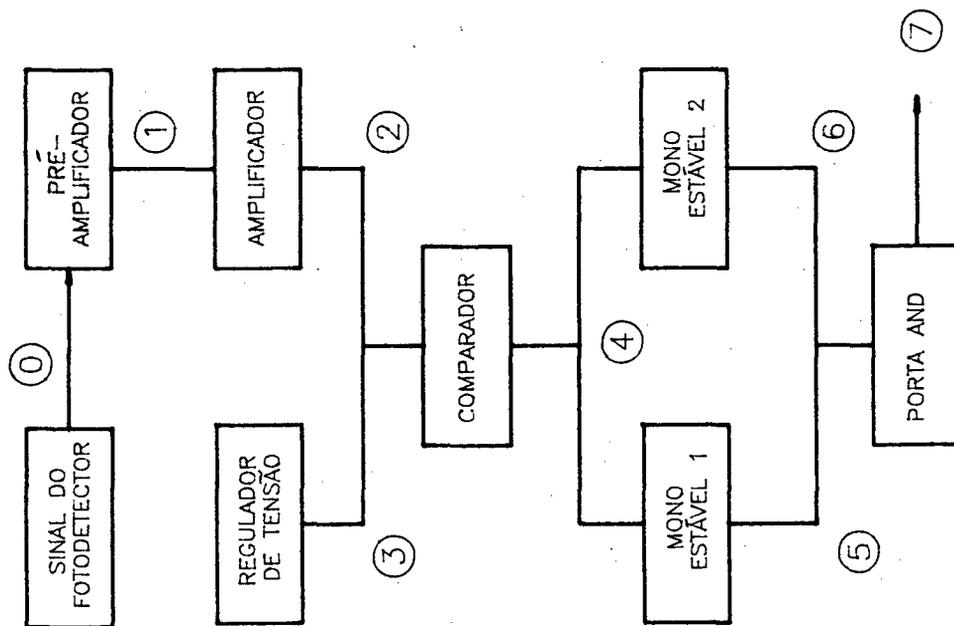
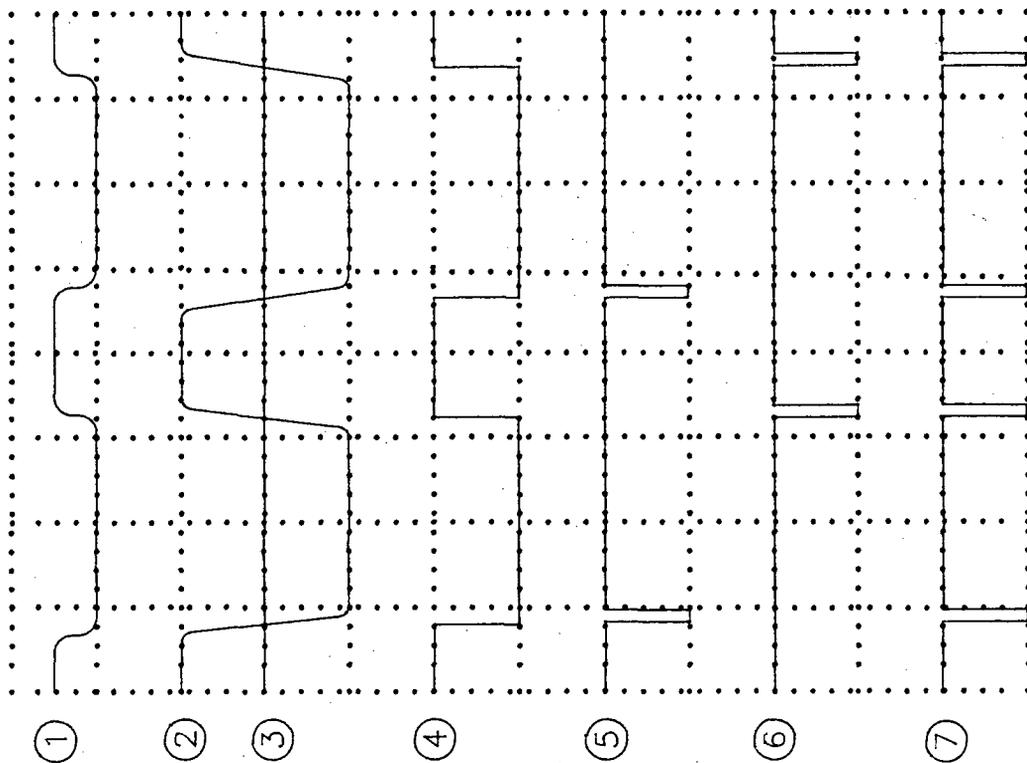


Figura 6.3 Transdutor com sensor de uma superfície ativa: esquema das unidades do circuito eletrônico, respectivas ligações e formas do sinal.

$$\frac{\text{diâmetro nominal da superfície ativa do fotodetector}}{\text{ampliação da imagem}} =$$

$$= \frac{2,54}{30} = 0,085 \text{ mm};$$

Além deste fato, os testes de estabilidade da tensão gerada, realizados com o sensor plenamente iluminado, durante uma hora, forneceram um desvio padrão de somente 2 mV para uma tensão de ≈ 10 V, que é insignificante face ao nível de ruído do sinal (ver item 6.2.5).

- b) a sensibilidade à luz, por unidade de área, é constante ao longo de toda superfície ativa do fotodetector. Esta hipótese se justifica pelo fato de que o fotodetector é formado por uma só superfície, sendo toda ela constituída do mesmo material sensível à luz. Este sensor, de acordo com informações do fabricante, é de precisão e indicado para usos em metrologia.
- c) a corrente de campo escuro é nula. Esta simplificação tem como finalidade única de deslocar a posição da curva teórica de modo que a mesma inicie em zero.

Com base nas hipóteses acima, pode-se afirmar que a tensão "U" gerada pelo fotodetector (em Volts) é diretamente proporcional a área "A" iluminada (em mm²). O fator de proporcionalidade "S_b" (em V/mm²) corresponde a sensibilidade do transdutor optoeletrônico, que é o produto da sensibilidade do fotodetector pelo ganho da amplificação do sinal. Resumindo tem-se:

$$U = S_b \cdot A \quad (6.1)$$

Pela figura 6.4.a. obtém-se:

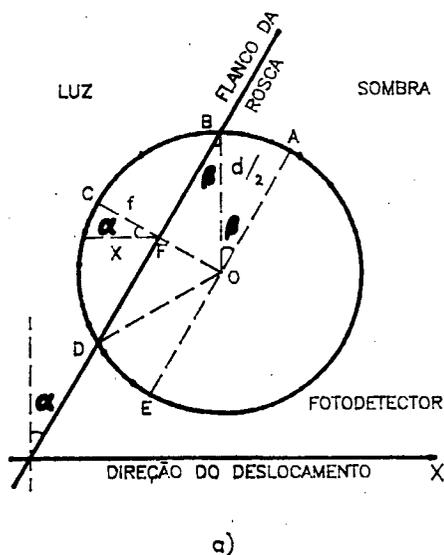
$$A = A_{BCDB} = A_{ACEA} - A_{OBDO} - 2 \cdot A_{OABO} \quad (6.2)$$

sendo que:

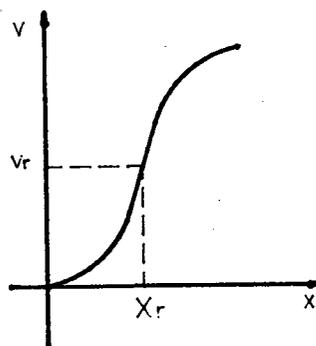
$$A_{ACEA} = \frac{\pi \cdot d^2}{8} \quad (6.3)$$

onde: d = diâmetro da superfície ativa fotodetector [mm];

$$A_{OBDO} = \frac{BD}{2} \left(\frac{d}{2} - r \right) \quad (6.4)$$



a)



b)

a) Posições relativas da sombra em relação ao fotodetector

b) Representação gráfica da curva característica.

X: direção de deslocamento do flanco da rosca

Figura 6.4 Representação gráfica do fotodetector e de sua curva característica teórica.

pelo triângulo BFO pode-se afirmar que:

$$\frac{BD}{2} = \sqrt{\frac{d^2}{4} - \left(\frac{d}{2} - f\right)^2} = \sqrt{d \cdot f - f^2} \quad (6.5)$$

substituindo o valor da equação 6.5 em 6.4 resulta:

$$A_{OBD0} = \left(\frac{d}{2} - f\right) \cdot \sqrt{d \cdot f - f^2}; \quad (6.6)$$

como: $f = x \cdot \cos \alpha$, onde:

α = ângulo de flanco da rosca (representado só pela letra α neste item);

x = deslocamento da sombra do flanco da rosca segundo o eixo X [mm];

obtem-se:

$$A_{OBD0} = \left(\frac{d}{2} - f\right) \cdot \sqrt{d \cdot x \cdot \cos \alpha - x^2 \cos^2 \alpha} \quad (6.7)$$

e:

$$A_{OAB0} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \frac{\beta}{2 \cdot \pi} = \beta \cdot \frac{d^2}{8} \quad (6.8)$$

do triângulo OBF retira-se que:

$$\begin{aligned} \beta &= \arcsen \frac{d/2 - f}{d/2} = \arcsen \frac{d - 2f}{d} = \\ &= \arcsen \frac{d - 2x \cdot \cos \alpha}{d} \end{aligned}$$

logo:

$$A_{OAB0} = \frac{d^2}{8} \cdot \arcsen \frac{d - 2x \cdot \cos \alpha}{d} \quad (6.9)$$

substituindo (6.3), (6.7) e (6.9) em (6.2) chega-se à:

$$\begin{aligned} A &= \frac{\pi \cdot d^2}{8} - \left(\frac{d}{2} - x \cdot \cos \alpha\right) \sqrt{d \cdot x \cdot \cos \alpha - x^2 \cos^2 \alpha} - \\ &\quad - \frac{d^2}{4} \arcsen \left(\frac{d - 2x \cdot \cos \alpha}{d}\right) \quad \text{ou} \\ A &= \frac{d^2}{4} \left[\frac{\pi}{2} - \arcsen \left(\frac{d - 2x \cdot \cos \alpha}{d}\right) \right] - \\ &\quad - \left(\frac{d}{2} - x \cdot \cos \alpha\right) \sqrt{d \cdot x \cdot \cos \alpha - x^2 \cos^2 \alpha} \quad (6.10) \end{aligned}$$

que substituindo em 6.1 fornece a seguinte equação para a função característica teórica:

$$U = S_b \left\{ \frac{d^2}{4} \left[\frac{\pi}{2} - \arcsen \left(\frac{d - 2x \cdot \cos \alpha}{d} \right) \right] - \left(\frac{d}{2} - x \cdot \cos \alpha \right) \sqrt{d \cdot x \cdot \cos \alpha - x^2 \cos^2 \alpha} \right\} \quad (6.11)$$

Para as condições específicas dos testes referentes ao experimento ($d = 2,54$ mm e $\alpha = 30^\circ$) a equação 6.11 pode ser expressa por:

$$U = S_b \left\{ 1,6129 \cdot [1,5708 - \arcsen(1 - 0,6819x)] - (1,27 - 0,866x) \cdot \sqrt{2,1997x - 0,75x^2} \right\} \quad (6.12)$$

Analisando a equação (6.12) constata-se que o valor da tensão "U" depende da sensibilidade " S_b " e da coordenada do limite sombra/luz em relação ao fotodetector.

$$U = f(S_b, x) \quad (6.13)$$

A tensão obtida "U" é diretamente proporcional a sensibilidade " S_b " que depende da sensibilidade do fotodetector e do ganho dos amplificadores da unidade geradora do "trigger". "U" é função, também, de "x" que depende da ampliação que está sendo empregada pela unidade óptica.

$$x = a \cdot x \quad (6.14)$$

onde "a" é igual a ampliação da unidade óptica e x é o deslo-

camento real do flanco da rosca. A figura 6.5 mostra a influência da ampliação, para aumentos de 50X, 30X e 10X, na função característica, para um mesmo deslocamento real da rosca. Teoricamente, o valor de "a" será tanto melhor, quanto maior ele for, pois menor será o diâmetro do sensor de luz em "contato" com o flanco da rosca. Em contrapartida, quanto maior for o valor de "a" maior será o ganho necessário nos amplificadores operacionais, para dar a mesma tensão final, e, conseqüentemente, maior será o "ruído" do sinal gerado pelo transdutor. Durante os experimentos, os melhores resultados foram obtidos com um valor de $a = 30$ vezes, o que determina um diâmetro para o feixe luminoso apalpador igual a $85 \mu\text{m}$, conforme cálculo anterior.

6.2.3 Critérios para definição do valor da tensão de referência

Em medições com transdutor optoeletrônico, nas quais o limite sombra/luz se desloca com uma dada velocidade, sobre um fotodetector com uma única superfície ativa, é usual a utilização da passagem por zero da segunda derivada do sinal gerado pelo fotodetector como referência para a leitura da coordenada da posição do ponto. Porém, como neste experimento a velocidade de deslocamento da mesa não é uniforme e como o circuito eletrônico que gera a derivada produz um atraso no sinal, este artifício não pôde ser utilizado porque aumentaria o erro aleatório (ver item 6.2.4.) e seu valor seria maior do que o admissível.

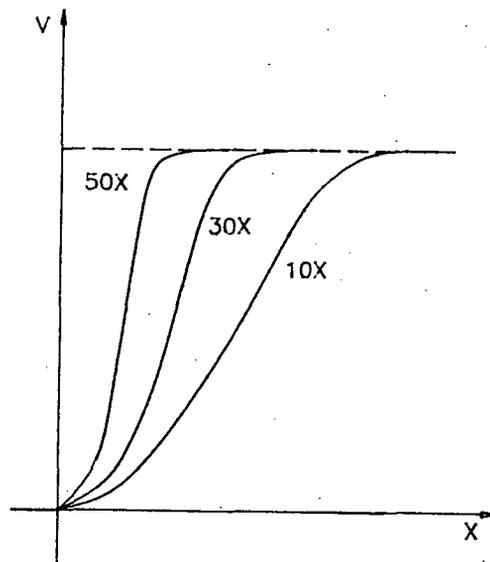


Figura 6.5 Variação da curva característica teórica em função da ampliação da imagem projetada para um mesmo deslocamento "x" da rosca.

Na impossibilidade do emprego deste artifício, pode-se utilizar uma tensão pré-determinada, como referência para a comparação do sinal, a fim de definir o momento em que são feitas as leituras. O valor desta tensão de referência estará correto, quando as leituras correspondentes estiverem isentas de erros sistemáticos. A figura 6.6 mostra um processo que é utilizado para a determinação do valor da tensão de referência, cujo princípio é a eliminação dos erros sistemáticos. Como a tensão gerada é função da área iluminada, caso a tensão, considerada como tensão de referência, seja maior que a tensão real, a dimensão medida (l_1) também será maior que a correta (L) (fig. 6.6.a.). Quando a tensão escolhida for menor que a real, a dimensão (l_2) também será menor que a correta (fig. 6.6.b.). Portanto, de acordo com a figura 6.6.c., a tensão correta é aquela em que a leitura da posição acontece exata-

mente quando metade do fotodetector está encoberto pela sombra projetada pela peça. De acordo com a figura 6.4.b., a posição referente a metade do fotodetector " x_r " corresponde a uma tensão " U_r " igual a média aritmética das tensões geradas pelo fotodetector. Observa-se, também, pela figura 6.4.b., que esta tensão " U_r " corresponde ao ponto de inflexão da curva.

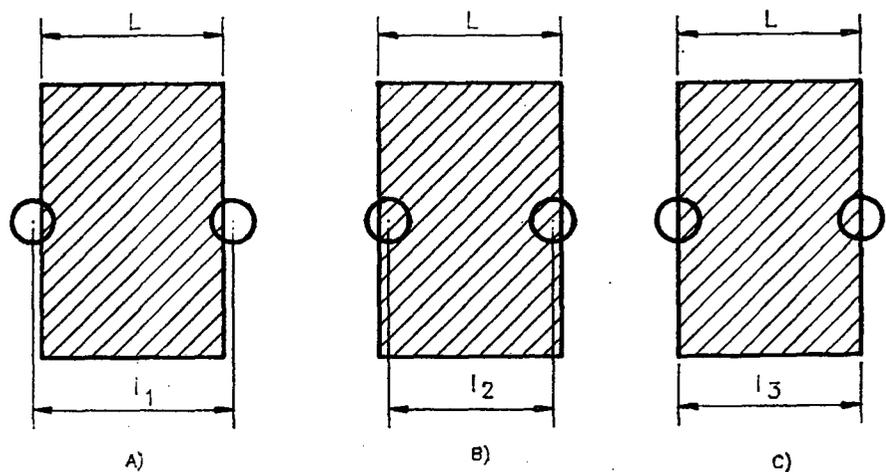


Figura 6.6. Relação entre a dimensão medida (l_i) e a área encoberta do fotodetector utilizada como referência para as leituras.

Dada a impossibilidade de se identificar as posições exatas do início e do fim da curva característica, não foi possível utilizar a média aritmética das tensões, como determinante da tensão de referência, durante os testes. Além destas dificuldades, soma-se àquelas causadas pelas reflexões do feixe luminoso no flanco da rosca (fig. 6.11), que deformam a curva característica (fig. 6.10).

Para utilizar o ponto de inflexão da curva, como fator determinante da tensão de referência, é necessário uma placa A/D rápida e suficientemente sensível para determinar a posição deste ponto. A placa A/D disponível no LABMETRO (12 bits) era suficientemente rápida (33 kHz) mas não fornecia uma resolução adequada (que seria obtida com um A/D de, no mínimo, 16 bits). Os voltmetros disponíveis têm uma resolução adequada (μV) porém não eram suficientemente rápidos (só 100 Hz).

Mesmo que fosse possível determinar a tensão de referência, como, por exemplo, pelo processo apresentado na figura 6.5, haveria um outro problema a ser enfrentado. Nas roscas a tensão de referência varia de acordo com a posição do flanco que está sendo medida (ver figura 6.7). Verifica-se pela tabela da citada figura que:

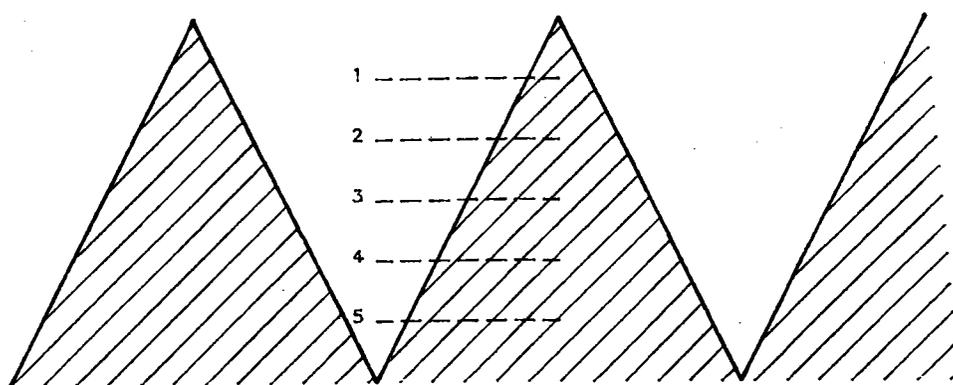
- a) quando a posição dos pontos, cujas coordenadas estão sendo adquiridas, se aproxima da raiz do filete a curva característica se achata;
- b) a tensão de referência (representada pela média) apresenta um máximo no centro do filete e valores praticamente idênticos para posições equidistantes dos extremos.

6.2.4. Características metrológicas do sistema de medição com transdutor optoeletrônico cujo sensor tem uma superfície ativa

a) Repetibilidade

A repetibilidade pode ser determinada de várias maneiras, como por exemplo: igual ao desvio padrão; igual a maior diferença entre leituras; igual a três vezes o desvio padrão,

e outras formas semelhantes /46/. O critério mais adotado é



POSIÇÃO	TENSÃO [V]		
	MÁXIMA	MÍNIMA	MÉDIA
1	7,174	~ 0,30	~ 3,737
2	7,175	~ 0,33	~ 3,752
3	7,165	~ 0,36	~ 3,762
4	7,132	~ 0,37	~ 3,751
5	7,097	~ 0,38	~ 3,738

Figura 6.7. Tabela da variação da tensão gerada pelo fotodetector em função da posição do levantamento no filete de uma rosca M22X2,5.

o desvio padrão. Como as leituras são muito repetitivas o desvio padrão é muito pequeno e por tal motivo deixou de ser tecnicamente representativo para a repetibilidade. Por esta razão a repetibilidade, utilizada para avaliar o sistema de medição com este transdutor, foi considerada como

sendo a média aritmética das diferenças máximas entre 10 repetições das leituras das posições de todos os flancos de um calibrador roscado (ver figura 6.8). A repetibilidade depende, também, da velocidade de deslocamento da mesa, como pode ser constatado pela curva experimental, apresentada na figura 6.9. A forma da curva, com um mínimo, se justifica pelos seguintes motivos:

- quando a velocidade de deslocamento da mesa aumenta, o tempo gasto pelo programa para identificar a chegada do "trigger" (o "loop" que verifica se chegou o sinal conforme um tempo de 16 μ s) passa a ser significativo. Com isto, para uma das leituras, pode acontecer que o "trigger" seja identificado logo após a sua chegada e, em outra leitura, o sinal só é identificado, depois de algum tempo durante o qual a mesa continuou a se deslocar. Deste modo as leituras para um mesmo flanco poderão ser diferentes. Teoricamente, a velocidade máxima para a qual não haverá perda de um algarismo na leitura corresponde a:

$$\text{velocidade} = \frac{\text{metade do incremento digital}}{\text{tempo consumido pelo "loop"}} = \frac{0,05 \mu\text{m}}{16 \mu\text{s}} =$$

$$\text{velocidade} = 3,1 \text{ mm/s}$$

- quando a velocidade da mesa diminua, abaixo de um determinado valor, o motor disponível passa a não entregar uma potência suficiente para manter uniforme a velocidade da mesa. Isto acontece porque a velocidade do motor é função da tensão aplicada ao mesmo. Para estas condições, a mesa

se desloca em movimentos "stick-slip" e as leituras, para um mesmo flanco, resultam diferentes umas das outras. Em tais condições, o valor da repetibilidade aumenta na medida em que a velocidade diminua.

Posicoes :						
1	5.2039 12.7061	6.2471 13.7495	7.7059 15.2067	8.7484 16.2505	10.2058 17.7072	11.2488 18.7548
2	5.2038 12.7061	6.2471 13.7495	7.7059 15.2067	8.7483 16.2504	10.2059 17.7072	11.2489 18.7548
3	5.2039 12.7060	6.2470 13.7495	7.7059 15.2066	8.7483 16.2505	10.2059 17.7072	11.2489 18.7548
4	5.2039 12.7060	6.2471 13.7495	7.7060 15.2066	8.7484 16.2505	10.2058 17.7072	11.2488 18.7547
5	5.2039 12.7061	6.2471 13.7496	7.7058 15.2066	8.7483 16.2505	10.2058 17.7071	11.2488 18.7548
6	5.2038 12.7061	6.2471 13.7495	7.7059 15.2066	8.7484 16.2505	10.2059 17.7071	11.2488 18.7547
7	5.2038 12.7060	6.2471 13.7496	7.7059 15.2066	8.7483 16.2505	10.2058 17.7071	11.2488 18.7547
8	5.2039 12.7061	6.2470 13.7495	7.7059 15.2066	8.7485 16.2505	10.2058 17.7071	11.2488 18.7547
9	5.2038 12.7060	6.2471 13.7495	7.7058 15.2066	8.7484 16.2505	10.2057 17.7071	11.2488 18.7547
10	5.2038 12.7060	6.2471 13.7495	7.7059 15.2065	8.7483 16.2505	10.2059 17.7071	11.2489 18.7546
Diferencas :						
	0.0001	0.0001	0.0002	0.0001	0.0002	0.0001
	0.0001	0.0001	0.0002	0.0001	0.0001	0.0002
Media das diferencas = 0.00013						

Figura 6.8 Tabela da repetibilidade das leituras das abcissas de um ponto de cada flanco de um calibrador roscado M22 X 2,5. Repetibilidade = média das diferenças.

Para uma maior segurança e por considerar o fato de que a velocidade de deslocamento da mesa é, na realidade, média, foi adotada a velocidade de 2 mm/s para todos os experimentos. Para as condições definidas ($v = 2$ mm/s), a repetibi-

lidade (média das diferenças) é menor do que $0,2 \mu\text{m}$ [figuras 6.8 ($0,13 \mu\text{m}$) e 6.9 ($0,17 \mu\text{m}$)] e o desvio padrão médio, das 10 leituras de abscissas de um ponto de todos os flancos da rosca, é bem menor que $0,1 \mu\text{m}$.

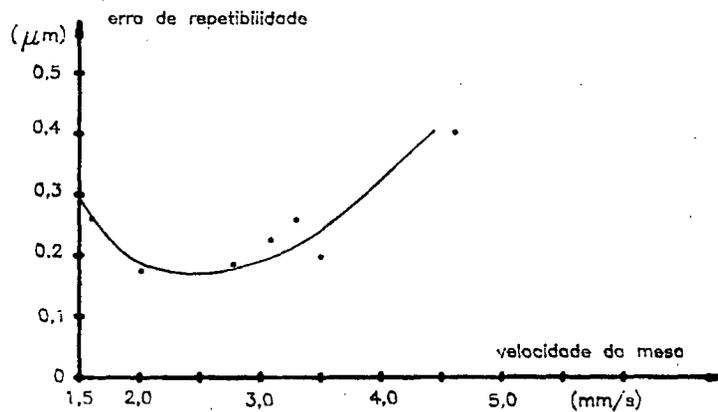


Figura 6.9 Relação entre a repetibilidade e a velocidade de deslocamento da mesa; os pontos correspondem aos dados obtidos experimentalmente e a curva indica a tendência natural dos mesmos.

b) Histerese

Para a velocidade de 2 mm/s , a histerese /45/ para o flanco do lado direito de um filete é de $0,2 \mu\text{m}$ e para o do lado esquerdo é de $0,8 \mu\text{m}$. Estas diferenças serão analisadas em conjunto, para todas características, no item 6.2.5.

c) Sensibilidade

Igualmente para a velocidade de 2 mm/s , a sensibilidade do sensor /69/, na posição da curva característica correspon-

dente a tensão de referência, para o flanco do lado direito de um filete, é de $65 \text{ mV}/\mu\text{m}$ e para o flanco do lado esquerdo é de $55 \text{ mV}/\mu\text{m}$. As diferenças serão analisadas no item 6.2.5.

d) Erro de não linearidade independente

O erro de não linearidade independente /69/ para posições próximas a tensão de referência ($\pm 0,2 \text{ V}$) foi determinado como sendo igual a $0,3 \mu\text{m}$.

6.2.5 Comparação da curva característica teórica com a real

Comparando-se as duas curvas (fig. 6.4.b com fig. 6.10), nota-se de imediato um significativo aumento no valor da tensão na parte superior da curva real. A este aumento de tensão convencionou-se chamar de "sobrepassagem". O aparecimento da "sobrepassagem" deve-se, principalmente, às reflexões do raio luminoso no flanco do filete e, também, às dispersões da luz /70,71/. Esta "sobrepassagem" acontece, quando a sombra está entrando ou saindo do fotodetector e os raios refletidos no flanco do filete somam-se àqueles que passam junto ao flanco, tangenciando-o, e atingem juntos a superfície ativa do sensor, (fig. 6.11). Com a superposição haverá um acréscimo de energia sobre o fotodetector, nestas posições, originando a "sobrepassagem".

Constata-se, ainda, a presença de um "ruído", sobre o sinal gerado pelo fotodetector, convertido em tensão e amplificado, com amplitude de aproximadamente 15 mV .

A inclinação da curva característica teórica (sensibilidade do

sensor) é bastante superior à sensibilidade da curva real. Esta diferença deve-se ao fato de que o limite sombra/luz gerado pelo módulo óptico é difuso (fig. 6.12.b) devido, principalmente, a difração da luz no flanco da rosca /72/ e não abrupto como seria desejável (fig. 6.12.a).

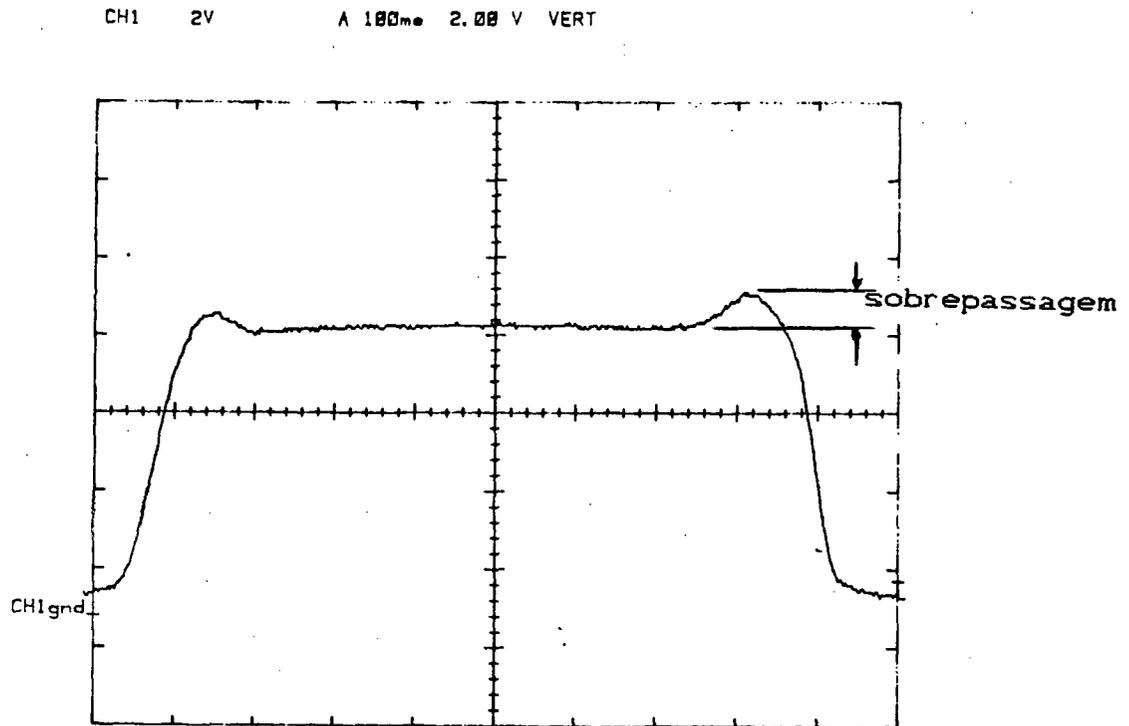


Figura 6.10 Curva característica real dos flancos de um filete de um calibrador roscado M22 X 2,5.

Com relação ao problema de que as características metrológicas são diferentes para os dois flancos do filete da rosca, constata-se que o mesmo é devido ao fato de que um dos flancos apresenta, à projeção, uma superfície côncava e o outro uma superfície convexa. Conseqüentemente, as curvas características da figura 6.12.b. são diferentes para os dois casos, sendo que a curva referente à superfície convexa está mais próxima do eixo vertical do que a outra. Também com relação as reflexões, o fato de uma superfície se apresentar côncava e a

outra convexa influi sobre a curva característica real. Em função deste fato, nota-se na figura 6.10, que a "sobrepassagem" de um dos flancos é diferente da "sobrepassagem" do outro flanco. É lógico que, neste caso, a superfície côncava concentra mais as reflexões sobre o fotodetector do que a superfície convexa e, conseqüentemente, apresenta uma maior "sobrepassagem".

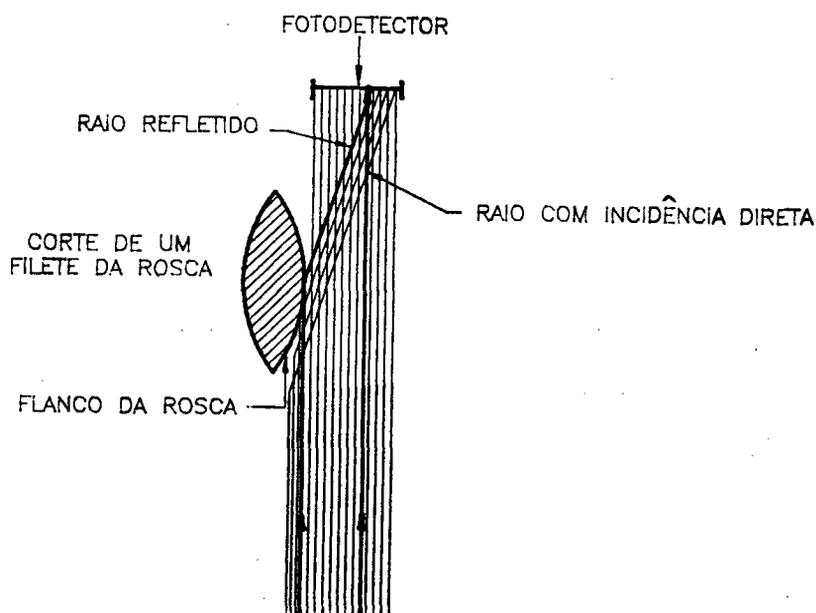


Figura 6.11 Superposição, sobre o fotodetector, de raios refletidos no flanco da rosca com raios que incidem diretamente.

6.2.6 Conclusão

As características metrológicas deste tipo de fotodetector variam dependendo da forma da superfície na qual está o ponto cujas coordenadas se deseja obter, como foi demonstrado no item anterior. Quanto mais convexa for a superfície melhor serão as suas características metrológicas.

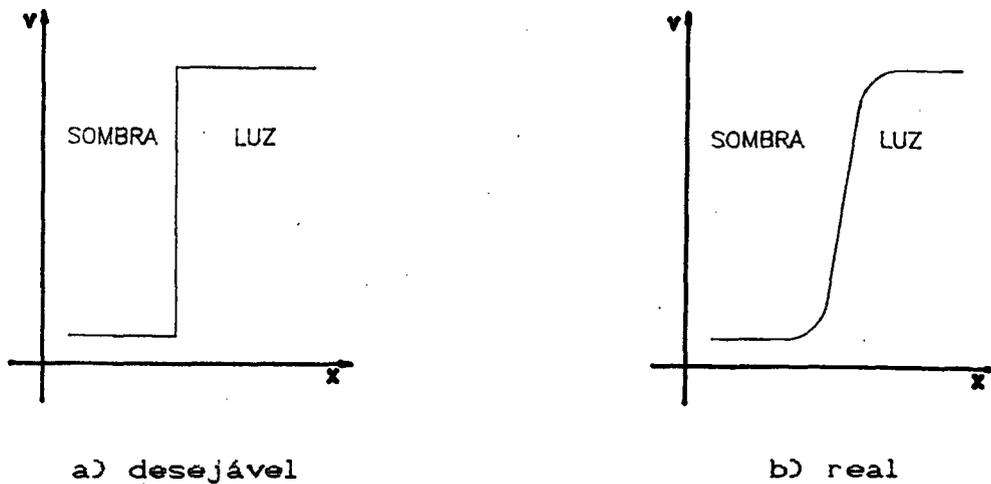


Figura 6.12 Limite sombra/luz da imagem que incide sobre o fotodetector para a condição de um sensor pontual adimensional /70/.

As dificuldades na determinação da tensão de referência tornam problemática a utilização deste tipo de fotodetector, para medições de precisão, visto que o erro, quando da determinação da posição de um ponto, é maior que o desejável.

6.3 TRANSDUTOR OPTOELETRÔNICO CUJO SENSOR TEM MAIS DE UMA SUPERFÍCIE ATIVA

Como os estudos e ensaios realizados demonstraram a inadequação da utilização do fotodetector com uma única superfície ativa, como sensor para a medição de roscas de precisão, passou-se ao estudo de fotodetectores com mais superfícies ativas pois os mesmos permitem a detecção do limite sombra/luz

sem necessidade da determinação do valor da tensão de referência. Dentre os fotodetectores que estavam comercialmente disponíveis na oportunidade, optou-se pelo emprego do fotodetector de quadrantes (fig. 6.13).

6.3.1 Fotodetector de quadrantes

Optou-se pela aquisição de um fotodetector de quadrantes, dado que as limitações, decorrentes desta solução, não o inviabilizam para a medição de roscas externas de precisão, normalizadas e de perfil simétrico.

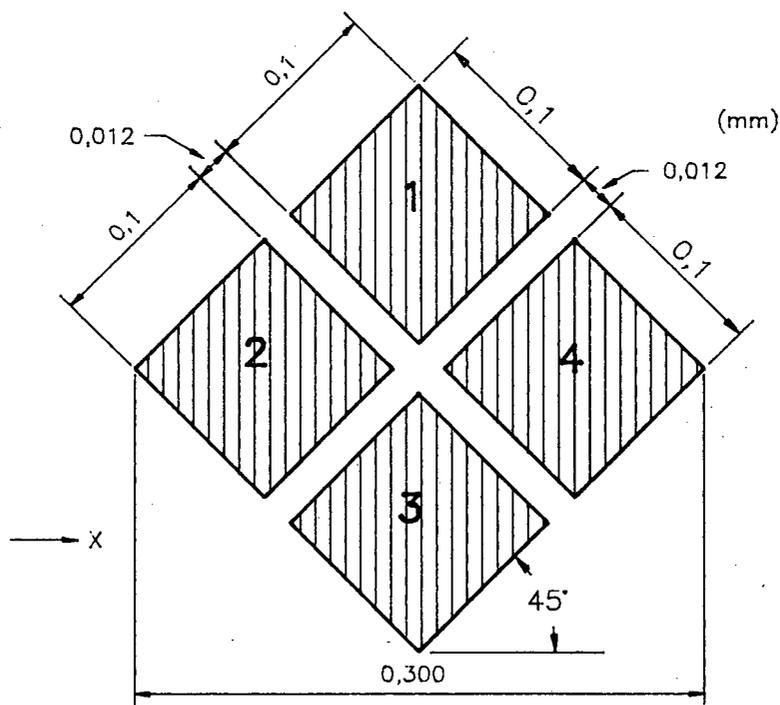


Figura 6.13. Forma e dimensões do fotodetector de quadrantes SFH 204 /73/.

O sensor utilizado foi um foto-diodo de silício, de quadrantes (fig. 6.13.), com sensibilidade de 0,13 nA/lx e dimensões de 0,1 X 0,1 mm em cada quadrante /73/. O sinal produzido em

cada quadrante é conduzido até um circuito eletrônico com o objetivo de gerar um "trigger".

6.3.2 Circuito eletrônico do transdutor

O circuito eletrônico foi desenvolvido com o objetivo de gerar um "trigger" em função do sinal produzido por um fotodetector de quadrantes. Inicialmente, o sinal recebido de cada quadrante do fotodetector é convertido em tensão, amplificado e tratado de acordo com equação 6.15. De acordo com a referida equação as tensões geradas por quadrantes opostos são somadas duas a duas, sendo que a diferença dos resultados destas somas fornece um sinal de tensão (1 da fig. 6.14.) que cruza a referência de tensão zero, quando metade do sensor está iluminado (condição desejada).

$$V = (V_2 + V_4) - (V_1 + V_3) \quad (6.15)$$

sendo V_i = tensão gerada pelo quadrante i

A forma da curva do sinal (1) corresponde à forma da segunda derivada da curva (fig. 6.4.b) que representa o sinal gerado por um fotodetector com uma superfície ativa. Este sinal, pelas razões já apresentadas, é um sinal que permite uma precisa identificação da posição em que deve ser realizada a aquisição do valor das coordenadas do ponto.

Quando da passagem por zero deste sinal (1), deseja-se fornecer um "trigger" que ative a rotina de leitura das coordenadas

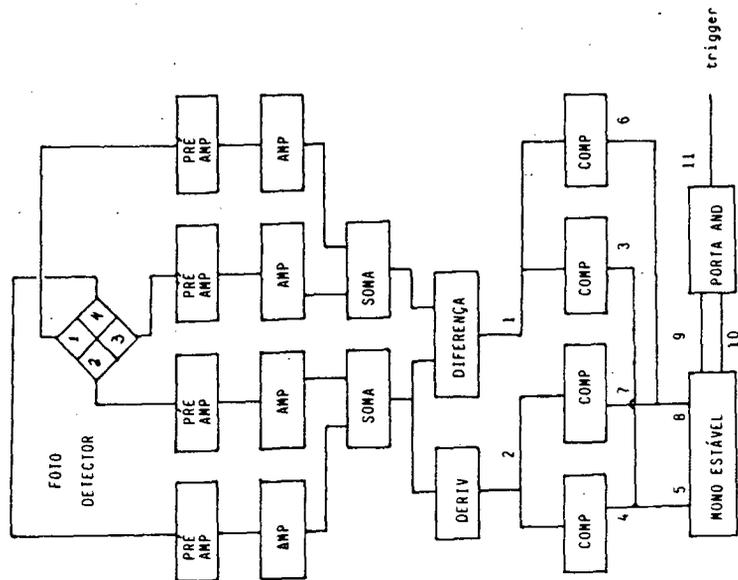
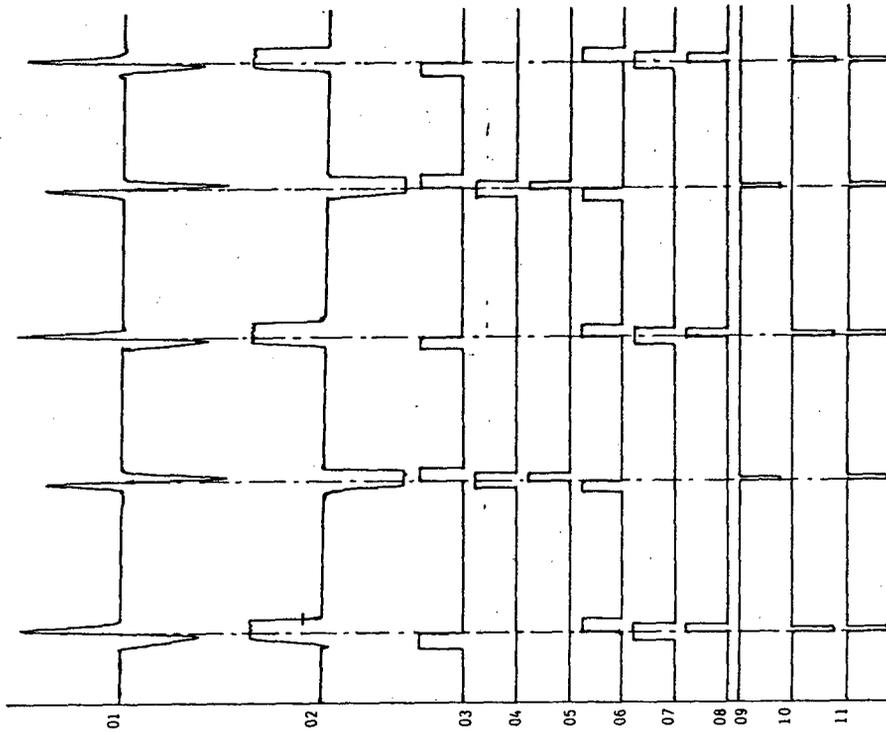


Figura 6.14 Transdutor com sensor de quadrantes: esquema das unidades do circuito eletrônico; suas ligações e formas do sinal.

do ponto no microcomputador. Para a obtenção deste "trigger", inicialmente, deriva-se o sinal de uma das somas, por exemplo $(V_2 + V_4)$, criando o sinal (2). Com base neste sinal, por intermédio de comparadores, abre-se as duas "janelas" (4) e (7). Tendo como base o sinal (1), através de comparadores, abrem-se outras janelas (3) e (6), quando da passagem do sinal base (1) por zero. Pela união dos sinais (3) e (4) surge o sinal (5) e pela união dos sinais (6) e (7) surge o sinal (8). Os sinais (5) e (8) são dirigidos a mono-estáveis, que geram os "triggers" (9) e (10) que são somados numa porta "and" e resultam no sinal de saída (11) do transdutor optoeletrônico.

6.3.3 Função característica do sinal gerado pelo sensor

Para a dedução da função característica teórica serão adotadas as seguintes hipóteses simplificativas:

- a) a intensidade luminosa gerada pela fonte de luz distribui-se, uniformemente, sobre toda superfície ativa do fotodetector. O erro gerado pela não uniformidade de distribuição da intensidade luminosa pode ser desprezado dado que a lâmpada é alimentada por uma fonte estabilizada e o diâmetro do feixe luminoso, que incide sobre o fotodetector, é pequeno (0,1 mm):

$$\frac{\text{diagonal do fotodetector}}{\text{aumento}} = \frac{0,30}{3} = 0,10 \text{ mm};$$

Além deste fato, os testes de estabilidade da tensão gerada, realizados com o sensor plenamente iluminado durante uma hora, forneceram um desvio padrão de somente 2mV para uma tensão de ≈ 10 V.

- b) a sensibilidade à luz, por unidade de área, é constante ao longo de toda superfície ativa do fotodetector. Esta hipótese se justifica pelo fato de que o fotodetector é formado por quatro superfícies idênticas, sendo todas elas constituídas do mesmo material base, sensível à luz. Este sensor, de acordo com informações do fabricante, é de precisão e indicado para usos em metrologia.
- c) a corrente de campo escuro é nula. Esta simplificação tem como finalidade única deslocar a posição da curva teórica de modo que a mesma inicie em zero.

Com base nas hipóteses acima, pode-se afirmar, analogamente ao fotodetector com uma única superfície ativa, que:

$$U = S_b \cdot A \quad (6.1)$$

Como a curva característica não é contínua (fig. 6.17), dado que o sensor possui quatro superfícies independentes, a sua equação será deduzida por partes.

A partir da figura 6.15. obtém-se:

a) para x variando entre x_0 e x_1 :

$$U_1 = S_b \cdot A_1$$

$$A_1 = \frac{\overline{AB'} \cdot \overline{AH'}}{2} ; \quad (6.16)$$

sendo:

B' = posição do limite sombra/luz entre os pontos A e B;

H' = posição do limite sombra/luz entre os pontos A e H.

OBS: O sinal ' será colocado na letra que representa o pon-

to móvel da aresta em consideração; o mesmo critério será adotado na dedução das outras partes da função.

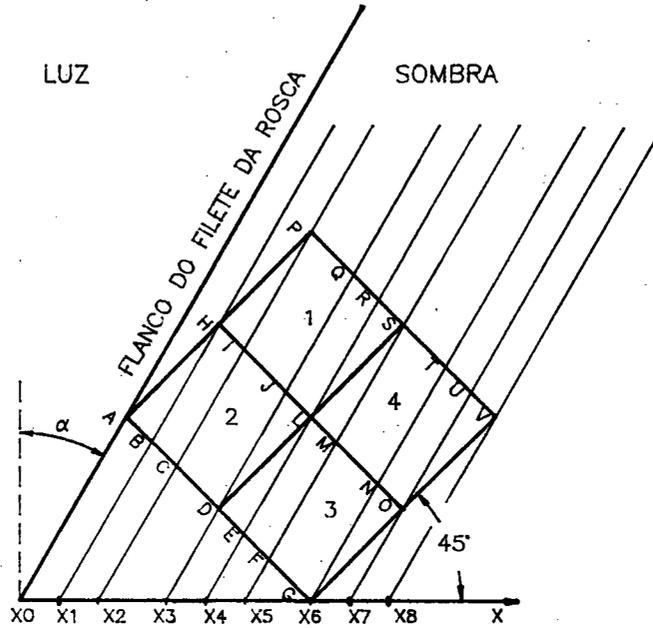


Figura 6.15. Posições relativas entre o limite sombra/luz e o fotodetector de quadrantes.

De acordo com a lei dos senos para o triângulo (AB'x₀) obtém-se:

$$\frac{\overline{AB'}}{\text{sen}(90 - \alpha)} = \frac{x}{\text{sen}(90 + \alpha - 45)} \quad \therefore$$

$$\overline{AB'} = \frac{\text{sen}(90 - \alpha) \cdot x}{\text{sen}(45 + \alpha)} = \frac{\cos \alpha \cdot x}{\text{sen}(45 + \alpha)}$$

Para o triângulo (AH'x₁') obtém-se:

$$\frac{\overline{AH'}}{\text{sen}(90 + \alpha)} = \frac{x}{\text{sen}(45 - \alpha)} \quad \therefore$$

$$\overline{AH}' = \frac{\text{sen } (90 + \alpha) \cdot x}{\text{sen } (45 - \alpha)} = \frac{\cos \alpha \cdot x}{\text{sen } (45 - \alpha)} \quad (6.17)$$

substituindo o valor de \overline{AB}' e \overline{AH}' em 6.16 resulta:

$$A_1 = \frac{\cos^2 \alpha \cdot x^2}{2 \cdot \text{sen } (45 + \alpha) \cdot \text{sen } (45 - \alpha)} =$$

$$A_1 = \frac{\cos^2 \alpha \cdot x^2}{\cos^2 \alpha - \text{sen}^2 \alpha} \quad (6.18)$$

Quando $\overline{AH}' = \overline{AH} = l$ (lado de cada quadrante) resulta a partir de 6.17:

$$x = \frac{l \cdot \text{sen } (45 - \alpha)}{\cos \alpha} = \frac{\sqrt{2} \cdot l \cdot (\cos \alpha - \text{sen } \alpha)}{2 \cdot \cos \alpha}$$

portanto substituindo este valor de x em 6.18 e fatorando tem-se:

$$\text{máx. } A_1 = \frac{l^2 \cdot (\cos \alpha - \text{sen } \alpha)}{2 \cdot (\cos \alpha + \text{sen } \alpha)} \quad (6.19)$$

Para as condições específicas do experimento ($\alpha = 30^\circ$ e lado de cada quadrante = 0,1 mm) obtém-se para a expressão 6.18:

$$A_1 = \frac{3}{2} x^2 \quad (6.20)$$

logo:

$$\boxed{U_1 = \frac{3}{2} S_b \cdot x^2} \quad (6.21)$$

Quando $x = x_1$, $\overline{AH} = 0,1$ mm, logo $x = 0,0299$ mm; com estes valores, obtém-se:

$$\text{máx. } A_1 = 0,00134 \text{ mm}^2 \quad (6.22)$$

b) para x variando entre x_1 e x_2 :

$$U_2 = \left[\text{máx. } A_1 + (\overline{BH} \cdot h) - \left(\frac{HI' \cdot HP'}{2} \right) \right] \cdot S_0 \quad (6.23)$$

onde h é a altura do losângulo $(BC'I'H)$ com base \overline{BH} ; deste modo e de acordo com a figura 6.15:

$$\overline{BH} = \frac{l}{\cos(45 - \alpha)}$$

$$h = (x - x_1) \cdot \cos \alpha$$

$$\overline{BH} \cdot h = \frac{l \cdot (x - x_1) \cdot \cos \alpha}{\cos(45 - \alpha)} \quad (6.24)$$

e analogamente a A_1 :

$$\frac{HI' \cdot HP'}{2} = \frac{\cos^2 \alpha \cdot (x - x_1)^2}{\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha} \quad \text{logo:}$$

$$A_2 = \frac{l \cdot (\cos \alpha - \sin \alpha)}{2 \cdot (\cos \alpha + \sin \alpha)} + \frac{l \cdot (x - x_1) \cdot \cos \alpha}{\cos(45 - \alpha)} - \frac{\cos^2 \alpha \cdot (x - x_1)^2}{\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha} \quad (6.25)$$

Quando $\overline{HP'} = \overline{HP} = l$; resulta:

$$(x - x_1) = \frac{\sqrt{2} \cdot l \cdot (\cos \alpha - \sin \alpha)}{2 \cdot \cos \alpha} \quad (6.26)$$

Substituindo 6.26 em 6.25 e fatorando obtém-se:

$$\text{máx. } A_2 = \frac{l^2 \cdot (\cos \alpha - \sin \alpha)}{2 \cdot (\cos \alpha + \sin \alpha)} - \frac{l^2 \cdot (\cos \alpha - \sin \alpha)}{2 \cdot (\cos \alpha + \sin \alpha)} + \frac{l^2 \cdot (\cos \alpha - \sin \alpha)}{\cos \alpha + \sin \alpha} =$$

$$\text{máx } A_2 = \frac{l^2 \cdot (\cos \alpha - \sin \alpha)}{\cos \alpha + \sin \alpha} \quad (6.27)$$

Para as condições específicas do experimento resulta:

$$A_2 = 0,00134 + 0,08963 (x - x_1) - \frac{3}{2} (x - x_1)^2$$

$$U_2 = \left[0,00134 + 0,08963 (x - x_1) - \frac{3}{2} (x - x_1)^2 \right] \cdot S_b \quad (6.28)$$

$$\text{máx. } A_2 = 0,00268 \text{ mm}^2 \quad (6.29)$$

c) para x variando entre x_2 e x_3 :

O valor de U_3 é constante e independe de x , pois todo o acréscimo de área em (2) corresponde a um decréscimo de igual valor em (1).

$$U_3 = \text{máx. } A_2 \cdot S_b$$

$$U_3 = \frac{l^2 \cdot (\cos \alpha - \text{sen } \alpha)}{\cos \alpha + \text{sen } \alpha} \cdot S_b$$

Para as condições experimentais:

$$U_3 = 0,00268 S_b$$

(6.30)

d) para x variando entre x_3 e x_4 :

$$U_4 = \left[\text{máx } A_2 + S' - \overline{JQ} \cdot h_4 - \frac{\overline{DL'} \cdot \overline{DE'}}{2} \right] \cdot S_b$$

onde de acordo com a figura 6.16:

$$S' = \frac{\overline{DL} \cdot \overline{JL}}{2} - \frac{\overline{D'L} \cdot \overline{LL'}}{2}$$

sendo:

$$\overline{DL} = l;$$

$$\overline{JL} = l \cdot \tan(45 - \alpha) = l \cdot \frac{\cos \alpha - \sin \alpha}{\cos \alpha + \sin \alpha};$$

$$\overline{D'L} = \overline{DL} - \overline{DD'};$$

$$\frac{\overline{DD'}}{\sin(90 + \alpha)} = \frac{(x - x_3)}{\sin(45 - \alpha)}$$

$$\overline{DD'} = \frac{\sqrt{2} \cdot \cos \alpha}{\cos \alpha - \sin \alpha} (x - x_3)$$

$$\overline{LL'} = \overline{JL} - \overline{JL'};$$

$$\overline{JL'} = \frac{(x - x_3) \cdot \cos \alpha}{\sin(45 + \alpha)} = \frac{\sqrt{2} \cdot (x - x_3) \cdot \cos \alpha}{\cos \alpha + \sin \alpha};$$

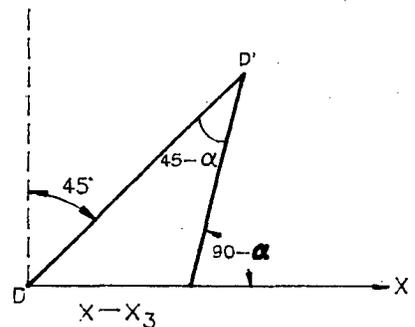
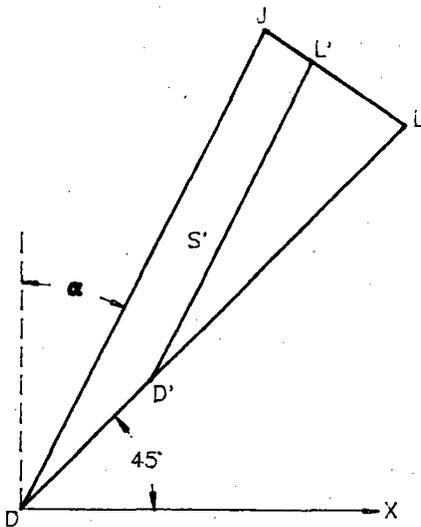


Figura 6.16. Triângulo auxiliar, obtido da figura 6.15. para a determinação da superfície S'

$$S' = \left[\frac{\sqrt{2} \cdot l \cdot \cos \alpha}{(\cos \alpha + \sin \alpha)} \right] (x - x_3) - \left[\frac{\cos^2 \alpha}{\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha} \right] (x - x_3)^2 \quad (6.31)$$

$$\overline{JQ} = \frac{\sqrt{2} \cdot l}{\cos \alpha + \sin \alpha}$$

$$h_4 = (x - x_3) \cdot \cos \alpha$$

Analogamente, de acordo com 6.16 obtém-se:

$$\frac{\overline{DL}' \cdot \overline{DE}'}{2} = \frac{\cos^2 \alpha \cdot (x - x_3)^2}{\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha}$$

$$\begin{aligned}
 A_4 &= \frac{l^2 \cdot (\cos \alpha - \sin \alpha)}{\cos \alpha + \sin \alpha} + \\
 &+ \left[\frac{\sqrt{2} \cdot l \cdot \cos \alpha}{(\cos \alpha + \sin \alpha)} \right] (x - x_3) - \\
 &- \left[\frac{\cos^2 \alpha}{\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha} \right] (x - x_3)^2 - \\
 &- \frac{\sqrt{2} \cdot l \cdot \cos \alpha \cdot (x - x_3)}{\cos \alpha + \sin \alpha} - \frac{\cos^2 \alpha \cdot (x - x_3)^2}{\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha} \\
 A_4 &= \frac{l^2 \cdot (\cos \alpha - \sin \alpha)}{\cos \alpha + \sin \alpha} - \\
 &- \left[\frac{2 \cdot \cos^2 \alpha}{\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha} \right] (x - x_3)^2 \tag{6.32}
 \end{aligned}$$

Quando $x = x_4$, $\overline{JL} = \overline{JL}'$, portanto:

$$l \cdot \frac{\cos \alpha - \sin \alpha}{\cos \alpha + \sin \alpha} = \frac{\sqrt{2} \cdot (x - x_3) \cdot \cos \alpha}{\cos \alpha + \sin \alpha}$$

$$(x - x_3) = \frac{\sqrt{2} \cdot l \cdot (\cos \alpha - \sin \alpha)}{2 \cdot \cos \alpha} \tag{6.33}$$

Substituindo 6.33 em 6.32 resulta:

$$\text{máx. } A_4 = \frac{l^2 \cdot (\cos \alpha - \sin \alpha)}{\cos \alpha + \sin \alpha} - \frac{l^2 \cdot (\cos \alpha - \sin \alpha)}{\cos \alpha + \sin \alpha}$$

Como era esperado, ocorre uma passagem por zero, máx. $A_4 = 0$, conseqüentemente, não é um máximo e sim um mínimo:

$$\text{mín. } A_4 = 0.$$

Para as condições específicas do experimento, resulta:

$$A_4 = 0,00268 - 3 (x - x_3)^2$$

$$U_4 = [0,00268 - 3 (x - x_3)^2] \cdot S_b \quad (6.34)$$

e) para x variando entre x_4 e x_5 obtém-se:

$$U_5 = \left[\text{mín. } A_4 + \frac{\overline{LS}' \cdot \overline{LM}'}{2} - S'' - \overline{LE} \cdot h_5 \right] \cdot S_b$$

Analogamente aos itens anteriores resulta:

$$\frac{\overline{LS}' \cdot \overline{LM}'}{2} = \frac{\cos^2 \alpha \cdot (x - x_4)^2}{\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha}$$

$$S'' = \left[\frac{\sqrt{2} \cdot l \cdot \cos \alpha}{(\cos \alpha + \sin \alpha)} \right] (x - x_4) - \left[\frac{\cos^2 \alpha}{\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha} \right] (x - x_4)^2$$

$$\overline{LE} \cdot h_5 = \frac{\sqrt{2} \cdot l \cdot \cos \alpha \cdot (x - x_4)}{\cos \alpha + \sin \alpha}$$

$$A_5 = \frac{\cos^2 \alpha \cdot (x - x_4)^2}{\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha} - \left[\frac{\sqrt{2} \cdot l \cdot \cos \alpha}{(\cos \alpha + \sin \alpha)} \right] (x - x_4) + \left[\frac{\cos^2 \alpha}{\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha} \right] (x - x_4)^2 - \frac{\sqrt{2} \cdot l \cdot \cos \alpha \cdot (x - x_4)}{\cos \alpha + \sin \alpha}$$

$$A_5 = \left[\frac{2 \cdot \cos^2 \alpha}{\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha} \right] (x - x_4)^2 - \left[\frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot l \cdot \cos \alpha}{\cos \alpha + \sin \alpha} \right] (x - x_4) \quad (6.35)$$

Quando $x = x_5$, $\overline{LS}' = l$ e pode-se afirmar:

$$l = \frac{\sqrt{2} \cos \alpha \cdot (x - x_4)}{\cos \alpha - \sin \alpha} \quad \text{logo:}$$

$$(x - x_4) = \frac{\sqrt{2} \cdot l \cdot (\cos \alpha - \sin \alpha)}{2 \cdot \cos \alpha}$$

Substituindo o valor de $(x - x_4)$ na expressão 6.35 obtém-se:

$$\begin{aligned} \text{mín. } A_5 &= \frac{l^2 \cdot (\cos \alpha - \sin \alpha)}{\cos \alpha + \sin \alpha} - \\ &- \frac{2 \cdot l^2 \cdot (\cos \alpha - \sin \alpha)}{\cos \alpha + \sin \alpha} \end{aligned}$$

$$\text{mín. } A_5 = - \frac{l^2 \cdot (\cos \alpha - \sin \alpha)}{\cos \alpha + \sin \alpha} \quad (6.36)$$

Para as condições específicas do experimento resulta:

$$A_5 = 3 (x - x_4)^2 - 0,17932 (x - x_4) \quad \text{logo:}$$

$$U_5 = [3 (x - x_4)^2 - 0,17932 (x - x_4)] \cdot S_b \quad (6.37)$$

f) Para x variando entre x_5 e x_6 obtém-se:

O valor de U_6 é constante e independe de x , pois todo o acréscimo de área no quadrante (4) corresponde a um decréscimo de igual valor no quadrante (3), por definição.

$$U_6 = A_6 \cdot S_b = \text{mín. } A_5 \cdot S_b$$

$$A_6 = - \frac{l^2 \cdot (\cos \alpha - \sin \alpha)}{\cos \alpha + \sin \alpha}$$

logo:

$$U_6 = \left[- \frac{l^2 \cdot (\cos \alpha - \sin \alpha)}{\cos \alpha + \sin \alpha} \right] \cdot S_b$$

Para as condições experimentais obtém-se:

$$\boxed{U_6 = - 0,00268 \cdot S_6} \quad (6.38)$$

g) para x variando entre x_6 e x_7 obtém-se:

$$U_7 = (A_6 + \overline{TN} \cdot h_6 - S''') \cdot S_6 \quad (6.39)$$

Analogamente aos itens anteriores pode-se afirmar que:

$$\overline{TN} = \frac{\sqrt{2} \cdot l}{\cos \alpha + \operatorname{sen} \alpha}$$

$$h_6 = (x - x_6) \cdot \cos \alpha$$

$$S''' = \left[\frac{\sqrt{2} \cdot l \cdot \cos \alpha}{(\cos \alpha + \operatorname{sen} \alpha)} \right] (x - x_6) - \left[\frac{\cos^2 \alpha}{\cos^2 \alpha - \operatorname{sen}^2 \alpha} \right] (x - x_6)^2$$

$$A_7 = - \frac{l^2 \cdot (\cos \alpha - \operatorname{sen} \alpha)}{\cos \alpha + \operatorname{sen} \alpha} + \frac{\sqrt{2} \cdot l \cdot \cos \alpha}{\cos \alpha + \operatorname{sen} \alpha} (x - x_6) - \left[\frac{\sqrt{2} \cdot l \cdot \cos \alpha}{(\cos \alpha + \operatorname{sen} \alpha)} \right] (x - x_6) + \left[\frac{\cos^2 \alpha}{\cos^2 \alpha - \operatorname{sen}^2 \alpha} \right] (x - x_6)^2$$

$$A_7 = - \frac{l^2 \cdot (\cos \alpha - \operatorname{sen} \alpha)}{\cos \alpha + \operatorname{sen} \alpha} + \left[\frac{\cos^2 \alpha}{\cos^2 \alpha - \operatorname{sen}^2 \alpha} \right] (x - x_6)^2 \quad (6.40)$$

Quando $x = x_7$ pode-se determinar que:

$$(x - x_6) = \frac{\sqrt{2} \cdot l \cdot (\cos \alpha - \operatorname{sen} \alpha)}{2 \cdot \cos \alpha}$$

Substituindo o valor de $(x - x_6)$ em 6.40 resulta:

$$\text{máx. } A_7 = - \frac{l^2 \cdot (\cos \alpha - \operatorname{sen} \alpha)}{2 \cdot (\cos \alpha + \operatorname{sen} \alpha)} \quad (6.41)$$

Para as condições específicas do experimento resulta:

$$A_7 = 1,5 (x - x_0)^2 - 0,00268$$

$$U_7 = [1,5 (x - x_0)^2 - 0,00268] \cdot S_b \quad (6.42)$$

g) Para x variando entre x_7 e x_8 o valor de U é:

$$U_8 = [\text{máx. } A_7 + S^v] \cdot S_b$$

$$S^v = \left[\frac{\sqrt{2} \cdot l \cdot \cos \alpha}{(\cos \alpha + \sin \alpha)} \right] (x - x_7) - \left[\frac{\cos^2 \alpha}{\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha} \right] (x - x_7)^2$$

$$A_8 = - \frac{l^2 \cdot (\cos \alpha - \sin \alpha)}{2 \cdot (\cos \alpha + \sin \alpha)} + \left[\frac{\sqrt{2} \cdot l \cdot \cos \alpha}{(\cos \alpha + \sin \alpha)} \right] (x - x_7) - \left[\frac{\cos^2 \alpha}{\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha} \right] (x - x_7)^2$$

Quando $x = x_8$ resulta que:

$$(x - x_7) = \frac{\sqrt{2} \cdot l \cdot (\cos \alpha - \sin \alpha)}{2 \cdot \cos \alpha}$$

$$\begin{aligned} \text{máx. } A_8 = & - \frac{l^2 \cdot (\cos \alpha - \sin \alpha)}{2 \cdot (\cos \alpha + \sin \alpha)} + \\ & + \frac{l \cdot (\cos \alpha - \sin \alpha)}{\cos \alpha + \sin \alpha} - \\ & - \frac{l^2 \cdot (\cos \alpha - \sin \alpha)}{2 \cdot (\cos \alpha + \sin \alpha)} = 0 \end{aligned}$$

máx $A_8 = 0$ como é esperado por definição. Portanto para as condições específicas do experimento obtém-se:

$$A_8 = - 0,00134 + 0,08966 (x - x_7) - 1,5 (x - x_7)^2$$

$$U_g = [- 0,00134 + 0,08966 (x - x_7) - 1,5 (x - x_7)^2] \cdot S_b$$

(6.43)

Para a condição na qual o limite sombra/luz se desloca cobrindo o sensor com a sombra do filete, as funções características são as mesmas, porém com o sinal invertido.

6.3.4 Análise da função da curva característica

A curva da função característica, deduzida no item anterior, é apresentada na figura 6.17. O valor da tensão "U" depende da sensibilidade " S_b ", da abscissa "x" do limite sombra/luz em relação ao fotodetector e do ângulo de flanco " α " da rosca.

$$U = f(S_b, x, \alpha)$$

(6.44)

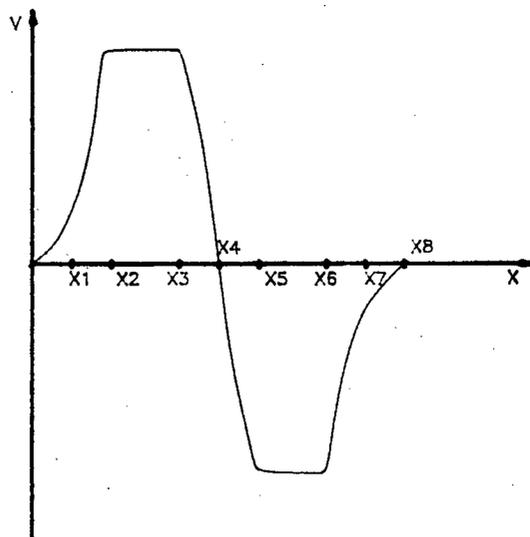


Figura 6.17. Curva característica teórica do fotodetector de quadrantes.

O deslocamento da imagem projetada "x" depende da ampliação que está sendo empregada pela unidade óptica:

$$x = a \cdot x \quad (6.14)$$

onde "a" é igual a ampliação óptica e x é o deslocamento real do flanco da rosca. Quanto maior for a ampliação, maior será a sensibilidade (em V/ μm) do sistema de medição (fig. 6.4 e item 6.3.5). Analogamente ao que foi apresentado para o sensor com uma só superfície ativa, teoricamente o valor de "a" será tanto melhor, quanto maior ele for, pois menor será o diâmetro do apalpador de luz em "contato" com o flanco da rosca. Em contra partida, quanto maior for o valor de "a", maior terá que ser o ganho dos amplificadores, para a obtenção de uma mesma tensão, e, conseqüentemente, maior será o "ruído" do sinal gerado pelo sensor. Durante os experimentos, os melhores resultados foram obtidos com um valor de $a = 3$ vezes, o que determina um diâmetro para o sensor igual a $100 \mu\text{m}$.

As equações deduzidas no item anterior, só valem para " α " compreendido entre $18^\circ 30'$ e 45° , dado que a função é descontínua e que na dedução de cada parte da função estavam definidos quais eram os quadrantes envolvidos (que estariam iluminados). Para ângulos fora deste intervalo, os quadrantes envolvidos, na dedução de cada parte, serão outros, e, portanto, as equações serão diferentes. De um modo geral, pode-se afirmar que para " α " menores, maior será a tensão máxima gerada pelo sensor (máx. U). Assim para um limite sombra/luz ortogonal à direção do deslocamento ($\alpha = 0^\circ$) a tensão máxima gerada é duas vezes e meia maior do que aquela gerada para $\alpha = 30^\circ$. Obviamente, quanto maior o valor de " α " menor o valor da

tensão máxima, até o limite de ser nula quando $\alpha = 45^\circ$. Isto é, um limite sombra/luz, inclinado de 45° em relação à direção do deslocamento não é detectado pelo sensor, uma vez mantido o atual posicionamento do fotodetector. Este problema pode ser solucionado girando o fotodetector de 45° , em relação a posição atual, para obter a melhor orientação relativa à posição do limite sombra/luz.

Pelo intervalo admissível para a variação do ângulo " α ", verifica-se que as expressões deduzidas no item anterior, valem também para a medição de roscas Whitworth.

6.3.5 Características metrológicas do sistema de medição com transdutor optoeletrônico cujo sensor tem mais de uma superfície ativa

As características metrológicas do sistema de medição com transdutor optoeletrônico, cujo sensor tem mais de uma superfície ativa, foram inferiores àquelas obtidas pelo sistema medição com transdutor cujo sensor tem uma só superfície ativa. Estes resultados inferiores foram devidos aos erros originados pela maior complexidade do circuito eletrônico do transdutor para sensor com mais de uma superfície ativa.

a) Repetibilidade

O critério mais adotado para representar a repetibilidade é o desvio padrão /69/. Para as condições definidas ($v = 2$ mm/s), a repetibilidade é de $0,1 \mu\text{m}$ (desvio padrão médio, das 10 leituras de abcissas de um ponto de todos os flancos da rosca, conforme mostra a figura 6.18). Como consequência, a dispersão de medição para um nível de con-

fiabilidade de 95 % ($t = 2,23$) é de $\pm 0,2 \mu\text{m}$.

b) Histerese

Para a velocidade de 2 mm/s, a histerese /44/ para o flanco do lado direito (flanco seguidor) de um filete é de 1,0 μm e para o do lado esquerdo (flanco guia) é de 1,6 μm .

Posições [mm]					
4.7998	6.7440	7.3008	9.2455	9.8013	11.7475
12.3002	14.2488	14.7996	16.7514	17.2990	19.2550
4.7998	6.7441	7.3008	9.2455	9.8014	11.7474
12.3002	14.2490	14.7996	16.7515	17.2990	19.2550
4.7998	6.7442	7.3008	9.2455	9.8013	11.7475
12.3002	14.2488	14.7996	16.7514	17.2990	19.2551
4.7998	6.7440	7.3008	9.2455	9.8013	11.7474
12.3001	14.2488	14.7994	16.7514	17.2990	19.2550
4.7997	6.7440	7.3008	9.2455	9.8012	11.7473
12.3002	14.2488	14.7995	16.7514	17.2989	19.2549
4.7999	6.7439	7.3007	9.2454	9.8012	11.7473
12.3002	14.2488	14.7994	16.7514	17.2989	19.2549
4.7998	6.7439	7.3007	9.2454	9.8013	11.7473
12.3001	14.2488	14.7995	16.7514	17.2989	19.2549
4.7997	6.7440	7.3007	9.2454	9.8012	11.7472
12.3001	14.2488	14.7994	16.7513	17.2989	19.2549
4.7997	6.7440	7.3007	9.2454	9.8012	11.7472
12.3000	14.2488	14.7994	16.7513	17.2988	19.2548
Desvios padrão [μm]					
0.06	0.12	0.05	0.07	0.07	0.10
0.07	0.07	0.09	0.06	0.07	0.08
Desvio-padrão médio = 0.08 μm					

Figura 6.18 Tabela da repetibilidade de um ponto sobre cada flanco de um calibrador M22 X 2,5.

c) Sensibilidade

Igualmente para a velocidade de 2 mm/s, a sensibilidade /69/ para o flanco do lado direito de um filete é de 43 mV/ μm e para o flanco do lado esquerdo é de 32 mV/ μm . A sensibilidade teórica do sistema de medição é muito superior a sensibilidade medida e esta diferença deve-se ao fa-

to de que o limite sombra/luz gerado pela unidade óptica é difuso e não abrupto como seria desejável (fig. 6.11.).

d) Erro de não linearidade independente

O erro de não linearidade independente /69/, para posições próximas a tensão zero ($\pm 0,13$ V), foi determinado como sendo igual a $0,2 \mu\text{m}$.

O fato das características metroológicas apresentarem valores diferentes para os dois flancos do filete da rosca, é devido a fatores que já foram apresentados e analisados no item 6.2.5.

CH1 200mV B A 100ms -313mV VERT

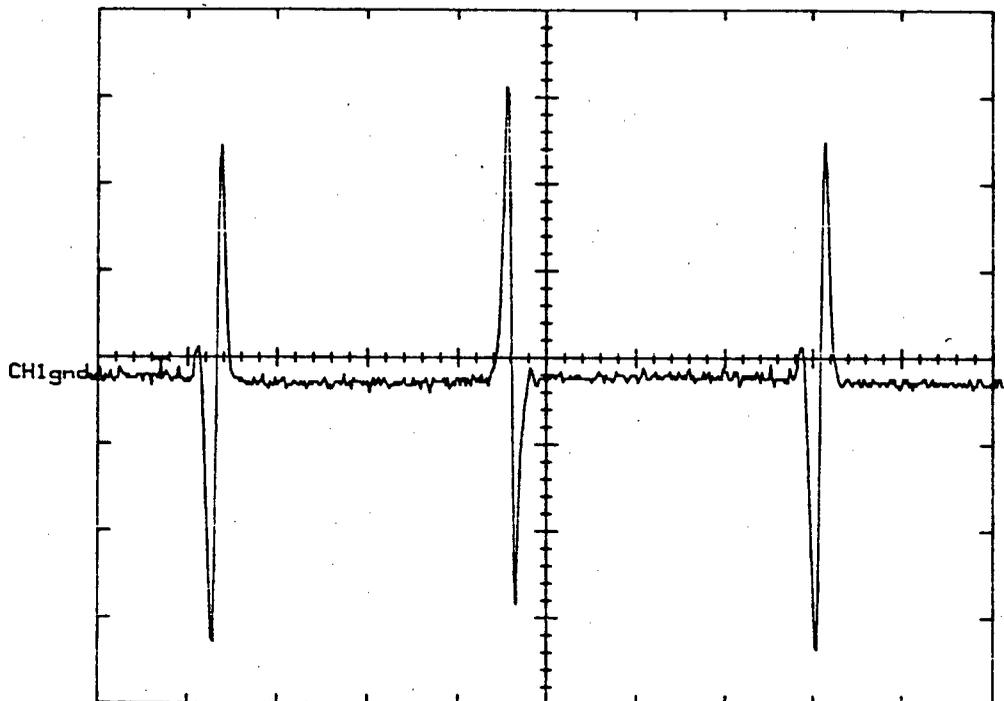


Figura 6.19 Curva característica real dos flancos de um calibrador roscado M42 X 3.

6.3.6 Comparação da curva característica teórica com a real

Neste item serão comparadas a curva característica teórica (fig 6.17) com a curva real (fig. 6.19). Comparando as duas

curvas, nota-se de imediato uma significativa diferença no início ou no fim da curva real. Existe uma elevação do nível de tensão gerada, semelhante àquela que ocorre com o fotodetector circular com uma superfície ativa, apresentada no item 6.2.5, e que convencionou-se chamar de "sobrepassagem". O aparecimento da "sobrepassagem" (mantendo-se este nome) deve-se, principalmente, às reflexões do raio luminoso no flanco da rosca como já foi demonstrado no item 6.2.5. A sobrepassagem ocorre no início da curva característica quando o deslocamento se faz no sentido da sombra cobrir o fotodetector e ocorre no fim no caso inverso.

Constata-se, ainda, a presença de um "ruído" sobre o sinal gerado pela unidade de conversão do sinal de aproximadamente 15 mV.

A diferença entre as amplitudes nas curvas características reais (porção positiva da curva em relação à negativa e flanco direito em relação ao esquerdo) se deve unicamente às reflexões, pois estas diferenças desaparecem quando se elimina as reflexões, como mostra a figura 6.20.

6.3.7 Conclusão

O fotodetector de quadrantes pode ser empregado para a medição das roscas de precisão, normalizada, de perfil simétrico, pois permite definir a posição de passagem do flanco de um filete de rosca com a precisão requerida.

As limitações devido à forma do fotodetector podem ser elimi-

nadas com o emprego de um fotodetector com duas superfícies ativas, sendo uma circular interna e outra anelar externa, ambas com mesma área, de acordo com o apresentado no item a seguir.

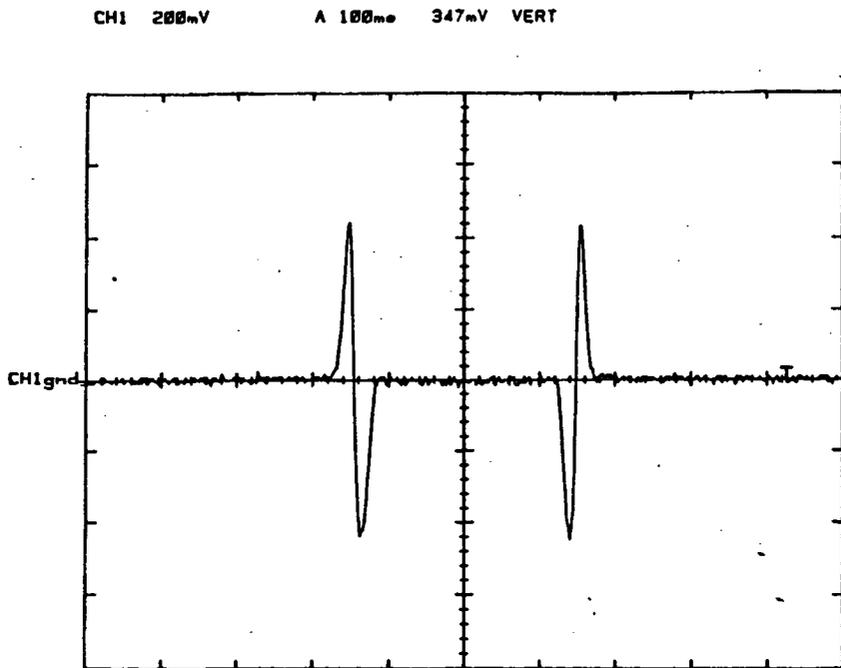
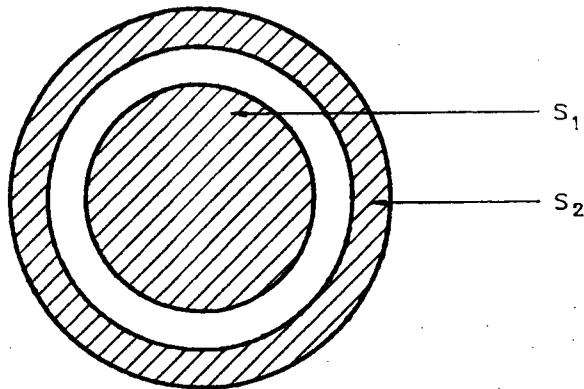


Figura 6.20 Curva característica dos flancos de uma rosca M42 X 3, tornados opacos com fuligem, para o fotodetector de quadrantes.

6.3.8 Fotodetector com a forma ideal

Para um transdutor optoeletrônico, cuja finalidade é a determinação da posição do limite sombra/luz, a melhor solução é a utilização de um sensor, cujo fotodetector é constituído por duas superfícies ativas, de igual área, sendo a central circular e a externa anelar (fig. 6.21). Esta configuração é necessária para facilitar a definição da posição em que deve ser realizada a aquisição de dados. Para definir esta posição é suficiente subtrair o sinal produzido por uma das superfícies

do sinal produzido pela outra, que o resultado cruza a referência zero (terra) sempre que metade do sensor estiver iluminado. Esta passagem por zero é utilizada pelo circuito eletrônico para disparar o sinal ("trigger") que vai acionar a rotina do "software" encarregada de armazenar o valor das coordenadas da posição para uma posterior leitura. A dimensão do fotodetector depende da relação entre o ganho da unidade eletrônica, o ruído gerado por este ganho e o "ruído" produzido pelo deslocamento da mesa do sistema de medição.



$$S_1 = S_2$$

Figura 6.21 Forma ideal das superfícies ativas de um fotodetector para sistemas optoeletrônicos de medição.

6.4 CONSIDERAÇÕES RELATIVAS A DETECÇÃO DOS PONTOS NO FLANCO DA ROSCA COM O TRANSDUTOR DESENVOLVIDO.

Tendo em vista a complexidade da medição de roscas, alguns as-

pectos devem ficar bem definidos, a fim de que o resultado da medição alcance os objetivos pretendidos.

6.4.1 Incerteza do valor da coordenada de um ponto

São dois os parâmetros característicos utilizados para definir a incerteza do valor das coordenadas do ponto. Um desses parâmetros é o erro sistemático que é a diferença entre o valor obtido para a coordenada do ponto e o valor real da coordenada do mesmo ponto. Este erro contempla o erro sistemático da escala mais o erro sistemático referente à identificação da posição do ponto. O segundo parâmetro é a dispersão da medição que inclui efeitos tanto de causas cíclicas, por exemplo as causas associadas às condições ambientais, como as diferenças decorrentes da aplicação sucessiva da mesma metodologia. A dispersão da medição é, em geral, calculada através do desvio padrão.

O erro sistemático da escala será considerado como erro aleatório, visto que as informações disponíveis /74/ não individualizam os erros e uma calibração realizada com laser interferométrico, durante os testes do sistema de medição, não possibilitaram, também, esta individualização, devido ao fato de que o valor dos erros são muito pequenos e próximos do valor da incerteza de medição do sistema padrão.

O erro sistemático referente à identificação da posição do ponto é composto de duas parcelas: o erro de identificação do limite sombra/luz e o erro devido a projeção da imagem (ver figura 4.10). O erro de identificação do limite sombra/luz é

avaliado em $- 0,8 \mu\text{m}$ para o flanco esquerdo e de $- 0,5 \mu\text{m}$ para o flanco direito, em função dos valores encontrados na determinação da histerese do sistema de medição (item 6.3.5). O erro devido a projeção é variável e depende do diâmetro que está sendo medido e da abertura do diafragma. Varia desde $+ 5 \mu\text{m}$ para aberturas menores, dentre aquelas viáveis, até $- 5 \mu\text{m}$ para aberturas maiores. Porém, na medição do passo e do ângulo de flanco, o erro devido a identificação do limite sombra/luz é eliminado durante as medições, dado ao fato de que o valor das mesmas é obtido pela diferença entre leituras para um mesmo lado do flanco. Na medição do diâmetro de flanco, o erro de identificação do limite sombra/luz determina um erro sistemático, devido a histerese, de $- 0,3 \mu\text{m}$: $\left[- 0,8 - (- 0,5 \mu\text{m}) \right]$ que pode ser compensado pelo "software". O erro devido a projeção pode ser determinado para cada caso e, portanto, deve ser compensado pelo "software" juntamente com o erro de identificação do limite sombra/luz.

A dispersão da medição é formada pelo erro da escala e pelo erro aleatório. O erro da escala é de $\pm 0,2 \mu\text{m}$ /74/ e o erro aleatório foi determinado como sendo $\pm 0,2 \mu\text{m}$ (ver repetibilidade). Pela média quadrática destes dois valores, obtém-se que a dispersão da medição é de $\pm 0,3 \mu\text{m}$. É provável que a dispersão da medição para a posição do ponto seja menor que a determinada, uma vez que na dispersão da leitura está incluso o erro da escala, que não pôde ser individualizado, e que deste modo participa duplamente na formação da dispersão da medição.

Como os erros sistemáticos serão compensados, conclue-se que a

incerteza para a coordenada de um ponto é de $\pm 0,3 \mu\text{m}$.

6.4.2 Dimensões mínimas para as roscas de precisão medidas com o protótipo experimental

Tendo em vista a incerteza da coordenada do ponto, existe uma dimensão mínima, para as roscas que podem ser medidas em função das incertezas de medição máximas admissíveis.

Considerando o pior caso, no qual dois pontos extremos apresentam um erro igual à incerteza máxima ($\delta = \pm 0,3 \mu\text{m}$), forma-se o triângulo apresentado na figura 6.22.

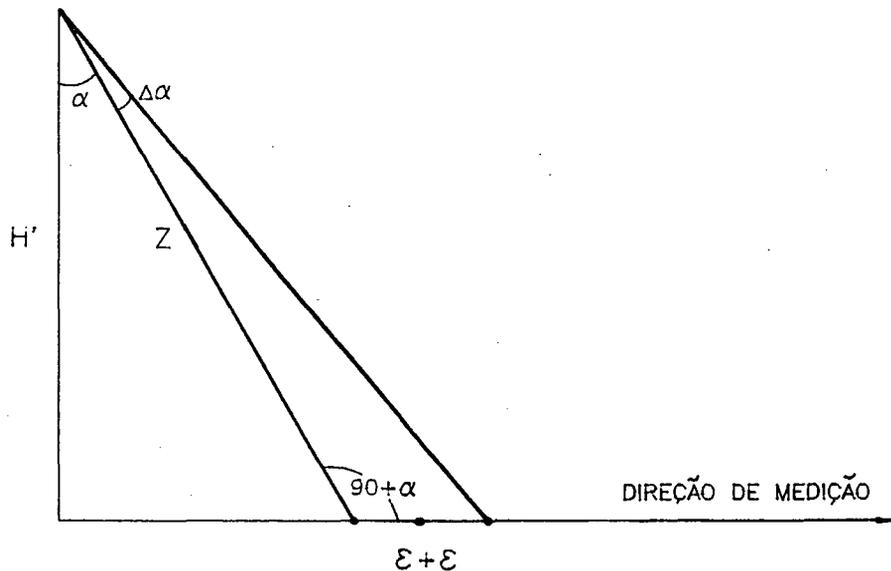


Figura 6.22 Triângulo utilizado para a determinação da altura mínima do flanco da rosca em função do erro máximo admissível " $\Delta\alpha$ " e da incerteza da coordenada do ponto $\pm 0,3 \mu\text{m}$.

A incerteza de medição do ângulo de flanco para os métodos existentes é de $\pm 3'$ /35/. Para estas condições [$\Delta\alpha = 3'$ e $\gamma = \pm 0,3 \mu\text{m}$ (fig. 6.21)] obtém-se, pela lei dos senos:

$$\frac{\text{sen } \Delta\alpha}{2 \cdot \gamma} = \frac{\text{sen } (90 - \alpha - \Delta\alpha)}{Z} \quad \text{logo:}$$

$$Z = 0,6 \text{ mm} \quad \text{e} \quad H' = 0,52 \text{ mm}$$

Para se obter a altura mínima do flanco, deve-se considerar, também, a dimensão projetada do fotodetector que é 0,1 mm. Deste modo, a altura mínima do flanco da rosca para que o erro máximo seja de $3'$ é de 0,62 mm. Com este resultado pode-se determinar o passo mínimo dado que /18/:

$$\text{altura do flanco} = \frac{5}{8} H \quad \text{e} \quad H = 0,866 p$$

Para estas condições o passo mínimo é de 1,15 mm, o que corresponde a um diâmetro "d" mínimo de 8 mm, para roscas métricas normais /18/.

Para a incerteza máxima desejável ($\pm 1,6'$) o passo mínimo é de 2,2 mm, o que corresponde a um diâmetro mínimo de 18 mm, para roscas normais /18/.

Estas limitações não invalidam o sistema de medição desenvolvido para a medição de roscas com diâmetros menores e sim determinam a dimensão mínima a ser medida pelo sistema para que a incerteza de medição permaneça dentro dos limites desejados.

6.4.3 Considerações sobre o número de pontos do flanco da rosca cujas coordenadas devem ser obtidas.

Teoricamente dois pontos definem uma reta, porém, a incerteza de que esta reta, definida só com dois pontos, represente o flanco da rosca é muito elevada. Para executar estatisticamente uma regressão são necessários, no mínimo, três pontos. Entretanto, com este número a incerteza de que a reta representa o flanco é ainda grande, visto que o desvio padrão da regressão é inversamente proporcional à raiz quadrada do número de pontos levantados menos dois $\sqrt{75}$ %. Deste modo, o desvio padrão decresce com o aumento do número de pontos e fica reduzido à metade, quando o número de coordenadas levantadas no flanco da rosca passa de dois para seis. O número mínimo de pontos, que não compromete significativamente a precisão da representabilidade do flanco pela reta é cinco. Este número é justificável pois, para esta quantidade de pontos, de acordo com a teoria da regressão linear $\sqrt{75}$ %, a incerteza da posição estimada pela regressão, para o ponto central do flanco, é de $\pm 1 \mu\text{m}$, considerando todos os erros iguais a incerteza máxima ($\pm 0,3 \mu\text{m}$), condição esta que, para um nível de confiabilidade de 95%, só acontece uma vez em cada três milhões.

6.4.4 Posicionamento dos pontos no flanco da rosca

A posição dos pontos sobre o flanco do filete é determinada de modo que o ponto mais extremo esteja dentro do filete e o mais interno não sofra a interferência do arredondamento na raiz do filete. Sendo H a altura do flanco do filete, cujos pontos deverão ter suas coordenadas lidas (fig. 6.23), o comprimento de "t" é igual a H menos duas vezes a dimensão projetada do foto-

detector para evitar interferência das bordas do filete. Com este procedimento, a posição da primeira ordenada dista da crista do filete uma distância igual à dimensão projetada do fotodetector. A partir desta posição, determinam-se as seguintes, com um deslocamento da mesa de um valor igual à quarta parte do valor de "t" (fig. 6.22). Como a dimensão projetada do fotodetector é pequena, em relação as dimensões do flanco das roscas que serão medidas com a atual configuração do OSSAM nenhum outro cuidado necessita ser observado.

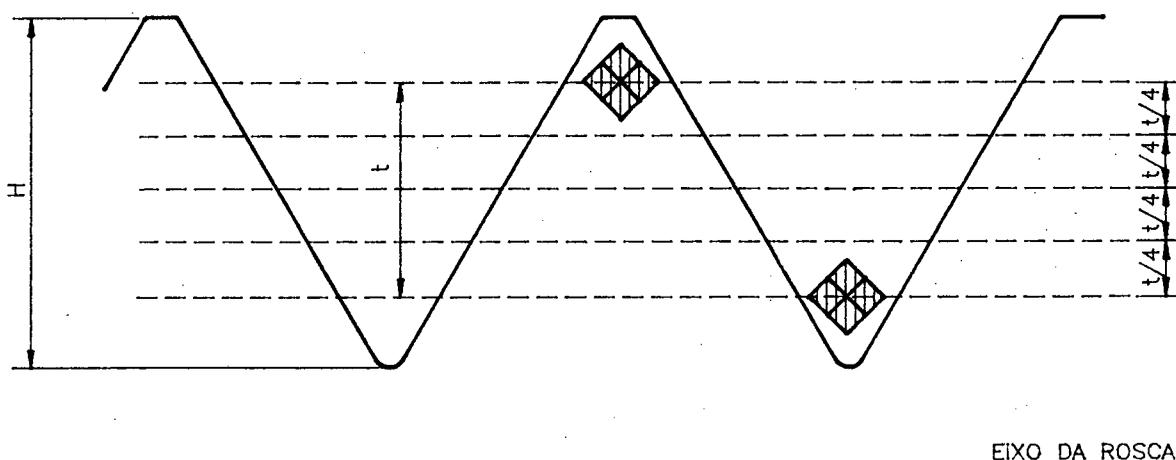


Figura 6.23 Posicionamento das ordenadas com a finalidade de distribuir uniformemente os pontos do flanco da rosca cujas coordenadas devem ser lidas.

7. PROCEDIMENTOS DE CÁLCULO DO VALOR NUMÉRICO DAS GRANDEZAS DETERMINANTES DE UMA ROSCA EXTERNA E DOS RESPECTIVOS ERROS

O sistema projetado - OSSAM - foi concebido com o objetivo de permitir o controle total de uma rosca de precisão. Para atender a estes objetivos, o sistema foi projetado de modo a medir qualquer grandeza de uma rosca externa seja ela cilíndrica (fig. 2.1.) ou cônica (fig. 2.3.), métrica ou não métrica, de perfil simétrico ou assimétrico. Já o protótipo experimental foi estruturado, em "hardware and software", com o objetivo de comprovar a viabilidade do Sistema de Medição proposto, pela medição das grandezas determinantes de uma rosca cilíndrica externa.

Deste modo, neste capítulo, será apresentada a metodologia utilizada para calcular o valor das grandezas determinantes da rosca e dos respectivos erros, a partir das coordenadas dos pontos referentes aos flancos da rosca, e calcular, ainda, o ângulo da inclinação do eixo da rosca com a direção de medição.

7.1 PROCEDIMENTO PARA OBTENÇÃO DAS COORDENADAS DOS PONTOS REFERENTES AOS FLANCOS DA ROSCA

7.1.1 Rosca cilíndrica

O procedimento realizado para a obtenção das coordenadas de um ponto do flanco da rosca, apresentado no capítulo 6, é repetido para toda a rosca. Uma vez definido o número de pontos por flanco, cujas coordenadas devem ser determinadas, de acordo com o item 6.5.3., executa-se um "scanning" sobre a rosca (deslocamento relativo rosca/sensor para posicionar todos os pontos desejados nos flancos da rosca de modo a interromper o feixe de luz apalpador) com o objetivo de definir as respectivas coordenadas (x,y) (fig. 7.1).

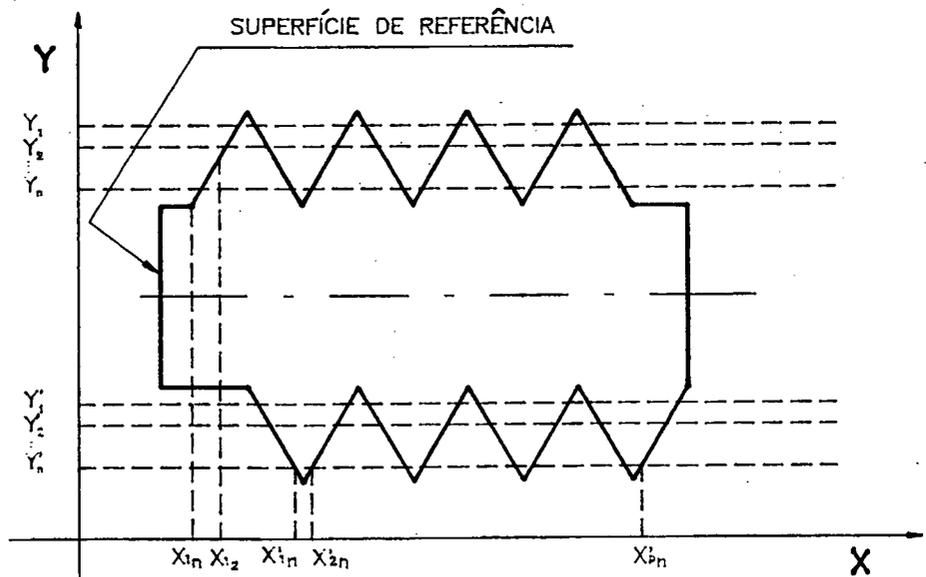


Figura 7.1 Sistema de coordenadas: lado posterior de $(X_{11}; Y_1)$ a $(X_{pn}; Y_n)$ e lado anterior de $(X'_{11}; Y'_1)$ a $(X'_{pn}; Y'_n)$.

7.1.2 Roscas cônicas

Na medição de roscas cônicas, devido à sua conicidade, há necessidade de reduzir a distância entre as ordenadas. Para compatibilizar o "scanning" com a medição de roscas cônicas, a distância desde a ordenada mais externa até a ordenada mais interna (t da fig. 6.23) deve ser reduzida de um valor equivalente ao deslocamento do perfil, devido à inclinação da rosca. Esta redução, por milímetro de comprimento da rosca, pode ser calculada por:

$$\text{redução/mm} = \tan \left(\frac{\text{conicidade}}{2} \right)$$

Assim, para uma rosca gás Whitworth, a distância entre as duas ordenadas extremas deve ser reduzida de 32 μm por milímetro de comprimento da rosca. Em função do exposto e da precisão desejada (ver item 6.5.1.), poderá ser necessário dividir o "scanning" em várias etapas a fim de manter uma distância, entre as ordenadas, compatível com a precisão desejada (fig. 7.2). Quando for este o caso, deve-se sobrepor as etapas sobre um dos filetes para dar continuidade à medição, principalmente, do passo.

7.2 TESTES EXECUTADOS COM A FINALIDADE DE ELIMINAR LEITURAS INCORRETAS QUANDO DA AQUISIÇÃO DE DADOS

Estes testes são realizados com o objetivo de assegurar a precisão dos dados adquiridos e de eliminar as leituras incorretas, o mais rápido possível. Executam-se (pelo "software") os

seguintes testes:

7.2.1 Teste da validade das coordenadas adquiridas

Ao fim de cada deslocamento da rosca, para uma dada ordenada, os dados adquiridos são testados com o objetivo de verificar se, para cada flanco, foi adquirida uma e só uma abcissa. Com esta finalidade cada abcissa é comparada com a abcissa seguinte (ver fig. 6.23) e a diferença entre elas não deve ser menor do que o tamanho do sensor (evitar a repetição de abcissas para um único flanco) e nem ser maior que o valor do passo nominal menos o tamanho do sensor (evitar uma falha no levantamento das abcissas de um flanco).

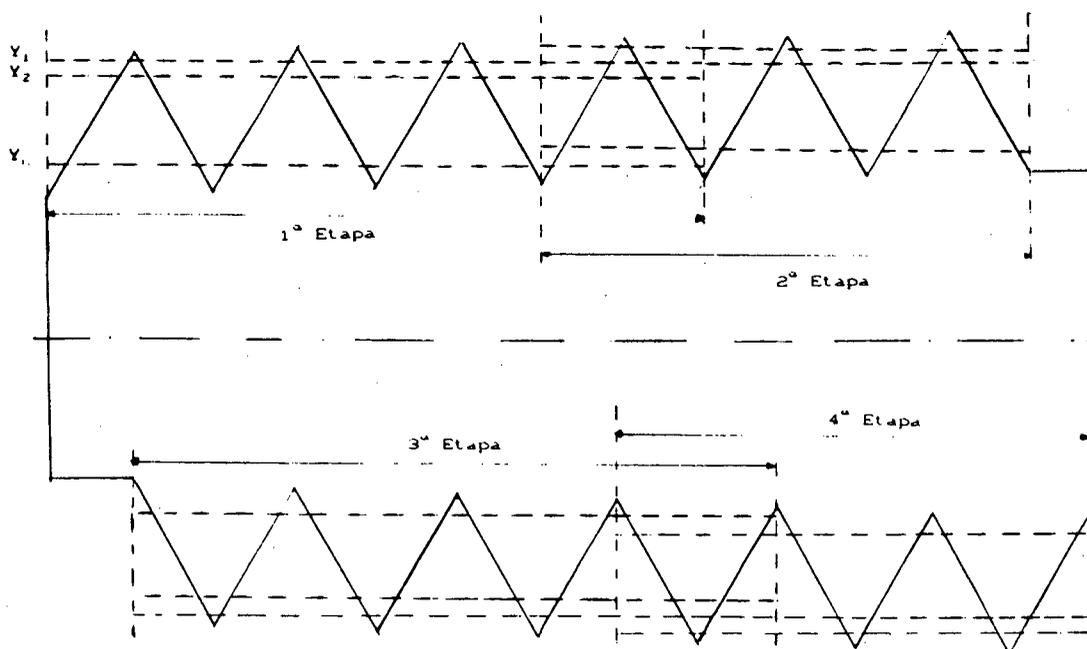


Figura 7.2. Exemplo de divisão do "scanning" em etapas para a medição de roscas cônicas.

7.2.2 Teste para eliminar erros com valor maior do que o valor da repetibilidade

A fim de evitar que alguma leitura incorreta, ocasionada por algum fator imprevisto, venha a influir no resultado da medição, cada deslocamento segundo o eixo X, para uma dada ordenada, é executado "n" vezes. Se o valor de uma dada abcissa, para um ponto de um flanco qualquer, divergir das outras abcissas, para o mesmo ponto do flanco, de um valor maior do que o valor da dispersão da medição, calculada a partir da repetibilidade [determinada anteriormente (ver item 6.3.5)], a aquisição das coordenadas, segundo estas mesmas ordenadas, é repetida procurando a obtenção de "n" abcissas consecutivas com leituras dentro do intervalo definido pela dispersão da medição em todos os pontos. Para os experimentos realizados "n" foi limitado a três, dado que a repetibilidade das leituras é elevada, como pode ser constatado na figura 6.18, e visto que o valor a ser considerado, para a regressão da reta, é a média aritmética dos valores lidos.

7.2.3 Teste da representabilidade do flanco da rosca por uma reta

Além destes cuidados com relação à aquisição dos dados, outros também são tomados, com relação à precisão da representabilidade do flanco da rosca pela reta. Com este objetivo, tão logo sejam concluídas as aquisições de dados de qualquer um dos lados da rosca, calculam-se os coeficientes de regressão da reta r^2 , para cada flanco. Como as roscas medidas são de precisão, não são aceitáveis coeficientes menores que 0,99995 (fig. 7.3). Valores inferiores ao apresentado, indicam proble-

mas no flanco, que podem ser desvios do flanco ou sujeiras devidas a uma limpeza inadequada. Uma vez identificado e sanado o problema, caso seja possível, todas as aquisições deverão ser repetidas para aquele lado da rosca.

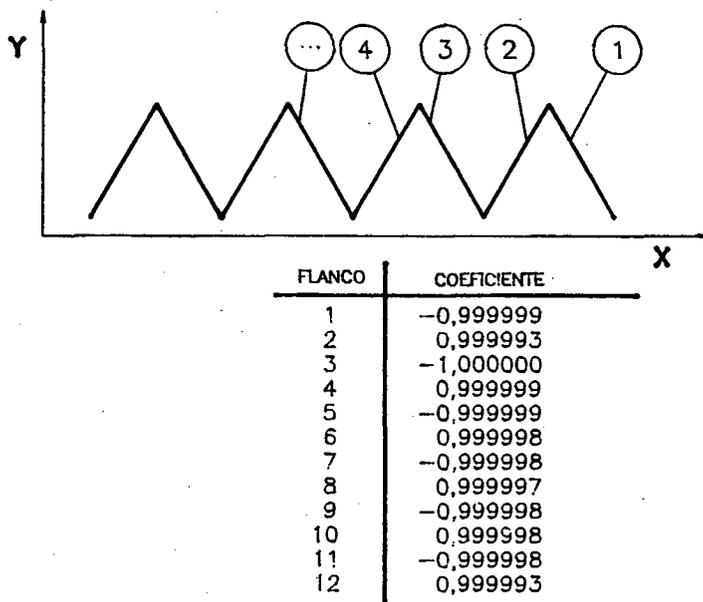


Figura 7.3. Exemplo de coeficientes de regressão obtidos para um calibrador M42 X 3.

7.3 ÂNGULO DE FLANCO E RESPECTIVOS ERROS

7.3.1 Procedimento de cálculo do ângulo de flanco

O ângulo de flanco é calculado através do coeficiente angular "a", da reta ($y = a.x + b$) definida pelo método dos mínimos quadrados, a partir dos pontos levantados para cada flanco. A equação (7.1), que permite calcular o valor do ângulo de flanco, já faz a compensação do erro de medida, devido à

inclinação " β " (ângulo de avanço) do eixo da unidade óptica em relação à normal ao eixo da rosca.

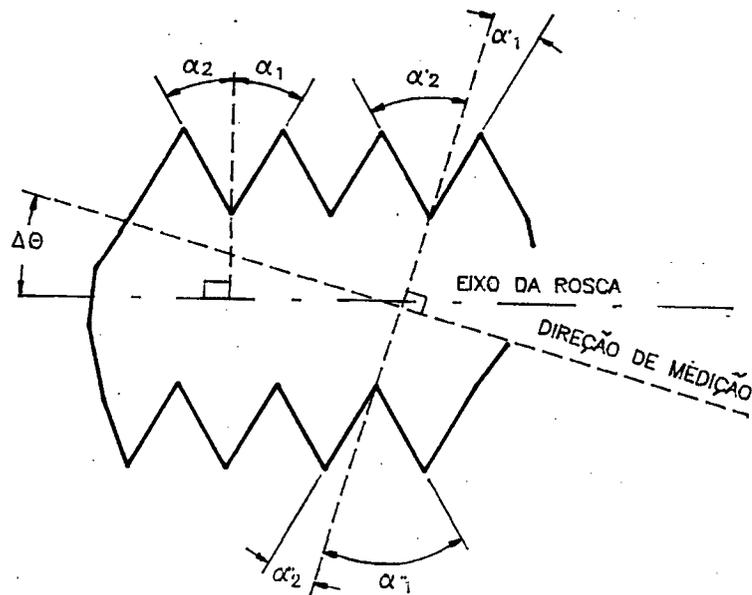
$$\alpha_t = \arctan \left[\frac{\tan (90 - \arctan |a|)}{\cos \beta} \right] \quad (7.1)$$

onde, para o lado posterior da rosca e posições relativas apresentadas na figura 7.4:

$$\alpha_t = \alpha_1 \text{ quando } a < 0$$

$$\alpha_t = \alpha_2 \text{ quando } a > 0$$

e para o lado anterior é o inverso.



$$\alpha_1 = \frac{\alpha_1' + \alpha_1''}{2} \quad \text{ou} \quad \alpha_2 = \frac{\alpha_2' + \alpha_2''}{2}$$

Figura 7.4 Compensação do erro ocasionado pelo não paralelismo entre o eixo da rosca e a direção de medição, quando da medição do ângulo de flanco.

O erro devido ao não paralelismo entre o eixo da rosca e a direção de medição é eliminado pela média dos α_i medidos nos dois lados (anterior e posterior) da rosca (figura 7.4.) /58/.

O erro do ângulo de flanco é calculado pela diferença entre o valor medido e o valor nominal deste ângulo.

Para as roscas cônicas, os procedimentos são idênticos.

7.3.2 Cálculo do ângulo formado entre a direção de medição e o eixo da rosca

O ângulo " $\Delta\theta$ " (fig. 7.4) formado pelo eixo da rosca com a direção de medição é calculado pelas seguintes expressões:

$$\Delta\theta = \frac{\alpha_2' - \alpha_2''}{2} \quad \text{ou} \quad \Delta\theta = \frac{\alpha_1'' - \alpha_1'}{2} \quad (7.2)$$

7.4 PASSO E RESPECTIVOS ERROS

7.4.1 Procedimento de cálculo do passo

Para o cálculo do valor do passo são realizadas as seguintes etapas: primeiro calcula-se, para cada ordenada, as diferenças entre as abcissas dos pontos de flancos consecutivos (direitos ou esquerdos) de mesmo lado do filete. Para os "z" pontos são calculados "z" passos, um para cada dois flancos consecutivos. Em seguida calcula-se o valor do passo destes flancos que corresponde à média aritmética dos "z" valores dos passos. Durante os testes "z" foi considerado igual a cinco, de acordo com o item 6.5.3. Como o valor calculado contém um erro, devido ao

não paralelismo do eixo da rosca com relação a direção de medição (figura 7.5.), o mesmo deve ser eliminado. Determina-se a expressão que permite eliminar este erro pela aplicação da lei dos senos, para um triângulo qualquer, ao triângulo formado pelos passos p , p' , p'' e os respectivos flancos. Como p' e p'' se alternam, sendo ora um de valor maior do que o outro, dependendo do lado da rosca que está sendo medido (fig. 7.5). Será chamado de p_+ ao maior valor entre p' e p'' e de p_- o menor dos valores (figura 7.6.). Na bibliografia existente (inclusive na citada neste trabalho /58/) afirma-se que este erro pode ser eliminado pela média aritmética entre os valores de p' e p'' . Para roscas de precisão esta afirmação não corresponde à realidade como pode ser visto na figura 7.6 onde o valor do passo médio é diferente do valor do passo ($p_m \neq p$).

O valor do passo isento de erro devido ao não paralelismo pode ser calculado pelas expressões a seguir:

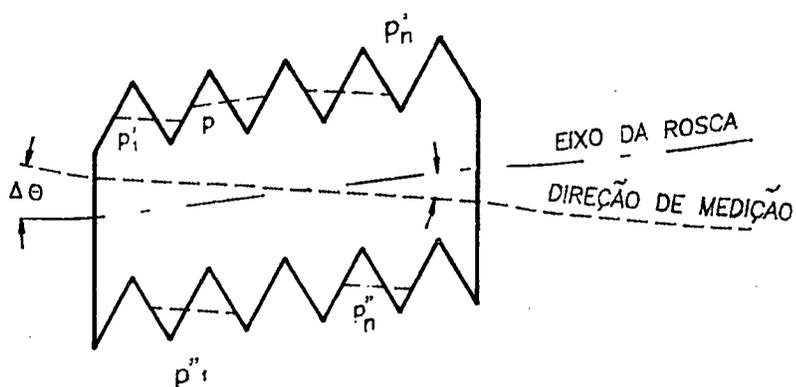
do triângulo ABD (fig. 7.6.) obtem-se:

$$p = \frac{p_- \cdot \cos(\alpha - |\Delta\theta|)}{\cos \alpha} \quad (7.3)$$

e, a partir do triângulo ABC, obtem-se:

$$p = \frac{p_+ \cdot \cos(\alpha + |\Delta\theta|)}{\cos \alpha} \quad (7.4)$$

Para roscas cônicas, o procedimento de cálculo é o mesmo, porém, são necessários cuidados adicionais, devido à sobreposição de filetes.



$$p_1' < p_1'' \quad \text{e} \quad p_2' > p_2''$$

Figura 7.5. Erro no valor medido do passo, devido ao não paralelismo " $\Delta\theta$ " entre a direção de medição e o eixo da rosca.

7.4.2 Procedimento de cálculo dos erros do passo

O erro individual do passo, seja do flanco esquerdo, seja do flanco direito ou do passo médio, é calculado pela diferença obtida entre: passo medido menos passo nominal. O erro do passo é calculado através dos erros individuais do passo, segundo um artifício de cálculo já apresentado no item 2.5.1.

7.5 DIÂMETRO DE FLANCO E RESPECTIVOS ERROS

O valor obtido, quando da medição do diâmetro de flanco, por métodos ópticos, depende do valor da abertura do diafragma, conforme informações apresentadas em itens anteriores (ver fi-

gura 4.10.). O sistema proposto - OSSAM - por possuir diafragmas, com aberturas constantes, que não fazem parte dos microscópios de medição usuais, tem um problema diferente. A medição realizada com o sistema proposto apresenta um erro sistemático, que depende do valor do diâmetro medido mas que, em contrapartida, por estar o sistema conectado a um microcomputador, pode ser compensado através do "software".

O procedimento correto de determinação, seja do erro sistemático seja da abertura ótima do diafragma, exige padrões roscados (rosca de alta precisão com certificado de calibração expedido por laboratório primário de nível internacional, a fim de que a incerteza de medição do diâmetro de flanco seja menor do que $\pm 1 \mu\text{m}$). A determinação da abertura ótima do diafragma é obtida pela medição do padrão com três aberturas do diafragma diferentes /58/. Com estes resultados, determina-se o erro sistemático para cada uma das três aberturas. Conhecidos os erros sistemáticos para cada abertura, determina-se a reta que relaciona o erro com o quadrado do valor da abertura do diafragma. A abertura correta será a raiz quadrada da abcissa para a qual o referido erro é nulo (fig. 4.10).

O fato do erro sistemático variar, em função do diâmetro medido, é um problema que afeta a medição de roscas de precisão pelo OSSAM. Na impossibilidade de dispor de todos os padrões roscados que possibilitem a construção da curva de erros sistemáticos, em função dos diâmetros medidos, sugere-se a utilização de uma peça especial, de fácil fabricação e medição com

máquinas e instrumentos de precisão, para a determinação do valor destes erros. O estudo desta peça será apresentado, em detalhe no ítem a seguir.

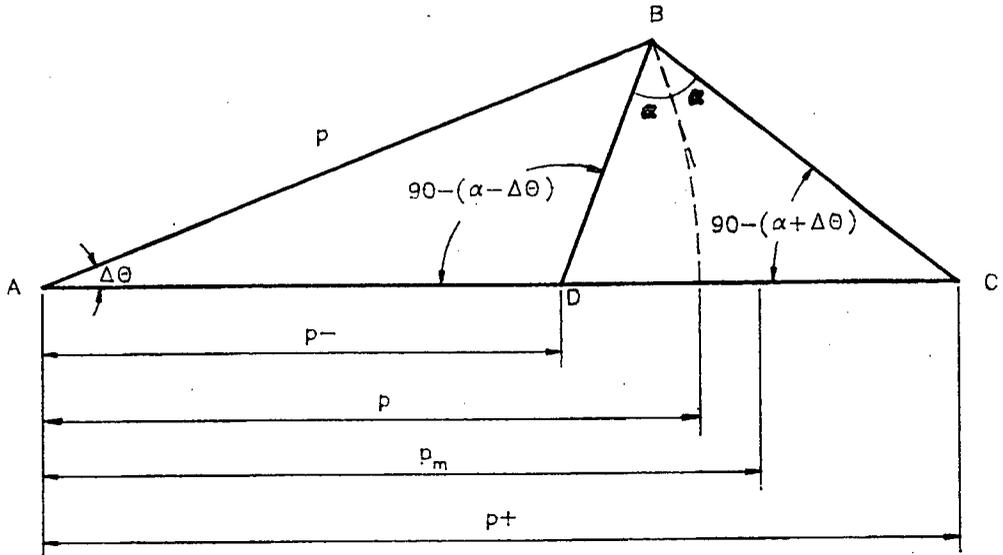


Figura 7.6. Triângulo dos passos obtido a partir da figura 7.5.

7.5.1 Padrão especial para a determinação dos erros sistemáticos na medição de roscas de precisão

A peça padrão especial, proposta, tem a forma apresentada na figura 7.7 (as dimensões constantes na figura correspondem a um padrão especial para rosca M35). A simplicidade das suas formas torna a sua fabricação muito mais fácil do que a de um padrão roscado. O acabamento superficial desejado é o mesmo estabelecido para roscas de precisão ($R_a < 1 \mu\text{m} / 31$). O padrão especial é, também, de fácil medição, pois, tendo em vista que o ângulo do cone é de 90° , as dimensões A e B (apresentadas na fig. 7.8) podem ser medidas em um comparador Abbe, com uma incerteza de medição muito menor que as incertezas de

padrões roscados. Para possibilitar a realização desta medição, num comparador Abbe, é suficiente a construção de uma peça intermediária entre o suporte de pontas e a mesa do comparador, que posicione este suporte numa posição inclinada de 45° (giro este realizado num plano paralelo ao plano da mesa) em relação a sua posição original.

A relação entre as dimensões do padrão especial e da rosca padrão pode ser determinada a partir da figura 7.9. O diâmetro externo do padrão especial tem a mesma dimensão do diâmetro maior da rosca "d"; d' é a dimensão da imagem projetada pela unidade óptica, para a rosca; e d" é a dimensão da imagem, projetada, do padrão especial. O controle dimensional do padrão especial, durante a sua fabricação será realizada através das dimensões "A" e "B", cujo valor obtém-se, por relações trigonométricas, a partir do diâmetro maior da rosca "d" (fig. 7.9), e corresponde a:

$$A = B = \frac{\sqrt{2}}{2} d \quad (7.5)$$

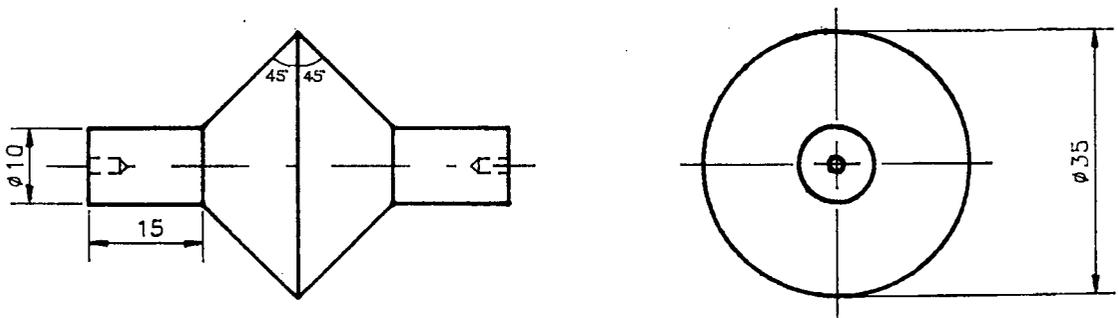


Figura 7.7 Padrão especial para a determinação do erro sistemático na medição do diâmetro de flanco.

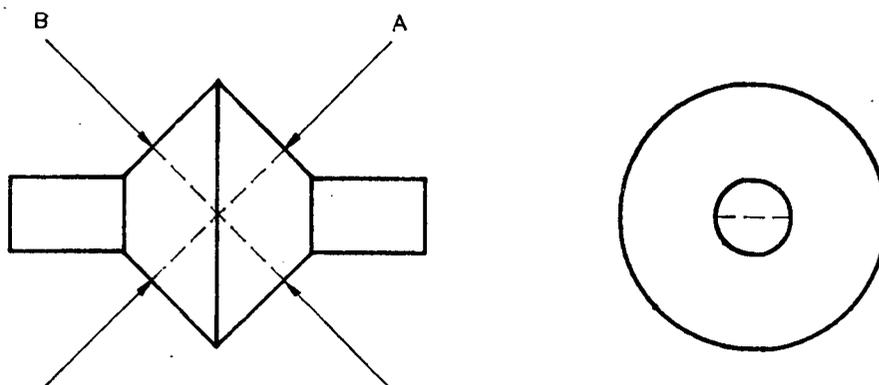


Figura 7.8. Direções de medição num comparador Abbe.

A tolerância das dimensões "A" e "B" não é uma condição crítica, pois variações de centésimos de milímetro, nestas dimensões, são admissíveis. O crítico é o paralelismo e a linearidade das geratrizes dos cones que formam as dimensões "A" e "B". Erros maiores do que $0,2 \mu\text{m}$, em todo comprimento da geratriz, não são admissíveis pois afetam, diretamente, a incerteza das referidas dimensões.

Estima-se que as dimensões d' e d'' sejam aproximadamente iguais (as diferenças, se houver, deverão ser menores do que poucos décimos de micrômetro) dado que: o diâmetro " d " da rosca padrão e da peça padrão especial são os mesmos, a forma do padrão especial, próximo ao seu diâmetro externo, aproxima-se da forma de um filete de rosca padrão e o acabamento superficial, dos dois padrões, é o mesmo. Deste modo, o erro sistemático, devido à projeção do padrão roscado, $Es_r = d' -$

d, será aproximadamente igual ao erro sistemático, devido à projeção do padrão especial, $Es_p = d'' - d$ ($Es_r \cong Es_p$).

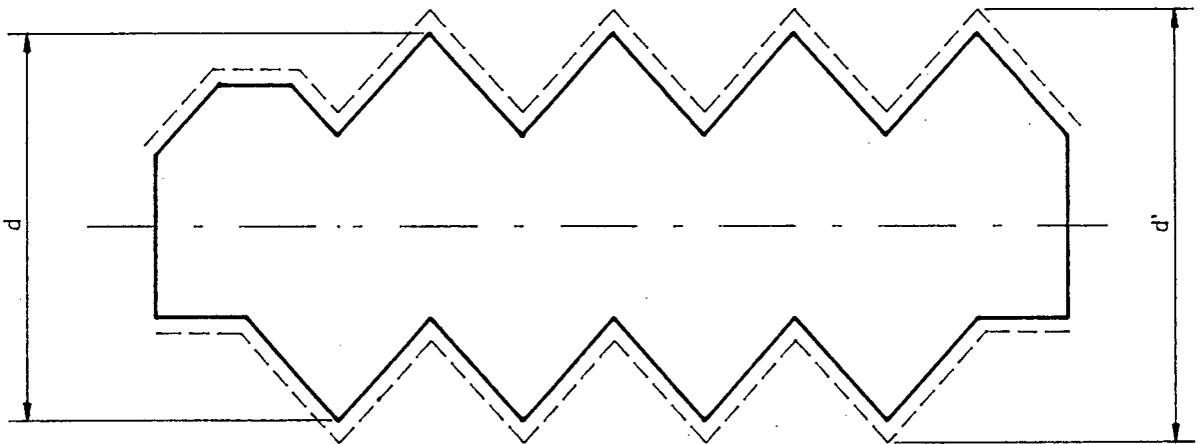
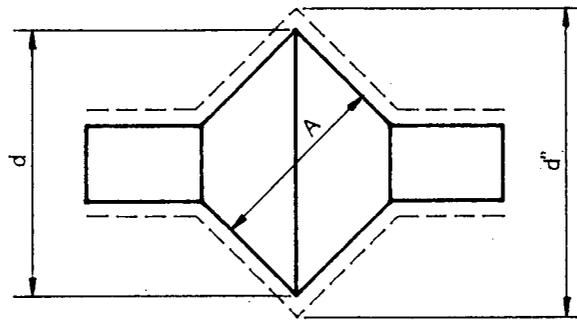


Figura 7.9 Relação entre as dimensões da rosca padrão e do padrão especial; linha contínua: objeto; linha tracejada: imagem projetada.

A incerteza de medição do diâmetro de flanco de um padrão ros-cado é de $\pm 1 \mu\text{m}$. Medindo o padrão especial num comparador Abbe, pelo método diferencial, a incerteza das dimensões "A" e "B" não são maiores do que $\pm 0,2 \mu\text{m}$. Como consequência, mesmo que exista uma diferença entre os erros sistemáticos Es_r e

Es_p , como esta diferença deve ser muito pequena, a incerteza devido a utilização do padrão especial (incerteza de medição do padrão mais diferença entre os erros sistemáticos), em substituição a um padrão roscado deve ser bem menor do que $\pm 1 \mu\text{m}$. Deste modo, a utilização da peça padrão especial resulta em um ganho de precisão.

Após a medição do padrão proposto, pelo OSSAM, o erro sistemático para o diâmetro de flanco pode ser calculado através do erro sistemático determinado para as dimensões "A" e "B", por simples relações trigonométricas (fig. 7.9), pela seguinte equação:

$$Es_d = \frac{\sqrt{2}}{2} Es_A = \frac{\sqrt{2}}{2} Es_B \quad (7.6)$$

Uma vantagem adicional do padrão especial proposto é a possibilidade de calibração do método de medição de ângulos do OSSAM.

A comprovação da validade da substituição do padrão roscado pelo padrão especial, para a determinação do erro sistemático na medição do diâmetro de flanco, deve ser executada por medições comparativas com padrões roscaados. Estas medições não foram realizadas devido à indisponibilidade de padrões roscado e à inexistência de recursos para fabricação do padrão especial.

7.5.2 Procedimento de cálculo do diâmetro de flanco

Para o cálculo do valor do diâmetro de flanco, são realizados

os seguintes procedimentos: calcula-se em cada flanco, a distância, segundo a direção "Y", dos pontos levantados no lado anterior da rosca, até a reta correspondente do lado posterior, determinada pelo método dos mínimos quadrados; por este cálculo são obtidos tantos valores para o diâmetro de flanco quantas forem as ordenadas utilizadas num determinado lado da rosca; o diâmetro de um determinado flanco será a média aritmética dos "z" valores obtidos para o mesmo flanco.

A falta de paralelismo entre o eixo da rosca e a direção de medição origina um erro, no valor calculado para o diâmetro de flanco, como pode ser visualizado na figura 7.10.

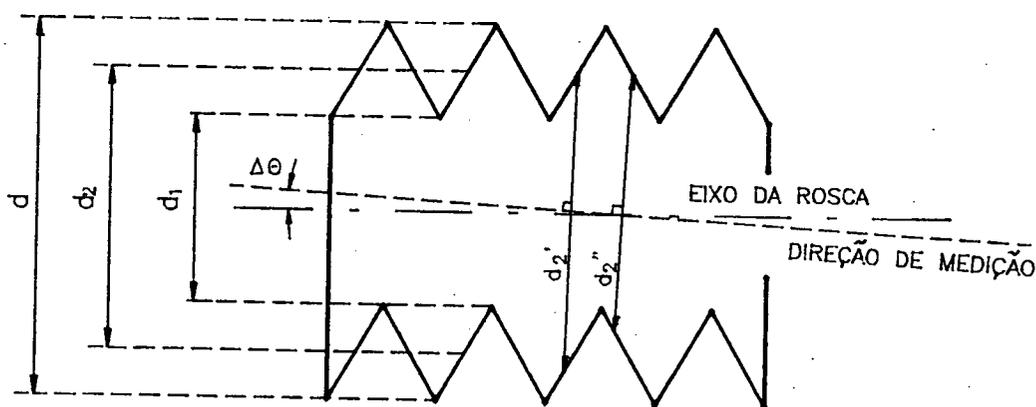


Figura 7.10 Erro no valor medido do diâmetro de flanco devido ao não paralelismo " $\Delta\theta$ " entre o eixo da rosca e a direção de medição.

O valor calculado para o diâmetro de flanco pode ser corrigido do erro devido ao não paralelismo " $\Delta\theta$ ", através do cálculo,

pelas equações 7.7 e 7.8, a seguir apresentadas. Na bibliografia existente (inclusive na citada neste trabalho /58/) afirma-se que este erro pode ser eliminado pela média aritmética entre os valores de d_2' e d_2'' (fig. 7.10). Para roscas de precisão esta afirmação não corresponde à realidade, como pode ser visto na figura 7.11, onde o valor do diâmetro de flanco médio é diferente da dimensão real ($d_{2m} \neq d_2$). Aplicando-se a lei dos senos de um triângulo qualquer ao triângulo EFG (fig. 7.11), onde supõe-se que $d_2' > d_2''$, obtém-se:

$$d_2 = \frac{d_2' \cdot \text{sen}(\alpha - |\Delta\theta|)}{\text{sen} \alpha} \quad (7.7)$$

e para o triângulo FGH obtém-se:

$$d_2 = \frac{d_2'' \cdot \text{sen}(\alpha + |\Delta\theta|)}{\text{sen} \alpha} \quad (7.8)$$

quando $d_2'' > d_2'$ inverte-se o sinal de $|\Delta\theta|$ dentro dos parênteses.

Quando da medição de roscas cônicas, há necessidade de se determinar a abcissa da superfície de referência a fim de calcular o valor do diâmetro de flanco para o plano de calibração (fig. 2.3).

7.5.3 Procedimento de cálculo dos erros

O erro do diâmetro de flanco é calculado pela diferença entre: o valor medido menos o valor nominal. O erro de posição é calculado através do seguinte procedimento: para toda rosca determinam-se as coordenadas dos pontos de intersecção das retas

que representam os flancos; a partir destas coordenadas, para cada diâmetro de flanco, calculam-se as coordenadas do respectivo ponto central pela média aritmética das quatro coordenadas das intersecções das retas referentes àqueles flancos (duas para cada lado da rosca); o eixo de referência da rosca é a reta gerada por estes pontos e determinada pelo método dos mínimos quadrados; o erro individual de posição, de cada diâmetro de flanco, é a distância da ordenada do centro, deste mesmo diâmetro de flanco até o eixo de referência da rosca. O valor do erro de posição do diâmetro de flanco será calculado pela diferença entre o erro individual, de posição, máximo menos o erro individual mínimo. O erro de posição do diâmetro de flanco não pode ser maior do que a metade da tolerância do respectivo diâmetro de flanco (ver figura 2.14.).

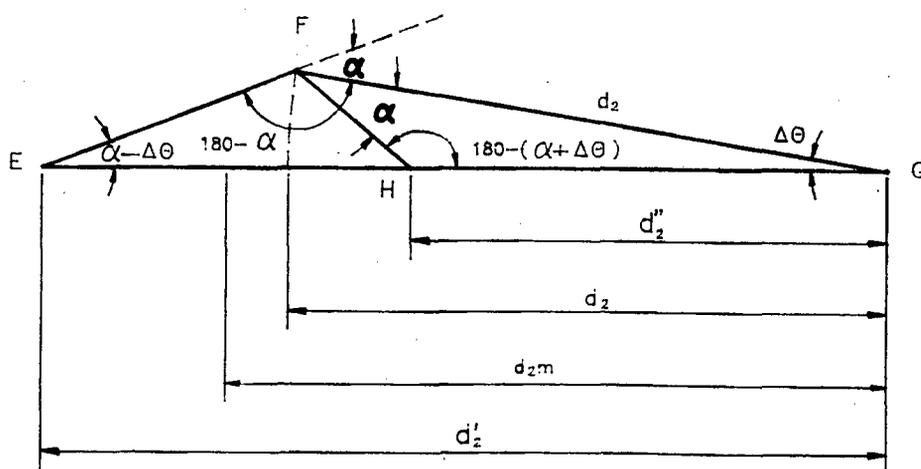


Figura 7.11 Triângulo de diâmetros, obtido a partir da figura 7.10.

7.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Todos os procedimentos de cálculo são simples e rapidamente executáveis por um microcomputador. Os procedimentos apresentados aplicam-se, também, a roscas cónicas.

O procedimento adotado para eliminar os erros, devido ao não paralelismo do eixo da rosca com a direção de medição, é inédito e mais preciso que os adotados presentemente.

A metodologia proposta permite avaliar, através do erro de posição do diâmetro de flanco, a geometria global da rosca, o que é impossível de ser determinado pelas outras metodologias de medição de roscas.

A utilização da peça padrão especial para a determinação do erro sistemático, a compensar, quando da medição do diâmetro de flanco da rosca de precisão, elimina a necessidade de existência de um jogo de roscas padrão para a determinação do valor deste erro, condição esta que era a limitação principal do método de medição proposto.

A medição do diâmetro de flanco, que tem um erro sistemático implícito, é viabilizada pela determinação e compensação deste erro a partir da utilização de roscas padrão ou de peças padrão especiais, o que possibilita, ainda, uma efetiva garantia da rastreabilidade das medições.

8. RESULTADOS OBTIDOS NOS TESTES EXPERIMENTAIS

Os testes do sistema desenvolvido (COSSAM) foram executados inicialmente com um cilindro, com o objetivo de verificar a repetibilidade do resultado da medição por coordenadas e após em calibradores tampão roscados com o objetivo de comprovar a viabilidade da metodologia proposta. Foram utilizados como referência um cilindro com diâmetro de 10 mm (fig. 8.1), um calibrador tampão M22 X 2,5 com certificado fornecido pelo PTB /35/ (fig. 2.9) e um calibrador tampão roscado M42 X 3 (fig. 8.2) medido pelo LABMETRO/UFSC, aplicando criteriosamente os procedimentos convencionais. Nos testes iniciais, referentes ao estudo de viabilidade técnica do sistema de medição, foi medido, também, um calibrador M10 X 1 /10,62/ que foi posteriormente abandonado devido às limitações do sistema experimental, quanto à dimensão mínima a ser medida, conforme a conclusão obtida no item 6.5.2.

A medição de calibradores roscados foi executada atendendo às seguintes restrições:

- a) o passo das roscas de precisão medidas eram iguais ou superiores a 2,5 mm, a fim de manter o erro máximo dentro dos limites desejados, de acordo com os estudos realizados no item 6.5.2, onde concluiu-se que, para passos menores que 2,2 mm, não seria possível garantir que a incerteza de medição seria menor ou no máximo igual a desejável;
- b) os diâmetros externos "d" das roscas de precisão medidas eram menores do que 100 mm, visto que essa era a limitação da escala do microscópio disponível no laboratório;
- c) foram medidas somente roscas métricas ISO por serem as mais empregadas.

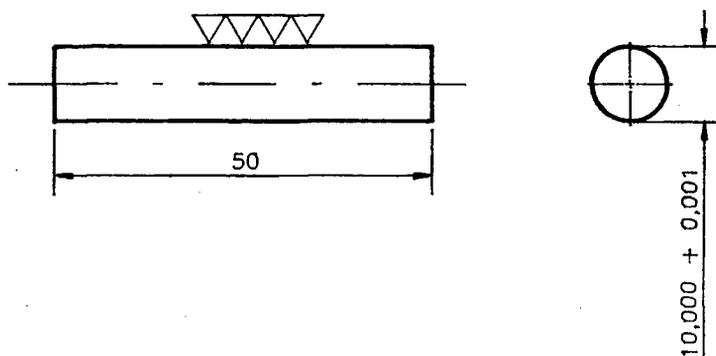


Figura 8.1 Cilindro utilizado para os testes de repetibilidade da medição com o sistema desenvolvido [mm].

Com o objetivo de testar o sistema de medição (OSSAM), quanto à sua viabilidade para a medição de roscas de precisão, algumas condições foram pré-determinadas:

- a) a abertura do diafragma, após ter sido determinada, foi mantida constante.
- b) foi observado um tempo mínimo de 15 minutos, durante o qual

todo sistema esteve ligado e em movimento, sem realizar medições, para obter a estabilidade do sistema.

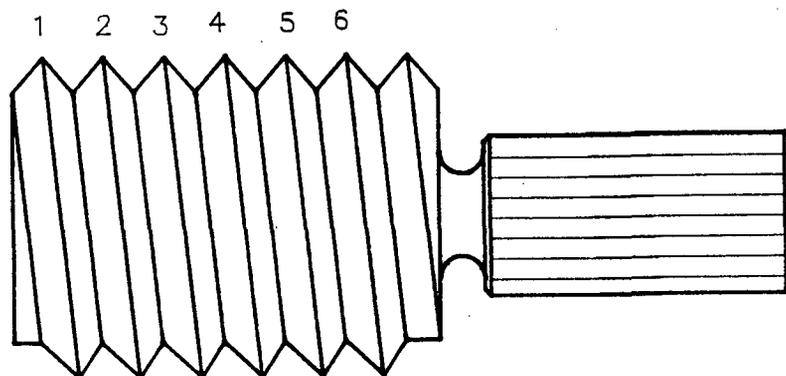


Figura 8.2. Calibrador tampão M42 X 3 medido durante os testes do sistema proposto.

Os testes realizados obedeceram as seguintes etapas:

- 1º) o calibrador foi mantido fixo em sua posição para determinar a repetibilidade devida unicamente ao sistema de medição;
- 2º) cada calibrador foi medido com dois operadores diferentes, o que é significativo, dado que a leitura da ordenada (Y) era executada pelo operador numa escala óptica; e a cada nova medição a imagem da rosca a ser medida foi desfocada e focada novamente.
- 3º) um mesmo calibrador foi medido em dias diferentes;
- 4º) foram medidos dois calibradores de diâmetros diferentes, cada um cinco vezes para verificar a repetibilidade do

Medições	d_2 [mm]	p [mm]	α_1	α_2
1 ^a	40,0681	2,9993	30° 1,5'	30° 1,3'
2 ^a	40,0676	2,9993	30° 3,8'	30° 0,9'
3 ^a	40,0682	2,9993	30° 2,2'	30° 0,3'
4 ^a	40,0680	2,9993	30° 2,6'	30° 0,1'
5 ^a	40,0679	2,9993	30° 3,1'	30° 0,8'
média	40,0680	2,9993	30° 2,6'	30° 0,7'
desvio-padrão	0,16 μm	< 0,1 μm	0,87'	0,48'
valor de referência	40,068 $\pm 0,003$	2,999(5) $\pm 0,002$	30° 0' $\pm 3'$	30° 0' $\pm 3'$

Figura 8.3. Resultado de cinco repetições da medição de um calibrador roscado M42 X 3;

Medições	d_2 [mm]	p [mm]	α_1	α_2
1 ^a	20,3808	2,5009	29° 55,3'	30° 1,4'
2 ^a	20,3809	2,5009	29° 56,0'	30° 1,0'
3 ^a	20,3809	2,5009	29° 55,8'	30° 0,7'
4 ^a	20,3809	2,5009	29° 55,7'	30° 1,4'
5 ^a	20,3809	2,5009	29° 55,4'	30° 1,6'
média	20,3809	2,5009	29° 55,6'	30° 1,2'
desvio-padrão	< 0,1 μm	< 0,1 μm	0,29'	0,36'
valor certificado /35/	20,381 $\pm 0,003$	2,501 $\pm 0,002$	29° 54' $\pm 3'$	30° 04' $\pm 3'$

Figura 8.4. Resultados de cinco repetições da medição de um calibrador roscado M22 X 2,5

sistema, medição esta executada por dois operadores e em dias diferentes (fig. 8.3 e 8.4);

Ao finalizar cada medição, o sistema fornece um relatório (fig. 8.5) com as seguintes informações:

- a) valor de cada grandeza determinante flanco a flanco;
- b) valor do erro destas grandeza, em relação ao valor nominal;
- c) valor do erro do passo e do erro de posição do diâmetro de flanco;
- d) Incerteza de medição para cada grandeza medida;
- e) Incerteza do resultado em função da incerteza de medição e dos erros da rosca.

8.1 TESTE DE REPETIBILIDADE DO RESULTADO

A repetibilidade de leitura de uma posição no flanco da rosca apresenta resultados satisfatórios, de acordo com os dados que constam da figura 6.19. Porém, é necessário saber se, no resultado de uma medição, a não repetibilidade do limite sombra/luz de um lado do cilindro se soma a não repetibilidade do limite sombra/luz do outro lado do cilindro ou se as diferenças no valor das abcissas lidas de um lado são acompanhadas por idêntica diferença no outro lado, mantendo uma alta repetibilidade, também, para o resultado. Para realizar este teste foi escolhido um cilindro de 10 mm de diâmetro (fig 8.1). Como o objetivo do teste não era medir o diâmetro do cilindro, não foi determinada a curva de diafragmas ótimos. Por estas razões a abertura do diafragma foi ajustada até que o valor medido

Calibrador M22 X 2,5

17 - 7 - 91

Operador MAJ

Plano de medição n° 1 (0°)

f = 5,5 mm

ANGULO DE FLANCO ($I_m = 1,5'$)

Posição	α_1	Erro	α_2	Erro
1	29° 55,7'	- 4,3'	30° 1,0'	1,0'
2	29° 55,3'	- 4,7'	30° 0,1'	0,1'
3	29° 57,0'	- 3,0'	30° 0,2'	0,2'
4	29° 56,7'	- 3,3'	30° 3,2'	3,2'
5	29° 54,7'	- 5,3'	29° 59,8'	- 0,2'
Média	29° 56' ± 2'		30° 1' ± 2'	

Angulo da rosca = 59° 57' ± 3'

PASSO [mm] ($I_m = \pm 0,4 \mu\text{m}$)

Posição	Esquerdo	Erro [μm]	Direito	Erro [μm]
1	2,5005	0,5	2,5004	0,4
2	2,5001	0,1	2,5007	0,7
3	2,5006	0,6	2,5013	1,3
4	2,5026	2,6	2,5006	0,6

Passo médio = 2,5009 ± 0,0007 mm

Erro do passo = 3,8 μm DIAMETRO DE FLANCO [mm] ($I_m = \pm 3 \mu\text{m}$)

Posição	Esquerdo	Erro [μm]	Direito	Erro [μm]
1	20,3798	- 0,2	20,3801	0,1
2	20,3801	0,1	20,3804	0,4
3	20,3812	1,2	20,3816	1,6
4	20,3807	0,7	20,3814	1,4
5	20,3781	- 1,9	20,3770	- 3,0

Diâmetro médio = 20,380 ± 0,003 mm

Erro de posição (cilindricidade) = 2 μm

Figura 8.5. Relatório Final: Resultado da medição

coincidisse com o diâmetro do cilindro. Para as finalidades propostas o diâmetro do cilindro foi medido dez vezes com deslocamentos no sentido crescente do eixo X e dez vezes no sentido decrescente do referido eixo. Os resultados, apresentados na figura 8.6., comprovam que a repetibilidade se mantém elevada também para o valor do diâmetro. As medidas foram repetidas diversas vezes e as mesmas se mantiveram sempre dentro do intervalo $10,0000 \pm 0,0002$ mm, sendo que $\pm 0,0002$ mm é a dispersão da medição esperada para uma medida qualquer.

MEDIÇÃO DO CILINDRO							[mm]
Sentido crescente				Sentido decrescente			
n	Leituras		Medidas	Leituras		Medidas	
1	8,4157	18,4159	10,0002	18,4165	8,4165	10,0000	
2	8,4157	18,4158	10,0001	18,4165	8,4165	10,0000	
3	8,4157	18,4157	10,0000	18,4165	8,4165	10,0000	
4	8,4157	18,4157	10,0000	18,4164	8,4165	9,9999	
5	8,4156	18,4157	10,0001	18,4165	8,4165	10,0000	
6	8,4156	18,4157	10,0001	18,4165	8,4164	10,0001	
7	8,4155	18,4157	10,0002	18,4165	8,4165	10,0000	
8	8,4156	18,4157	10,0001	18,4165	8,4165	10,0000	
9	8,4156	18,4158	10,0002	18,4165	8,4165	10,0000	
10	8,4156	18,4157	10,0001	18,4165	8,4166	9,9999	

Figura 8.6 Tabela da repetibilidade de medição do diâmetro de um cilindro. Condições: repetição da medição em instantes sucessivos; velocidade 2 mm/s.

8.2 MEDIÇÃO DO PASSO

8.2.1 Resultados

O relatório final de medição (fig. 8.5) apresenta o valor, para cada flanco, do passo dos flancos esquerdos e dos flancos direitos e o valor do passo médio. Embora o passo médio informe quase nada sobre os erros dos passos, ele é, ainda, apresentado nos certificados de calibração, inclusive de laboratórios primários internacionais /35/. Além destas informações, constam também do relatório final o erro do passo, a incerteza de medição do passo e a incerteza do resultado.

A medição do passo pelo sistema desenvolvido é altamente repetitiva. Todas as medições do passo, feitas durante os testes, indicaram, praticamente, o mesmo valor para os passos individuais das roscas. A maior diferença encontrada entre o valor de um passo qualquer e o valor deste mesmo passo obtido em outras medições quaisquer foi de $0,2 \mu\text{m}$, mesmo com diferentes aberturas do diafragma. O valor do passo médio foi sempre o mesmo, sob quaisquer condições (fig. 8.3. e 8.4.).

8.2.2 Avaliação da incerteza de medição

Durante a medição do passo, os seguintes erros devem ser considerados com relação a sua influência no valor do resultado da medição:

- a) erro sistemático de detecção: desprezável devido ao fato de que o passo é calculado pela diferença de duas leituras realizadas no mesmo lado do flanco;
- b) incerteza da abscissa do ponto (item 6.5.1.) = $\pm 0,3 \mu\text{m}$;

- c) folgas, erros de guia, vibrações = $\pm 0,1 \mu\text{m}$ (máxima diferença encontrada durante os testes entre todos os valores medidos para um mesmo passo);
- d) alinhamento escala/peça: desprezável por ter sido observado o princípio de Abbe;
- e) erro devido às condições ambientais: desprezável, ambiente condicionado ($20 \pm 0,3^\circ\text{C}$);
- f) erro originado pela projeção: desprezável dado que o caminho óptico é sempre o mesmo.

Em função dos erros apresentados, a incerteza de medição pode ser calculada considerando: $\pm 0,3 \mu\text{m}$ (erro de uma das abcissas), $\pm 0,3 \mu\text{m}$ (erro da outra abcissa para a medição do passo) e $\pm 0,1 \mu\text{m}$ (folgas e vibrações). Conseqüentemente, a incerteza de medição do passo "I_m" será:

$$I_{m_p} = \pm \sqrt{0,3^2 + 0,3^2 + 0,1^2} = \pm 0,4 \mu\text{m}$$

Analisando as parcelas que participam do cálculo do valor da incerteza de medição do passo, verifica-se a predominância dos erros da escala de medição e dos erros devidos às folgas e às guias da mesa do sistema de medição. Deste modo, existe a possibilidade de redução do valor desta incerteza de medição pela utilização de escalas com erros menores e/ou pela utilização de uma unidade de deslocamento da mesa com guias mais lineares e com menores folgas. Estima-se que, em função destas melhorias, a incerteza de medição do passo possa atingir valores iguais a $\pm 0,2 \mu\text{m}$.

8.3 MEDIÇÃO DO ÂNGULO DE FLANCO

8.3.1 Resultados

No relatório final (fig. 8.5) são apresentados separadamente, para cada filete, os valores dos ângulos de flanco " α_1 " e " α_2 ", que, teoricamente, devem ser iguais. Além dos ângulos de flanco são apresentados, também, o ângulo da rosca " 2α " ($\alpha_1 + \alpha_2$), o erro de cada ângulo medido em relação ao valor nominal, o ângulo de flanco médio, a incerteza de medição e a incerteza do resultado.

Com relação aos valores medidos, verifica-se que comparando os mesmos com aqueles já conhecidos (fig. 8.3) constata-se que a maior diferença existente entre um valor medido qualquer e o valor de referência é de 3,8'. Esta diferença, que é grande, é plenamente justificável em função das incertezas de medição da grandeza medida pelo protótipo e das incertezas do valor de referência para a grandeza do calibrador medido.

8.3.2 Avaliação da incerteza de medição

Além dos erros já analisados, para a medição do ângulo de flanco, devem ser considerados os seguintes erros:

- a) erro máximo da reta em relação aos pontos obtidos (consequência da condição estabelecida em 7.2.3): $\pm 0,3'$
- b) erro devido às folgas, erros de guia, vibrações: $\pm 1,5'$
(máxima diferença encontrada durante as medições entre todos os valores medidos para um mesmo ângulo);
- c) erro sistemático: desprezável por não modificar o ângulo calculado, pois para um determinado flanco são todos de

mesmo valor.

Em função do exposto, a incerteza de medição do ângulo de flanco " $I_{m_{\alpha_i}}$ " é:

$$I_{m_{\alpha_i}} = \pm \sqrt{0,3^2 + 1,5^2} = \pm 1,5'$$

Analisando o valor obtido para a incerteza de medição do sistema desenvolvido, quando da medição do ângulo de flanco, conclui-se que os erros devidos às guias, a sua não ortogonalidade e as folgas durante o deslocamento da mesa são preponderantes. Assim sendo, existe a possibilidade de redução do valor desta incerteza de medição pelo emprego de guias com menores erros, com a redução das folgas entre as partes móveis e com a redução do erro de não ortogonalidade entre as guias. O valor da incerteza, referente à medição de ângulos pelo sistema de medição, poderá ser determinada com maior exatidão através de uma calibração realizada com a utilização da peça padrão especial proposta (item 7.5.1).

8.4. MEDIÇÃO DO DIÂMETRO DE FLANCO

8.4.1 Resultados

A não disponibilidade de padrões roscados e/ou padrão especial impossibilitou o levantamento da curva de aberturas ótimas do diafragma. Porém, esta falta não altera os resultados dos testes do sistema, pois os mesmos foram realizados com vistas a verificar a viabilidade do sistema para a medição do diâmetro

de flanco de roscas de precisão e verificar se esta medição tem repetibilidade. Se o padrão estivesse disponível, este seria utilizado para determinar a abertura do diafragma para a qual o erro seria nulo. Com a rosca disponível foi realizado o mesmo procedimento, uma vez que a dimensão medida já era conhecida, dada a existência de um certificado fornecido por laboratório primário de reconhecimento internacional [35].

De acordo com o procedimento já especificado, no capítulo 4, foram realizadas três medições do diâmetro de flanco com diferentes aberturas de diafragma. Com estes resultados foi determinada a reta que relaciona a abertura do diafragma com o erro sistemático e calculada a abertura para a qual o erro deveria ser nulo (figura 8.7).

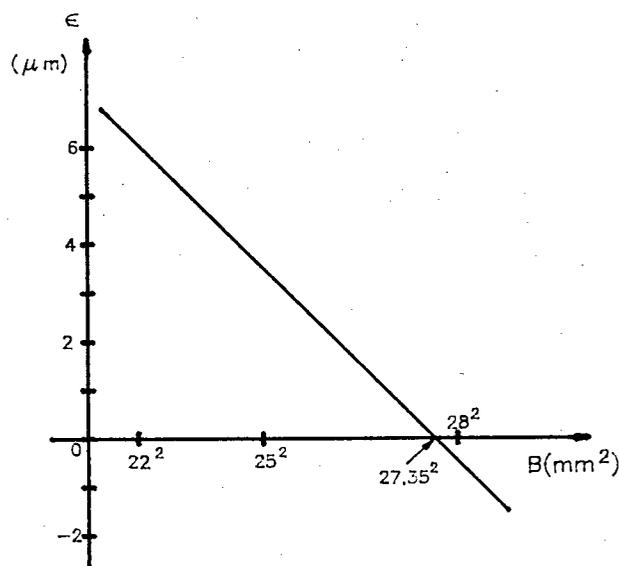


Figura 8.7 Representação gráfica da determinação da abertura "B" ótima do diafragma para um calibrador roscado M22 X 2,5.

Para o calibrador M22 X 2,5 a abertura encontrada foi de 27,35 mm (fig. 8.7) e para o calibrador M42 X 3 a abertura encontrada foi de 22,25 mm. Os valores encontrados seguem a tendência esperada, de acordo com a curva apresentada na figura 4.10.

No relatório final de medição (fig. 8.5) constam os valores dos diâmetros de flanco, flanco a flanco, o respectivo erro em relação ao valor nominal, o valor do erro de posição do diâmetro de flanco (cilindricidade); o diâmetro de flanco médio, a incerteza de medição e a incerteza do resultado.

Analisando-se os valores do diâmetro de flanco médio, medidos durante os testes e apresentados nas figuras 8.3 e 8.4, verifica-se que o resultado é bastante repetitivo, pois a diferença máxima encontrada entre dois valores quaisquer foi de 0,6 μm . Salienta-se, ainda, que na medição do calibrador M22 X 2,5 a diferença máxima foi somente de 0,1 μm . Como a medição do calibrador M22 X 2,5 foi executada por último, é provável que esta melhora na precisão das medidas seja devida a uma maior experiência da equipe que realizou as medições.

8.4.2 Avaliação da incerteza de medição

Além dos erros já citados em outros itens, devem ser considerados os seguintes erros:

- a) erro sistemático devido à projeção da rosca: compensado pelo "software";
- b) erro devido às folgas, erros de guias e erros devidos às vibrações: $\pm 0,3 \mu\text{m}$
- c) incerteza da rosca utilizada como padrão para a determina-

ção do valor da abertura do diafragma: $\pm 3 \mu\text{m}$

Em função dos dados apresentados, para o cálculo da incerteza de medição do diâmetro de flanco " Im_{d_2} " serão considerados os seguintes erros: $\pm 0,3 \mu\text{m}$, quatro vezes, devido às incertezas das abcissas (duas) e das ordenadas (duas); $\pm 0,3 \mu\text{m}$, devido aos erros de guias e às vibrações e $\pm 3 \mu\text{m}$, devido à incerteza do calibrador utilizado como padrão. Com base nestes dados a incerteza de medição é estimada em:

$$Im_{d_2} = \pm \sqrt{0,3^2 + 0,3^2 + 0,3^2 + 0,3^2 + 0,3^2 + 3^2} =$$
$$= \pm 3,1 \mu\text{m}$$

Analisando o resultado obtido, verifica-se que a incerteza de medição depende quase que exclusivamente da incerteza do padrão utilizado para determinar o erro sistemático do sistema. Utilizando-se uma rosca padrão (incerteza de $\pm 1 \mu\text{m}$) existe a possibilidade de redução da incerteza de medição para o valor de $\pm 1,2 \mu\text{m}$. Com o emprego do padrão especial para a determinação do valor do erro sistemático, com uma incerteza estimada de $\pm 0,5 \mu\text{m}$, pode-se reduzir a incerteza de medição para o valor de $\pm 1 \mu\text{m}$. Este valor de incerteza pode ser, ainda, mais reduzido pela utilização de melhores escalas para os eixos coordenados e melhores guias para os deslocamentos da mesa. Estima-se, que com estes procedimentos, a incerteza de medição seja reduzida para valores tais como $\pm 0,6 \mu\text{m}$.

8.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na medição das grandezas determinantes de roscas de precisão, a medição do passo é a mais precisa, fornecendo uma incerteza de medição melhor que a dos métodos atuais e compatível com a incerteza de medição desejável.

Com relação à medição do ângulo de flanco, embora a incerteza de medição estimada seja menor que as incertezas dos métodos usuais, não há uma redução significativa da incerteza de medição. Entretanto, na medição com o sistema desenvolvido, há uma importante redução das dificuldades para a execução da medição.

A incerteza de medição do diâmetro de flanco depende da incerteza do padrão. Para bons padrões, o sistema proposto fornece resultados com incertezas inferiores às apresentadas pelos métodos usuais. A incerteza de medição do diâmetro de flanco, a ser obtida com o emprego do padrão especial, satisfaz as exigências em função das tolerâncias das roscas de precisão.

Os resultados obtidos nos testes finais (fig. 8.3) comprovam a reprodutibilidade dos resultados, pois coincidem com aqueles obtidos durante os testes iniciais do sistema realizados em 1989 /10/.

9. CONCLUSÃO

O sistema optoeletrônico, para medição automatizada de roscas, proposto - OSSAM (Optoeletronic System for Screw Automated Measuring) - constitui-se em um aperfeiçoamento à instrumentação e às metodologias existentes para a medição de roscas externas de precisão.

Pela análise dos requisitos metrológicos necessários para um sistema de medição de roscas de precisão, verifica-se que os erros gerados pelos sistemas de medição existentes são consideravelmente maiores que aqueles que seriam desejáveis para a tarefa de controle ou calibração. Além disso, os sistemas de medição usuais apresentam os seguintes problemas:

- a) cada grandeza determinante exige, para a sua medição, uma montagem específica em diferentes sistemas de medição;
- b) a calibração de roscas de precisão é muito demorada, consumindo no conjunto mais de quatro horas;
- c) o resultado da medição do ângulo de flanco é muito dependente do operador;

d) os métodos usuais de medição do passo e do diâmetro de flanco não são indicados para a medição de roscas cônicas.

Atualmente, os melhores resultados são obtidos com metodologia optoeletrônica automatizada. Dos métodos existentes, o trabalho mais evoluído, realizado por um fabricante de instrumentos de medição, apresenta os seguintes problemas:

- a) a cada mudança de flanco, para a execução da leitura da posição, é necessário refocar a objetiva do sistema, tendo em vista que o eixo óptico não é inclinado de um ângulo igual ao ângulo de avanço, em relação ao eixo da rosca;
- b) por medir fora do plano axial, (perpendicular ao eixo óptico), os valores medidos devem ser corrigidos a valores equivalentes sobre o plano axial;
- c) o valor desta correção depende ainda da abertura do diafragma;
- d) como as medições não são realizadas em movimento contínuo o tempo de medição é maior que o desejável;
- e) as sucessivas paradas para refocar a imagem e as correções devidas ao plano de medição aumentam a incerteza do sistema de medição.

Com o sistema desenvolvido a nível de protótipo laboratorial (COSSAM) obteve-se as seguintes vantagens em relação aos sistemas existentes:

- a) uma sensível redução no tempo total necessário para a medição das grandezas determinantes de uma rosca de precisão; atualmente esta medição está sendo executada em aproximadamente uma hora (do início da medição à obtenção do

relatório);

- b) é um sistema automatizado sem interrupções;
- c) simplicidade de operação do sistema de medição e de cálculo das grandezas medidas;
- d) as incertezas de medição são menores que as dos melhores métodos de medição em uso atualmente;
- e) com o sistema é possível a medição de roscas externas cônicas ou cilíndricas;
- f) possibilita a medição do erro de posição do diâmetro de flanco;
- g) o sistema pode ser adaptado aos microscópios de medição ou projetores de perfis existentes;
- h) mede qualquer outra peça que possa ser medida por métodos ópticos com maior rapidez e menores erros;
- i) o OSSAM, dotado de um conveniente "software", pode se transformar em um sistema automatizado para o controle da qualidade de produções seriadas.

Com a redução das distâncias entre os diodos dos CCDs, utilização de metodologia com resolução de sub-pixel e o lançamento dos rápidos "area scan sensor", prevê-se que, brevemente, o CCD será utilizado para agilizar a medição optoeletrônica, possibilitando que as posições de todos os pontos do flanco de um filete da rosca sejam determinadas simultaneamente.

O maior problema dos sistemas optoeletrônicos é a necessidade de existência de um jogo de padrões roscados para uma correta determinação dos erros sistemáticos de medição. Porém, para o OSSAM o problema deve ser resolvido com a utilização do padrão

especial proposto neste trabalho. Além disso, nenhum outro sistema de medição tem condições, como o OSSAM, de medir todas as grandezas determinantes com uma incerteza de medição adequada, mesmo sem considerar as dificuldades apresentadas por algumas metodologias, decorrentes da necessidade de modificar o posicionamento da rosca no sistema de medição ao passar de uma medição para outra. O método de medição (óptico) em microscópios ou projetores de perfis, embora tenha condições de medir todas as grandezas, não tem uma incerteza de medição adequada para medir o ângulo e o diâmetro de flanco, além de necessitar, também, de padrões roscados para determinar as aberturas ótimas do diafragma. Aliás, com relação a este problema, é oportuno ressaltar que nenhum fabricante de sistemas óptico de medição fornece junto com o sistema de medição a curva de erros, referente as aberturas do diafragma. Esta deficiência é, em parte, justificada pelos fabricantes com a afirmação de que a curva de erros é pessoal, isto é, varia de um metrologista para outro. Esta afirmação não é correta, pois com esta afirmação estão sendo embutidos, na curva de aberturas ótimas do diafragma, os erros sistemáticos individuais de cada metrologista. Mais grave ainda do que esta omissão é a constatação de que muitos dos técnicos (de nível superior ou não) que trabalham em metrologia desconhecem a existência do erro, devido a abertura do diafragma, e consideram a mudança na abertura do diafragma um simples acessório com a finalidade única de melhorar o contraste da imagem projetada.

Para concluir, convém salientar que, por ocasião do equacionamento do problema, alguns aspectos adicionais tiveram que ser

abordados, além daqueles referentes ao sistema de medição propriamente dito. Destes, resultaram estudos cujas conclusões são apresentadas neste trabalho, em função de que não constam na bibliografia disponível sobre o assunto. Dentro deste contexto, é apresentada uma nova classificação das roscas, quanto a qualidade, mais abrangente que as pseudo-classificações existentes. Esta nova classificação tornou necessária a adoção de nova terminologia para complementar a terminologia em uso. Por fim, consta também: uma análise de todos os erros das grandezas determinantes, suas causas e efeitos; a apresentação de uma nova metodologia, mais precisa, para eliminar o erro devido ao não paralelismo do eixo da rosca com a direção de medição; e mais uma análise de todas as causas de erros, no sistema desenvolvido, e sua quantificação com vistas a determinação da incerteza de medição. Além destas análises, apresenta-se ainda um estudo detalhado sobre os critérios utilizados para a determinação do valor da incerteza de medição que seria compatível com a tolerância do objeto, com vistas a seleção do instrumento adequado.

De acordo com os resultados apresentados no capítulo 8 pode-se afirmar que o protótipo laboratorial testado atingiu, praticamente, todas as metas desejadas, apesar de todas as limitações construtivas. É de se esperar, que um sistema de medição específico, construído com todos os recursos necessários, irá superar as exigências metrológicas e operacionais mínimas para um sistema de medição de roscas de precisão.

Por fim, pode-se afirmar, em função do que foi exposto, que o

OSSAM será de grande utilidade para os laboratórios de calibração pela agilização dos serviços, pela redução dos custos e, principalmente, pela elevação da qualidade destes serviços.

10. BIBLIOGRAFIA

- /1/ McGedugh, J. A. Advanced Methods of Machining;
Chapman and Hall; London; New
York; 1988;
- /2/ Muraski, S. J. Special-Purpose Fasteners; Threa-
ded Fasteners; Machine Design;
p 59 a 86 e 117 a 128; 17/11/1988;
- /3/ Pauluci, J. Aceitação de Máquinas CNC: Como
fazer para evitar surpresas; Má-
quinas e Metais; p 54/63; 05/
1992;
- /4/ Gazzaniga, L. Roscas y Tornillos; Hoepli Edito-
rial Científico-Médica; Barcelo-
na; 1968;
- /5/ Endo, O. A new screw thread flank tester;

- Schneider, C. A. methodology; Anais do 3rd International IMEKO Symposium on Dimensional Metrology in Production and Quality Control; Aachen Alemanha; p 239 a 244; 09/1989;
- /11/ Lotze, W. A new principle, theory and software for screw thread measurement by optical two coordinate measuring systems; Anais do International IMEKO Symposium on Dimensional Metrology in Production and Quality Control; Aachen Alemanha; 09/1989;
- Will, J.
- Zhang, X.
- /12/ Viser, A. Hochgenaues Durchlicht-
Wegmeßverfahren; Feinwerk-technik & Messtechnik; p 433 a 437; 1986;
- /13/ ZEISS JENA Applikation Information; Instruments for Engineering Metrology n. 9/87; KKR Optoelectronic Measuring System; 1987;
- /14/ Reinicke, D. El nuevo aparato de medición a coordenadas ZKM 01-250 CM - um aparato automático para controlar la fabricación; Revista de Jena; p 110 a 114; n.3; 1988;
- Priplata, H.
- Möller, K. L.
- Spring, K.

- /15/ ZEISS JENA Applikation Information; Geräte der Fertigungameßtechnik 1/89; Rechnergestützte gewindemessung am DKM 01-250 CM; 1989;
- /16/ Will, H. L. Medición de Roscas en Medidores de Coordenadas; Revista de Jena; Carl Zeiss Jena; p 68 a 70; 2/1991;
- /17/ Santos Jr., M. J. Instrumentação para o Controle Dimensional de Roscas de Precisão; Projeto de Tese apresentado ao CPGEM da UFSC; 1990;
- /18/ NB 97 Rosca métrica ISO; Procedimento; 1982;
- /19/ ISO 965-1 ISO General Purpose Metric Screw Threads; Tolerances; Part 1: Principles and Basic Data; 1980;
- /20/ NBR 5876 Terminologia e simbologia de roscas; 1977;
- /21/ ISO 68 ISO General Purpose Screw Threads; Basic Profile; 1973;
- /22/ NBR 8225 Calibradores para rosca métrica ISO; Procedimento; 1983;

- /23/ DIN 3858 Whitworth Pipe Threads for Pipe Coupling; Parallel Internal Threads and Taper External Threads; Thread Dimensions; 1988;
- /24/ PB 14 Rosca Whitworth Gás; ABNT; 1970;
- /25/ BS 1083 Specification for Precision Hexagon Bolts, Screws and Nuts (B.S.W. & B.S.F. Threads); 1965;
- /26/ Schneider, C. A. Mecânica de Precisão no Brasil; Situação e Diretrizes de desenvolvimento; Fundação CERTI; 1988;
- /27/ ISO 262 ISO General Purpose Metric Screw Threads - Selected sizes for screws, bolts and nuts; 1973;
- /28/ Chernov, N. N. Máquinas Herramientas para Metales; Editorial MIR; Moscou; 1974;
- /29/ N. N. Changes in Screw Manufacturing; Wire; v. 38; n. 1; p 51 a 56; 01/1988;
- /30/ Mason, F. As Novas Tendências no Corte de Roscas; Máquinas e Metais; p 16 a 29; 05/1989;

- /31/ Mac Kenzie, R. V. Screw Threads Design, Selection, and Specification; The Industrial Press; New York; NY; 1961;
- /32/ BS 919 Specification for Screw Gauge Limits and Tolerances: Part 3: Gauges for ISO metric screw threads; 1968;
- /33/ McKee, R. L. Machining with Abrasives; Van Nostrand Reinhold Company; New York; 1982;
- /34/ Juran, J. M. Quality Control Handbook; Third Edition; McGraw-Hill Book Company; 1974;
- /35/ PTB Certificado 5.22 - 4219.30/88; Rosca M22 X 2,5; Physikalisch-Technische Bundesanstalt; 1988;
- /36/ ISO 724 Metric Screw Threads; Basic Dimensions; 1978;
- /37/ Schneider, C. A. Controle Geométrico de Máquinas Ferramentas; Apostila do CPGEM; UFSC; 1992;
- /38/ Bryan, J. B. Análise de Geometria; Quando Car-

- Carter, D. L. ro e Guia são mesmo Retos?; Máquinas e Metais; p 22 a 30; 02/1992;
- /39/ Ferraresi. D. Máquinas Operatrizes Modernas; Hoepli Editorial Científico-Médica; 7ª Edição; 1970;
- /40/ Farago, F. T. Abrasive Methods Engineering; v. 2; Industrial Press; New York; 1980;
- /41/ Mason. F. Os Tornos Bifusos Duplicam a Capacidade de Produção de Peças; Máquinas e Metais; p 14 a 33; 07/1992;
- /42/ ASTME Tool Engineers Handbook; ASTME: American Society of Tool and Manufacturing Engineers; McGraw-Hill Book Company, Inc.; 1959;
- /43/ Waeny, J. C. C. Propagação de erros; Publicação Interna nº 1; Instituto de Pesquisa Tecnológica de São Paulo; 1977;
- /44/ Schneider, C. A. Técnicas de Pesquisa Experimental; Apostila do CPGEM; UFSC; 1992;

- /45/ Berndt, G. La Tolerancia de Función y la
Hultzsch, E. Incertidunbre de las Medidas; Re-
Weinhold, H. vista de Jena; p 263 a 270; 05/
1968;
- /46/ ISO 1502 ISO General Purpose Metric Screw
Threads; Gauging; 1978;
- /47/ Judge, A. W. Engineering Precision Measure-
ments; London; Chapman & Hall
Ltd; 1950;
- /48/ Santos Jr., M. J. Metrologia Dimensional-Teoria e
Irigoyen, E. R. C. Prática; Editora da UFRGS; Porto
Alegre; 1985;
- /49/ SME Handbook of Industrial Metrology;
SME: Society of Manufacturing En-
gineers; Prentice-Hall, Inc.; New
Jersey; 1967;
- /50/ Kunzmann, H. Measurement of threads on compu-
Lerch, J. ter controlled coordinate measu-
Wäldele, F. ring machines; PTB - Communication
90; 6/80;
- /51/ Lotze, W. Principle, Theory and Software
Will, J. for a new Method of Screw Thread
Measurement by Optical Coordinate

Measuring Systems; Measurement;
v. 9; n. 4; p 153 a 166; 10-12/
1991;

/52/ Bytchkov, R. M.
Koronkevitch, V. P.
Chuguy, Yu. V.

Threads article parameter measu-
rement by spatial spectra analy-
ses; Applied Optics; v.18; n.2;
p 197 a 200; 01/1979;

/53/ Lotze, W.
Freitag, H. J.

Medicion del paso en mecanismos
de husilo a bolas com el interfe-
rómetro a láser para mediciones
lineales; Revista de Jena; p
183 a 188; n.4; 1975;

/54/ INMETRO

Relação de Serviços de Metrologia
dos Laboratórios Credenciados pe-
lo INMETRO; Rede Nacional de Ca-
libração - RNC; Xerem; Rio de Ja-
neiro; 06/1992;

/55/ Lotze, W.
Will, H. J.

Gewindegeometrie und Gewinde-
messung aus Dreidimensionaler
Sicht; Feingerätetechnik; Berlin;
p 408 a 409; 1984;

/56/ Will, H. J.

Bestimmung der Exakten Anlage-
korrektur bei der Gewindemessung,
nach den Dreidrahtverfahren;

- Feingerätetechnik; Berlin; p 197
a 199; 1990;
- /57/ DIN 2257:2 Begriffe der Längenprüftechnik;
Fehler und Unsicherheiten beim
Messen; 1974;
- /58/ ZEISS JENA Curso de Medição de Roscas; Apos-
tila da Carl Zeiss Jena/PUC-RS;
1970;
- /59/ Perucca, E. Fisica Generale e Sperimentale;
Volume 2; Torino; Unione Tipogra-
fico-Editrice Torinese; 1945;
- /60/ MITUTOYO PV Profile Projector; Catalog
n E4061; Mitutoyo MFG. Co. Ltd.;
- /61/ Bauer, G. Dispositivo de medida foto-eléc-
Erbem, A. trico para máquinas de medir em
Priplata, H. dos coordenadas; Revista de Jena;
p. 68 a 70; n. 2; 1985;
- /62/ Santos Jr., M. J. Medição do passo de calibradores
Schneider, C. A. externos roscados com medidor
optoeletrônico; X Congresso Bra-
sileiro de Engenharia Mecânica;
Rio de Janeiro; p. 439 a 442;
12/1989;

- /63/ Marshaus, B.
Schmidt, R. Sistemas de Tratamento Digital de
Imagenes para Aparatos Ópticos
Medidores de Coordenadas de Jena;
Revista de Jena; Carl Zeiss Jena;
p. 58 a 62; 2/1991;
- /64/ Cielo, P.
Vaudreuil, G. Algorithm for sub-pixel edge po-
sitioning and part sizing under co-
herent projection; Optics & Laser
Technology; v.25; p 85 a 97; 1991
- /65/ Seitz, P. Optical superresolution using so-
lid-state cameras and digital
signal processing; v. 27; n. 7;
p. 535 a 540; 07/1988;
- /66/ Mechels, S.
Young, M. Video microscope with submicrome-
ter resolution; Applied Optics;
v. 30; n. 16; p 2202 a 2211;
06/1991;
- /67/ UDT Catálogo: Planar Diffuse Silicon
PIN Photodiodes; United Detector
Technology; 1986;
- /68/ BIPM/IEC/ISO/OIML International Vocabulary of Basic
and General Terms in Metrology;
1984;

- /69/ BS 5233
Glossary of Terms used in Metrology; British Standards Institution; 1975;
- /70/ Schrader, M.
Durchlichtmikroskopische Messung der Lackschichtdicke auf dünnen Kupferlackdrähten Mikroskopie; n° 24; p. 249; 1966;
- /71/ Loquim, M.
Les erreurs de mesure au microscope; Bulletin de Microscopie; n° 6; p. 106; 1956;
- /72/ Sears, F. W.
Física; v. 3 Óptica; Editora Getum Carneiro; Rio de Janeiro; 1945;
- /73/ SIEMENS
Catálogo: Optoeletronic Semiconductors and Sensors; Siemens AG. Bereich Bauelemente; 1988;
- /74/ HEIDENHAIN
Certificado n° 20146001; Mess-taster MT-30; Taster NR 6363; Johannes Heidenhain; 1985;
- /75/ Gibra, I. N.
Probability and Statistical Inference for Scientists and Engineers; Prentice-Hall, Inc; 1973;