



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Mestrado - Doutorado

**MEDIÇÃO E ANÁLISE DE PLANEZA DE
SUPERFÍCIES METROLÓGICAS USANDO NÍVEL
ELETRÔNICO E OS MÉTODOS DE MOODY E
MALHA RETANGULAR**

por

Joab Sobreira de Andrade

Dissertação de Mestrado submetida à Universidade Federal da
Paraíba para obtenção do título de Mestre

JOAB SOBREIRA DE ANDRADE

**MEDIÇÃO E ANÁLISE DE PLANEZA DE
SUPERFÍCIES METROLÓGICAS USANDO NÍVEL
ELETRÔNICO E OS MÉTODOS DE MOODY E
MALHA RETANGULAR**

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
da Universidade Federal da Paraíba, em
cumprimento às exigências para obtenção
do Título de Mestre.

Orientador: Professor Dr. João Bosco de Aquino Silva

A553m Andrade, Joab Sobreira de.
 Medição e análise de planeza de superfícies metrológicas
 usando nível eletrônico e os métodos de Moody e malha
 retangular / Joab Sobreira de Andrade.- João Pessoa, 2015.
 121f. : il.
 Orientador: João Bosco de Aquino Silva
 Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT
 1. Engenharia mecânica. 2. Planeza. 3. Mesa metrológica.
 4. Nível eletrônico. 5. Método de Moody. 6. Grade retangular.

UFPB/BC

CDU: 621(043)

**MEDIÇÃO E ANÁLISE DE PLANEZA DE
SUPERFÍCIES METROLÓGICAS USANDO NÍVEL
ELETRÔNICO E OS MÉTODOS DE MOODY E
MALHA RETANGULAR**

por

Joab Sobreira de Andrade

*Dissertação **aprovada** em 23 de julho de 2015*

Período letivo 2015.1

Prof. Dr. José Carlos de Lima Júnior

Examinador Externo – UFPB/CT

Prof. Dr. Marcelo Cavalcanti Rodrigues

Examinador Interno – UFPB/CT

Prof. Dr. João Bosco de Aquino Silva

Orientador – UFPB/CT

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus, por estar sempre me guiando e iluminando meus caminhos, aos meus pais Geraldo Moisés de Andrade e Maria Margarida Sobreira de Andrade, à minha esposa Séfora Luana Evangelista de Andrade e à todas as pessoas que contribuíram para a minha formação.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sempre me dar força e coragem para continuar lutando e correndo atrás dos meus objetivos.

Aos meus pais Geraldo e Margarida pela educação, incentivo, dedicação e compreensão em todas as etapas de minha vida.

À minha amada esposa Séfora Luana, pela paciência e ajuda indispensáveis, pelos conselhos, compreensão e por trazer calma a minha vida nos momentos mais difíceis.

Aos meus sogros Seu Francisco e Dona Rosa pelo incentivo e confiança.

Aos meus cunhados Stefani Iury, Steniel Lucas e Sabrina Iara pelo apoio e incentivo.

Aos meus irmãos Júnior, Jussara, Héracles, Suzany e Ageu pelo apoio e incentivo.

Aos meus sobrinhos pela compreensão perante minha ausência.

Ao meu amigo Wagner Carreira Peixoto pelos ensinamentos, descontrações, ajudas e conversas na chamada “hora do café”.

Aos meus amigos do mestrado Pedro Granville, Gustavo Sá e Marlio Antônio pelo apoio, incentivo e ajuda.

Aos meus amigos do Laboratório de Engenharia de Precisão (LEP) da UFPB, Rafael, Henrique, Verilton, Pedro, Chico, Fábio e Fidelis pela força, apoio, incentivo e por compartilhar suas experiências.

Ao professor José Carlos de Lima Júnior, pelos ensinamentos, paciência, esforço e dedicação neste trabalho.

Ao professor e orientador João Bosco de Aquino Silva por sua orientação, força, incentivo, confiança e preciosos ensinamentos durante todo este período de trabalho.

À todos os professores, funcionários e amigos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

À CAPES pelo apoio financeiro.

RESUMO

As mesas metrológicas são extremamente importantes na engenharia, pois elas servem de referência primária na medição e na inspeção de peças. Tais superfícies devem estar devidamente calibradas para que se garanta alto grau de qualidade nas medições e testes de inspeção. A planeza é a característica metrológica utilizada para avaliar o grau de exatidão das mesas desempenho. Há diversas normas que tratam sobre planeza de superfícies metrológicas e estabelecem limites de tolerância ou graus de exatidão em função das dimensões das mesas desempenho. O objetivo deste estudo foi determinar a planeza e consequentemente o grau de exatidão de duas mesas metrológicas utilizadas como mesas de referência em pesquisas realizadas no Laboratório de Engenharia de Precisão (LEP) da UFPB, em acordo com a norma ISO 8512. Um nível eletrônico de precisão foi utilizado para medir as inclinações das mesas metrológicas, utilizando os já conhecidos e difundidos métodos de Moody e de grade retangular. O *Optical Analysis Software* calculou todos os desvios de planeza, exibindo-os em forma de gráfico isométrico e em quadro de valores numéricos. Os erros de fechamento calculados mostram alta qualidade na aquisição de dados de medição, pois os valores apresentados em todos os testes satisfazem a recomendação do fabricante do nível eletrônico, ou seja, os erros de fechamento não excederam 90% do pico máximo (*maximum peak*). Portanto, os resultados de planeza obtidos estão validados do ponto de vista da qualidade metrológica. Os resultados apontaram que a mesas metrológicas avaliadas pertencem ao grau de exatidão “0”, segundo a norma ISO 8512. Esta classificação é muito importante na análise e determinação de incerteza e rastreabilidade, uma vez que as mesas metrológicas servem de referência primária na obtenção de medidas e análise de tolerâncias de peças de engenharia. Adicionalmente, um sistema computacional desenvolvido para a determinação da planeza foi utilizado a fim de avaliar sua capacidade como uma alternativa de sistema para análise de dados e determinação da planeza. Seus resultados mostraram-se satisfatórios, apresentando valores confiáveis.

Palavras-chave – planeza, mesa metrológica, nível eletrônico, método de Moody e grade retangular.

ABSTRACT

Surface tables are extremely important in engineering due to the fact that they serve as a primary reference in both the measurement and inspection of workpieces. Such surfaces must be properly calibrated to provide high quality level in the measurement and inspection tests. Flatness is the metrological characteristic used to evaluate the accuracy level of the surface tables. There are several norms that deal with surface tables flatness and establish tolerance limit or accuracy degrees regarding to the surface tables dimensions. This study aims to measure and analyze the surface table flatness by using electronic level along with Moody and rectangular grid methods according to the ISO 8512 standard. An electronic level was used to measure the inclining level of the surface tables, using the well-known Moody and rectangular grid methods. The Optical Analysis Software calculated all flatness deviations, showing them in isometric and numeric charts. The calculated closure errors show the high quality in the measurement data acquisition because the values showed in all tests satisfy the electronic level manufacturer's recommendation, which means that the closure errors did not exceed 90% of the maximum peak. Therefore, the results of evaluated surface tables are validated as regards metrological quality. The results point out that the surface tables belong to the "0" accuracy degree according to the ISO 8512 norms. This classification is extremely important in the determination and analysis of uncertainty and of traceability since surface tables are primary reference to obtain tolerance measures and analysis of engineering workpieces. Additionally, a computer system developed for determining the flatness was used to assess its capacity as a system alternative for data analysis and determination of flatness. Their results were satisfactory, with reliable values.

Keywords – flatness, surface table, electronic level, Moody method and rectangular grid.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	19
APRESENTAÇÃO.....	19
1.1 INTRODUÇÃO	19
1.2 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	22
CAPÍTULO II FUNDAMENTOS E CARACTERÍSTICAS DAS MESAS METROLÓGICAS	24
2.1 INTRODUÇÃO	24
2.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS DAS SUPERFÍCIES METROLÓGICAS	24
2.3 SUPERFÍCIES METROLÓGICAS DE FERRO FUNDIDO	26
2.4 SUPERFÍCIES METROLÓGICAS DE GRANITO	28
2.4.1 Granito preto fino.....	30
2.5 USO E CUIDADOS COM SUPERFÍCIES METROLÓGICAS DE FERRO FUNDIDO E GRANITO.....	32
2.6 GRAUS DE EXATIDÃO	34
2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	36
CAPÍTULO III DEFINIÇÕES, PARÂMETROS E TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DA PLANEZA	38
3.1 INTRODUÇÃO	38
3.2 PLANEZA	39
3.3 PARÂMETROS DA PLANEZA.....	41
3.4 MEDIÇÃO DA PLANEZA	42
3.4.1 Estratégias de extração	42
3.4.1.1 Malha polar	43
3.4.1.2 Malha triangular	43
3.4.1.3 Linhas paralelas.....	44
3.4.1.4 Pontos aleatórios	45
3.4.1.5 Método de Moody ou “Union Jack”	45
3.4.1.6 Malha retangular	46
3.4.2 Técnicas de medição dos desvios de planeza	47
3.4.2.1 Sistema laser interferométrico	48
3.4.2.2 Sistema autocolimador	50
3.4.2.3 Nível eletrônico	52
3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	56
CAPÍTULO IV PRINCIPAIS FONTES DE ERRO NA MEDIÇÃO DA PLANEZA DE SUPERFÍCIES METROLÓGICAS	57

4.1 INTRODUÇÃO	57
4.2 DEFINIÇÃO DOS FATORES DE IMPACTO E SUAS INFLUÊNCIAS.....	58
4.2.1 Contribuição do equipamento de medição na determinação da incerteza	58
4.2.2 Variação de temperatura e sua influência sobre a planeza de superfícies.....	59
4.2.3 Influência da variação de temperatura sobre o equipamento de medição.....	60
4.2.4 Erro no posicionamento do equipamento de medição	61
4.2.5 Desvios causados por vibração	62
4.2.6 Impacto da poeira na superfície de medição.....	63
4.3 ERRO DE FECHAMENTO	63
4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	65
CAPÍTULO V	67
MÉTODOS MATEMÁTICOS APLICADOS NA DETERMINAÇÃO DA PLANEZA	67
5.1 INTRODUÇÃO	67
5.2 MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS (MQ)	68
5.3 MÉTODO DA ZONA MÍNIMA (ZM)	70
5.3.1 Revisão de literatura sobre métodos matemáticos aplicados na determinação da planeza.....	71
5.3.2 Modelamento matemático aplicado na determinação da planeza	74
5.4 METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA (RSM)	79
5.4.1 Modelamento da técnica RSM para uma superfície	81
5.5 COORDENADAS CODIFICADAS.....	83
5.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	84
CAPÍTULO VI	85
6.1 INTRODUÇÃO	85
6.2 MATERIAIS	85
6.2.1 Mesas metrológicas.....	85
6.2.2 Nível eletrônico - <i>Talyvel</i> 5	85
6.2.3 Base ajustável.....	88
6.2.4 <i>Optical Analysis Software (OAS)</i>	88
6.3 PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO	91
6.4 RESULTADOS, ANÁLISES E DISCUSSÕES	93
6.4.1 Resultados a partir do <i>Optical Analysis Software (OAS)</i>	93
6.4.1.1 Análise e discussões dos resultados obtidos pelo OAS.....	101
6.4.2 Resultados a partir do sistema desenvolvido por Lima Jr. (2003).....	103

6.4.2.1 Análise e discussões dos resultados obtidos pelo sistema proposto por Lima Jr. (2003).....	108
6.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	109
CAPÍTULO VII.....	111
7.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	111
7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	112
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	114
APÊNDICE A	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Propriedades de alguns tipos de granito.....	31
Tabela 2.2 - Tolerâncias de acordo com o grau de exatidão de mesas metrológicas fabricadas com granito ou ferro fundido.....	35
Tabela 2.3 - Valores das constantes c_1 e c_1	36
Tabela 6.1 – Resultados de planeza para as Mesas 1 e 2, utilizando o modo normal.....	97
Tabela 6.2 – Resultados de planeza para as Mesas 1 e 2, utilizando o modo nivelado.....	101
Tabela 6.3 – Excerto da Tabela 2.2 (Tolerâncias de acordo com o grau de exatidão de mesas metrológicas fabricadas com granito ou ferro fundido).....	102
Tabela 6.4 – Desvios de planeza para o método dos mínimos quadrados.....	107
Tabela 6.5 – Desvios de planeza para o método da zona mínima.....	107
Tabela 6.6 – Desvios de planeza para o método <i>RSM</i> de segunda ordem.....	108
Tabela 6.7 – Resultados de planeza.....	108
Tabela A.1 – Resultados de medição – Mesa 2.....	120

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Superfície metrológica e manufatura.....	19
Figura 2.1 - Máquina de medir por coordenadas.....	25
Figura 2.2 - Mesa metrológica de ferro fundido.....	26
Figura 2.3 - Desenho de mesa desempenho metálica com nervuras.....	27
Figura 2.4 - Mesa metrológica de granito.....	28
Figura 2.5 - Acabamento em superfícies de trabalho de mesas desempenho de granito e ferro fundido.....	30
Figura 2.6 - Cobertura para mesas de granito.....	33
Figura 3.1 – Planos de referência da zona mínima.....	40
Figura 3.2 – Plano de referência dos mínimos quadrados.....	40
Figura 3.3 - Estratégia de extração utilizando malha polar.....	43
Figura 3.4 - Estratégia de extração utilizando malha triangular.....	44
Figura 3.5 - Estratégia de extração com linhas paralelas.....	45
Figura 3.6 - Estratégia de extração por pontos.....	45
Figura 3.7 - Estratégia de extração utilizando o padrão de Moody.....	46
Figura 3.8 – Estratégia de extração utilizando malha retangular.....	47
Figura 3.9 – Sistema laser interferométrico.....	48
Figura 3.10 – Configuração usual do interferômetro na calibração de mesas metrológicas.....	49
Figura 3.11 – Sistema laser interferométrico.....	50
Figura 3.12 – Lente colimadora.....	50
Figura 3.13 – Espelho refletor inclinado.....	51
Figura 3.14 – Sistema autocolimador.....	51
Figura 3.15 – Sistema de referência para a inclinação do nível eletrônico.....	53
Figura 3.16 – Representação de n medidas de inclinação sobre uma mesa desempenho utilizando nível eletrônico.....	55
Figura 3.17 – Relação trigonométrica para determinação da altura correspondente ao valor de inclinação.....	55
A Figura 3.17 – Indicação da inclinação e altura correspondente.....	56
Figura 4.1 – Erro causado pelo posicionamento impreciso do nível eletrônico.....	61
Figura 4.2 – Erro de fechamento.....	64
Figura 5.1 - Conjunto de pontos e a curva C que melhor se ajusta a eles.....	68
Figura 5.2 – Tomada de pontos de acordo com o modelo: (a) 3-1 e (b) 2-2.....	74
Figura 5.3 - Conjunto de pontos para determinação da zona mínima: (a) zona qualquer que delimita o conjunto de pontos; (b) solução inicial para a zona mínima.....	76
Figura 5.4 – Resultados da zona mínima: (a) após rotação; (b) ângulo correspondente a distância entre planos e que delimita a zona mínima.....	78
Figura 6.1 – Unidade de nível.....	86
Figura 6.2 – Unidade de <i>display</i>	86
Figura 6.3 – Base ajustável.....	88
Figura 6.4 – Direções de medição referentes à malha retangular.....	89

Figura 6.5 – Traçagem de Moody.....	92
Figura 6.6 – Traçagem da malha retangular.....	93
Figura 6.7 - <i>Setup</i> do sistema de medição – nível eletrônico, <i>Talyvel</i> 5.....	93
Figura 6.8 - Gráfico isométrico para o método Union Jack - Mesa 1.....	94
Figura 6.9 - Certificado para o método Union Jack - Mesa 1 (valores em μm).....	94
Figura 6.10 - Gráfico isométrico para o método de malha retangular - Mesa 1.....	95
Figura 6.11 - Certificado para malha retangular - Mesa 1 (valores em μm).....	95
Figura 6.12 - Gráfico isométrico para o método Union Jack - Mesa 2.....	96
Figura 6.13 - Certificado para o método Union Jack - Mesa 2 (valores em μm).....	96
Figura 6.14 - Gráfico isométrico para o método de malha retangular – Mesa 2.....	96
Figura 6.15 - Certificado para malha retangular - Mesa 2 (valores em μm).....	97
Figura 6.16 - Gráfico isométrico para o método Union Jack, modo nivelado - Mesa 1.....	98
Figura 6.17 - Certificado para o método Union Jack, modo nivelado - Mesa 1 (valores em μm).....	98
Figura 6.18 - Gráfico isométrico para o método de malha retangular, modo nivelado - Mesa 1.....	98
Figura 6.19 - Certificado para malha retangular, modo nivelado - Mesa 1 (valores em μm).....	99
Figura 6.20 - Gráfico isométrico para o método Union Jack, modo nivelado - Mesa 2.....	99
Figura 6.21 - Certificado para o método Union Jack, modo nivelado - Mesa 2 (valores em μm).....	100
Figura 6.22 - Gráfico isométrico para o método de malha retangular, modo nivelado - Mesa 2.....	100
Figura 6.23 - Certificado para malha retangular, modo nivelado - Mesa 2 (valores em μm).....	101
Figura 6.24 – Plano dos mínimos quadrados.....	105
Figura 6.25 – Planos da zona mínima.....	106
Figura 6.26 – Superfície obtida pelo método RSM de 2º ordem.....	106

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ACO	<i>Ant colony optimization</i>
BS	<i>British Standard</i>
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
FM	Faixa de medição
GA	<i>Genetic algorithm</i>
IEA	<i>Immune evolutionary algorithm</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
JIS	<i>Japanese Industrial Standards</i>
LEP	Laboratório de Engenharia de Precisão
LSPL	<i>Least squares reference plane</i>
MMC	Máquina de Medição por Coordenada
MQ	Mínimos quadrados
MZPL	<i>Minimum zone reference planes</i>
OAS	<i>Optical Analysis Software</i>
PSO	<i>Particle swarm optimization</i>
RSM	<i>Response Surface Methodology</i>
UFPB	Universidade Federal da Paraíba
ZM	Zona mínima
°C	Graus celsius
mm	Milímetros
µm	Micrometros
N	Newton
kg	Quilograma
K	Kelvin
m	Metros
<i>t</i>	Tolerância do desvio de planeza.
c_1, c_2	Constantes em função do grau de exatidão da mesa desempenho
<i>l</i>	Comprimento nominal da diagonal da mesa metrológica
ΔF_{rms}	Raiz quadrada média do desvio de planeza
ΔF_i	Desvio de planeza local
<i>A</i>	Área da superfície da característica planeza

f_1, f_2	Frequências de luz
E_1, E_2	Unidades detectoras de sinal
Hz	Hertz
df_1, df_2	Desvios de <i>Doppler</i>
θ	Ângulo de reflexão em espelho inclinado
f	Distância focal
O	Origem do sistema focal
O'	Ponto de convergência dos feixes de luz após reflexão
C	Contribuição comum de todos os fatores de impacto de incerteza
F_n	Fator de impacto n na incerteza de medição
arcseg	Arco de segundos
ΔT_{max}	Maior diferença de temperatura entre os planos superior e inferior da mesa desempeno
ΔT_{min}	Menor diferença de temperatura entre os planos superior e inferior da mesa desempeno
ΔT_{DT}	Variação ou desvio de temperatura que influencia na medida da planeza
z_T	Maior desvio de retilineidade em uma determinada linha de medição causada por variação de temperatura
L	Comprimento da mesa desempeno
β	Coeficiente de expansão térmica do material que é feita a superfície metrológica
e	Espessura da mesa metrológica
I	Desvio causado pela mudança de temperatura
ΔT_{amb}	Variação na temperatura ambiente
L_p	Desvio de inclinação
n_p	Erro de posicionamento
L_{pl}	Comprimento base do nível eletrônico
in	Polegada
mV	Milivolt
(X_i, Y_i, Z_i)	Conjunto de coordenadas do ponto P_i
Y_{curva}	Valor de Y obtido da curva de regressão
Y_{medido}	Valor de Y medido

D, ε	Erro ou desvio de medição
Σ	Somatório
$a_0, a_1 \text{ e } a_2$	Coeficientes do plano dos mínimos quadrados
Z_{MQ}	Coordenada Z do plano dos mínimos quadrados
P_1, P_2, P_3, P_4	Pontos espaciais representados por um conjunto de três valores coordenadas
$Z_{superior}$	Coordenada Z do plano superior da zona mínima
$Z_{inferior}$	Coordenada Z do plano inferior da zona mínima
$a, b, c_{inferior}, c_{inferior}, d$	Constantes a serem determinados para a obtenção dos planos que definem a zona mínima
F	Denominação para um plano ideal
$F_{\theta, \phi}$	Denominação para um plano ideal em coordenadas esféricas
θ, ϕ	Ângulos de rotação em torno dos eixos X e Y respectivamente
$\rho_{\theta, \phi}$	Distância normal à origem do sistema cartesiano para cada ponto coordenado (X_i, Y_i, Z_i)
$d(P_i, F)$	Distância do ponto P_i ao plano F
$d_{\theta, \phi}$	Diferença entre d_{max} e d_{min}
d_{max}	Máxima distância entre um ponto e o plano em cada rotação incremental
d_{min}	Mínima distância entre um ponto e o plano em cada rotação incremental
y_i	Variável dependente
x_i	Variável independente
i	i-ésimo ponto
X^t	Matriz transposta de X
X	Matriz das variáveis independentes
B	Matriz dos coeficientes b_0 e b_1
Y	Matriz das variáveis dependentes
x_i, y_i, z_i	Coordenadas i correspondente às equações da RSM
$b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5$	Constantes correspondentes às equações da RSM
X_c, Y_c	Coordenadas codificadas

$X_{m\acute{a}x}$	Maior valor ao longo de x
$Y_{m\acute{a}x}$	Maior valor ao longo de y
$X_{m\acute{i}n}$	Menor valor ao longo de x
$Y_{m\acute{i}n}$	Menor valor ao longo de y
X_i	Coordenada x no ponto i
Y_i	Coordenada y no ponto i

CAPÍTULO I

APRESENTAÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o estudo da rugosidade de superfícies de peças mecânicas tem sido de extrema importância. Isto reside no fato de que o nível da rugosidade superficial influencia no desempenho de peças de engenharia e depende fortemente das propriedades envolvidas no processo de fabricação e do projeto da parte a ser manufaturada (WHITEHOUSE, 1997).

Existem dois ingredientes básicos envolvidos na fabricação de uma peça, o processo de fabricação e a máquina-ferramenta ou técnica de produção. A Figura 1.1 apresenta como esses ingredientes básicos se relacionam com a superfície metrológica.

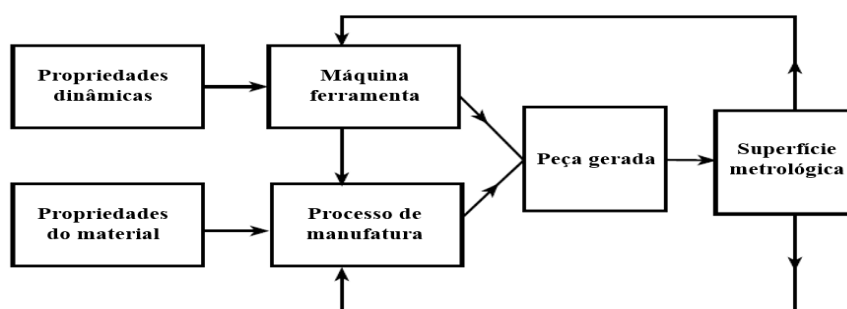


Figura 1.1 – Superfície metrológica e manufatura.

Fonte: WHITEHOUSE, 1997.

A medição de superfície foi considerada largamente irrelevante nos primórdios do advento dos processos de fabricação, apenas recentemente é que superfícies metrológicas tornaram-se abrangente o suficiente para ser usado como uma ferramenta de diagnóstico. Porém, passou a ser evidente que o acabamento de superfícies era extremamente sensível a quaisquer mudanças no processo. Por isso, tornou-se lógico pensar que a medição da superfície poderia ser usada para controlar o processo de fabricação. Argumentava-se que se o parâmetro de superfície a ser medido mantivesse constante de peça a peça manufaturada, o processo estaria sob controle. Qualquer alteração nos parâmetros de

superfície deve iniciar uma avaliação dos parâmetros do processo (WHITEHOUSE, 1997).

Atualmente a economia capitalista que prevalece no comércio mundial gera um ambiente competitivo, o qual tem impulsionado o advento de tecnologias correlacionadas à produtividade industrial. Muitos países tem investido de forma veemente em novas tecnologias e na automação de processos de manufatura e inspeção, buscando aumentar a produtividade, qualidade e reduzir custos em peças manufaturadas (MAGALHÃES, 2006).

Segundo Magalhães (2006), o controle de qualidade de peças em engenharia é uma das fases mais relevantes na fabricação de um produto. Esta etapa consiste em tomar medições de peças manufaturadas e compará-las aos valores especificados em projeto. Medições das tolerâncias de forma, orientação e posição são também mensurados e comparados a valores padronizados em desenho mecânico a fim de garantir funcionalidade e, em diversas vezes, a intercambiabilidade.

A importância do controle da planeza pode ser evidenciada em várias aplicações industriais como, por exemplo: encaixe de peças, contato entre superfícies, mesas de montagens, elementos de máquinas, instrumentos de medição mecânica, instrumentos óticos usados na medicina, odontologia, astronomia, entre outros. Determinar o quão inexato é um plano é de grande interesse na construção de máquinas-ferramenta, nas quais o assento de carros e caixas de engrenagem sobre guias e mesas de fixação de peças sofrem enorme influência na exatidão exigida da máquina.

As mesas metrológicas ou mesas desempenho são extremamente importantes em engenharia de precisão, sendo utilizadas principalmente como superfície de referência em inspeções de componentes de engenharia e como superfície de trabalho em máquinas ferramentas (HUANG *et al.*, 1993). São fabricadas geralmente em granito devido suas características peculiares como alta resistência ao desgaste, grande resistência à corrosão e baixo coeficiente de dilatação térmica. A avaliação do desvio de planeza é essencial para o controle dimensional de peças e para qualificar uma superfície como referência primária.

Muitas técnicas têm sido propostas para medir a planeza de superfícies metrológicas em função de suas dimensões e qualidade (HUME, 1963). Para realizar a calibração de mesas metrológicas de granito, Zahwi *et al.* (2013) utilizaram autocolimadores, sistema laser e máquina de medir por coordenadas (MMCs).

A exatidão dos processos de medição e da montagem que utilizam as superfícies ou mesas metrológicas, ou simplesmente desempenos, como referência primária depende fortemente de sua planeza. Caso a referência esteja fora das especificações, torna-se fugaz e irrelevante a utilização de instrumentos sofisticados e de altíssima exatidão.

A busca das indústrias por tolerâncias cada vez mais apertadas em peças de engenharia tem chamado a atenção de pesquisadores em todo o mundo na procura de equipamentos capazes de medir com exatidão minúsculas variações de comprimento. Neste contexto, o plano de referência primária utilizado na determinação de características metrológicas tem grande importância uma vez que fornece a base para medições de inspeção em peças de manufatura, logo devem apresentar o mais alto grau de exatidão.

As mesas metrológicas de referência geralmente devem passar por calibração periódica, normalmente a cada seis meses, avaliando seu grau de exatidão de planeza, comparando seus valores de planeza com valores fornecidos em normas específicas. Isto é necessário, pois o grau de exatidão da mesa pode ser comprometida em virtude de desgastes que ocorrem na superfície de trabalho das mesas ocasionadas por ferramentas e peças quando não manuseadas com cuidado (LASER MEASUREMENT SYSTEM APPLICATION NOTE, 2015).

Considerando a importância da medição da planeza de mesas metrológicas na fabricação e inspeção de peças de engenharia, no intuito de permitir um diagnóstico exato, evitando assim o refugo ou perda de um produto acabado dentro das especificações de projeto, neste trabalho de dissertação, as planezas de duas mesas metrológicas de granito distintas foram determinadas utilizando nível eletrônico e os métodos de Moody e de malha retangular, com o intuito de realizar uma análise comparativa entre os dois métodos empregados, apontando suas principais características.

1.2 OBJETIVO GERAL

Analisar os principais métodos aplicados na medição e determinação da planeza de superfícies metrológicas no sentido de estabelecer seus graus de exatidão.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Apresentar os principais materiais de fabricação e características das superfícies metrológicas;
- Apresentar os principais parâmetros de planeza, técnicas de extração de pontos e coleta de dados e equipamentos de medição de inclinação;
- Apresentar as principais fontes de erro na determinação da planeza de superfícies;
- Discutir acerca dos principais métodos matemáticos empregados na determinação dos parâmetros de planeza;
- Determinar a planeza de mesas metrológicas utilizando nível eletrônico de precisão;
- Classificar quanto ao grau de exatidão, segundo literatura pertinente, duas mesas metrológicas de granito pertencentes ao Laboratório de Engenharia de Precisão (LEP) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB);
- Utilizar o programa de determinação da planeza desenvolvida por Lima Jr. (2003) a fim de avaliar sua capacidade como uma alternativa de sistema para análise de dados de medição.

1.2 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O corrente trabalho de dissertação está organizado em sete capítulos, sendo cada um destes apresentando os seguintes conteúdos:

- **Capítulo II:** Descreve os principais fundamentos e características das mesas metrológicas, conceituando, inicialmente, as superfícies metrológicas, ressaltando sua normatização e importância de uso para a indústria. Em seguida, descreve o uso e cuidados com superfícies metrológicas de ferro fundido e granito, explicitando os graus de exatidão das mesmas.
- **Capítulo III:** Descreve o significado do termo planeza, definições e apresentação dos principais parâmetros e planos de referência associados a esta característica metrológica. Ao final, é abordado as principais estratégias de extração de dados,

técnicas e instrumentos de medição utilizados na determinação e avaliação da característica planeza.

- **Capítulo IV:** Apresenta as principais fontes de erro na determinação da planeza de superfícies metrológicas, sobretudo, com a utilização de nível eletrônico como sistema de medição. Inicialmente discute sobre a definição dos principais fatores de impacto e suas influências, explicitando a variação de temperatura e sua influência sobre a planeza de superfícies, o erro no posicionamento do equipamento, os desvios causados por vibração, o impacto da poeira na superfície de medição e, por fim, o erro de fechamento.
- **Capítulo V:** Apresenta os principais métodos matemáticos empregados na determinação da característica planeza, destacando-se o método dos mínimos quadrados (MQ) e o método da zona mínima (ZM). Ao fim, é exposto um método de regressão recente, denominado metodologia de superfície de resposta (*RSM*), o qual foi utilizado para a obtenção de uma superfície de regressão e de referência, aplicada na determinação dos desvios de planeza.
- **Capítulo VI:** Especifica os materiais utilizados nos ensaios de calibração de mesas metrológicas realizados neste trabalho. Relata todo o procedimento de medição adotado, desde a limpeza das superfícies metrológicas até a obtenção dos dados de inclinação mensurados. Posteriormente, todos os resultados conseguidos são exibidos, tanto graficamente como em tabela de resultados (certificados), mostrando os erros de planeza calculados. Finalmente, realiza-se a análise e discussão acerca dos resultados obtidos.
- **Capítulo VII:** Apresenta as conclusões deste trabalho de dissertação e algumas propostas para trabalhos futuros.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS E CARACTERÍSTICAS DAS MESAS METROLÓGICAS

2.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão abordados os principais fundamentos e características das mesas metrológicas, conceituando, inicialmente, as superfícies metrológicas, ressaltando sua normatização e importância de uso para a indústria. Em seguida descreve-se as principais características das superfícies metrológicas de ferro fundido, das superfícies metrológicas de granito, especificando, em outro tópico, o granito preto fino. Por fim, será descrito o uso e cuidados com superfícies metrológicas de ferro fundido e granito, explicitando os graus de exatidão das mesmas.

2.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS DAS SUPERFÍCIES METROLÓGICAS

As superfícies planas estão entre as formas básicas em sistemas de medição geométrico. Superfícies metrológicas são encontradas em laboratórios e indústrias onde medições com elevada exatidão geométrica são requeridas, fazendo com que a determinação de desvios de planeza seja uma tarefa de fundamental importância na metrologia dimensional (HAITJEMA; MEIJER, 1993).

As mesas metrológicas ou mesas desempenho são extremamente importantes em engenharia de precisão, sendo utilizadas principalmente como superfície de referência em inspeções de componentes de engenharia e superfície de trabalho em máquinas ferramentas (HUANG et al., 1993).

As superfícies metrológicas são ferramentas comuns na indústria de manufatura e muitas vezes se encontram permanentemente ligadas a dispositivos de inspeção robotizados, tais como uma Máquina de Medição por Coordenadas (MMCs). A Figura 2.1 mostra uma mesa metrológica de granito compondo uma MMC.

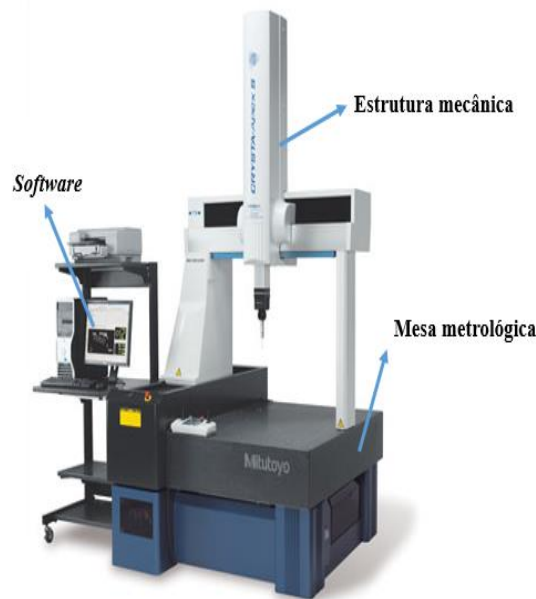


Figura 2.1 - Máquina de medir por coordenadas.

Fonte: MITUTOYO, 2015.

As superfícies metrológicas são fabricados geralmente em ferro fundido ou granito. A escolha do tipo de material depende da condição de uso, todavia, outros materiais podem ser utilizados, desde que cumpram os requisitos de qualidade e exatidão especificados em normas, dentre as quais se destacam:

- Inglesa BS 817 (1988);
- Japonesa JIS B7512 e B7513 (1993);
- Alemã DIN 876 (1972);
- Norte Americanas GGG-P-463-C (1977) e ISO 8512 (1990).

A primeira parte da norma ISO 8512 (1990) especifica os requisitos necessários para mesas metrológicas de ferro fundido, de forma retangular ou quadrada, com dimensões de 160 mm x 100 mm até 2500 mm x 1600 mm, seguindo um padrão de tamanhos preferidos, classificando-os em quatro graus de exatidão, denotados por 0, 1, 2, e 3. Já a segunda parte da referida norma, trata dos mesmos aspectos supracitados, porém relativos às mesas de desempenho fabricadas em granito.

2.3 SUPERFÍCIES METROLÓGICAS DE FERRO FUNDIDO

Antes da segunda guerra mundial, quase todas as superfícies metrológicas eram feitas de ferro fundido, com as nervuras usadas para aumentar a rigidez e assim reduzindo a deflexão. O ferro fundido foi envelhecido para reduzir a tensão interna do metal e diminuir a probabilidade de torção ou deformação ao longo do tempo.

Superfícies de ferro fundido são frequentemente usadas no chão de fábrica como uma ferramenta para lapidação de superfícies metrológicas de granito com objetivo de atingir determinados níveis de precisão. O metal fundido é fácil de ser trabalhado, sendo utilizado para compor a configuração de um sistema de lapidação. Neste processo, a mesa de ferro fundido serve como referência, fazendo-a deslizar sobre a mesa de granito, de tal forma que a exatidão de referência é conseguida quando há a formação de um colchão de ar na interface granito-ferro fundido, de modo que o metal fundido se move sobre a mesa de granito, sem ação de força externa. A Figura 2.2 mostra uma mesa desempeno feita em ferro fundido.



Figura 2.2 - Mesa metrológica de ferro fundido.

Fonte: ALFA, 2013.

A principal desvantagem da utilização do ferro fundido em mesas desempeno é sua grande capacidade de dilatação térmica quando submetido à variações de temperatura, devido seu alto valor de coeficiente de expansão térmica (em torno de $1,1 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$). Em contrapartida, o ferro fundido tem propriedades ópticas muito uniformes e profundidade de penetração da luz é muito pequena, o que o torna um material favorável para certas aplicações ópticas (ZEBRA OPTICAL, 2015).

O ferro fundido simples ou em forma de ligas, utilizado na fabricação de mesas metrológicas, deve apresentar boa qualidade superficial e granulação fina. O material deve ser uniforme, livre de impurezas e porosidades. Mesas feitas em ferro fundido, com

graus de exatidão igual a 2 e 3, podem ser reparadas utilizando apenas um material de composição semelhante ao da mesa (ISO 8512-1, 1990).

Após fundido e usinado, as mesas de grau de exatidão 0 e 1, com dimensões a partir de 400 mm x 250 mm, devem passar por tratamento adequado de alívio de tensões antes do acabamento final. Recomenda-se um tratamento para alívio de tensões também em mesas de outros graus de exatidão, porém instalações com este propósito não estão disponíveis. Em geral, a estabilidade é conseguida através do envelhecimento natural do material (ISO 8512-1, 1990).

A norma ISO 8512-1 (1990) especifica que superfícies metrológicas de ferro fundido devem ser fabricadas com nervuras e a profundidade total adequadas, isto é, a espessura combinada da parte superior (superfície de trabalho) e a profundidade da moldação, deve ser tal que, quando uma carga concentrada é aplicada sobre o centro da mesa, a área carregada não deve fletir abaixo da área remanescente, ou inicial, por mais que $1 \mu\text{m}/200 \text{ N}$. Este valor limite é aplicado para mesas desempenho com dimensões a partir de 400 mm x 250 mm. A Figura 2.3 exhibe o desenho de uma mesa desempenho de ferro fundido, detalhando a disposição das nervuras.

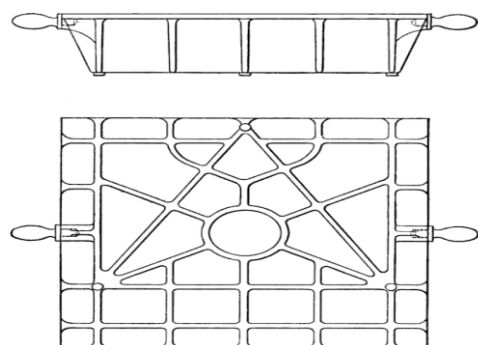


Figura 2.3 - Desenho de mesa desempenho metálica com nervuras.

Fonte: WIKIPEDIA, 2015.

O acabamento da superfície de trabalho das mesas desempenho de ferro fundido, com graus de exatidão 0 e 1, deve ser realizado através de rasqueteamento¹ ou processo similar que obtenha um mesmo resultado de qualidade dimensional. Mesas com graus 2

¹ Processo manual de acabamento realizado com uma ferramenta chamada rasquete, que tem por finalidade diminuir a rugosidade superficial.

e 3 podem ter acabamento por usinagem em retífica, além do processo de rasqueteamento (ISO 8512-1, 1990).

2.4 SUPERFÍCIES METROLÓGICAS DE GRANITO

A Terra oferece uma grande variedade de granito, remanescente no solo desde milhares de anos atrás. Porém, isto não significa que toda esta gama de material está disponível para uso. Por exemplo, rochas de granito poroso e que absorvem umidade não são adequadas para compor mesas metrológicas, pois tais características influenciam diretamente na estabilidade e durabilidade das superfícies metrológicas (PRÄZISIONSTECHNIK SCHLITT, 2015).

Estruturalmente, o granito utilizado em mesas metrológicas deve satisfazer algumas qualificações, ligadas a três propriedades importantes: durabilidade, estabilidade e exatidão (PRÄZISIONSTECHNIK SCHLITT, 2015). A Figura 2.4 ilustra uma mesa metrológica de granito sobre suporte metálico.



Figura 2.4 - Mesa metrológica de granito

Fonte: MITUTOYO, 2015.

As superfícies metrológicas cerâmicas devem ser fabricadas com rochas de alta estabilidade, trabalháveis mecanicamente e com alta resistência ao desgaste. Rochas ígneas como o diabásio, gabro e vários outros granitos estão disponíveis. Todos eles são comumente referidos, simplesmente, como “granito”. Geralmente, os granitos são

nomeados em função de sua coloração, existindo os granitos preto africano, preto fino, rosa, impala, cinza Kuru, dentre outros.

A norma ISO 8512-2 (1990), cita que o granito utilizado em superfícies metrológicas deve apresentar granulação fina e textura uniforme, ser livre de fissuras, falhas superficiais e inclusões de materiais deformáveis. Depois de fabricados, não é permitido o reparo de defeitos de fabricação sobre a superfície superior das mesas metrológicas. A cor do granito, que depende da composição do material, não é um fator de extrema importância, porém recomenda-se que a cor seja a mais uniforme possível.

Algumas propriedades físicas gerais de granito utilizado em superfícies metrológicas são listadas no anexo E da norma ISO 8512-2 (1990). Algumas dessas características são:

- Densidade: de $2,5 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ a $3 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$;
- Limite de resistência a tração: de 7 N/mm^2 a 35 N/mm^2 ;
- Limite de resistência a compressão: de 100 N/mm^2 e 300 N/mm^2 ;
- Coeficiente de porosidade: de 1% a 1,5%;
- Coeficiente de molhabilidade: de 1% a 3%;
- Coeficiente linear de expansão térmica: de $2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ a $5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

A espessura da mesa metrológica de granito deve ser tal que, quando uma carga concentrada é aplicada sobre o centro da superfície, a área carregada não deve fletir abaixo da área remanescente ou inicial por mais que $1 \text{ }\mu\text{m}/200 \text{ N}$. Este valor limite é aplicado para mesas desempenho com dimensões a partir de $400 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$ (ISO 8512-2, 1990).

O topo ou superfície de trabalho de mesas desempenho de granito deve passar por acabamento de lapidação. Todavia, qualquer item a ser colocado sobre a superfície de trabalho não deve riscá-la, pois isto comprometerá sua exatidão (ISO 8512-2, 1990).

A norma ISO 8512-2 (1990), cita que mesas metrológicas em geral, devem apresentar três pontos de apoio, contudo, mesas com dimensões maiores que $1000 \text{ mm} \times 630 \text{ mm}$ devem apresentar apoios extras de segurança, situados dentro da área correspondente a superfície de trabalho, para minimizar a deflexão. A configuração dos apoios pode afetar o desvio de planeza da superfície de referência.

As superfícies metrológicas de granito tem muitas vantagens sobre as mesas feitas de ferro fundido, dentre as quais se destacam: a alta dureza, chegando a mais de duas vezes a dureza do ferro fundido; e as alterações mínimas na dimensão devido a variações de temperatura. Além de livres de rebarbas ou saliências, conforme Figura 2.5 abaixo, devido à estrutura de grão fino e aderência insignificante que assegura um elevado grau de planeza ao longo de uma vida útil longa e não causa danos a outras partes ou instrumentos (MITUTOYO, 2015).

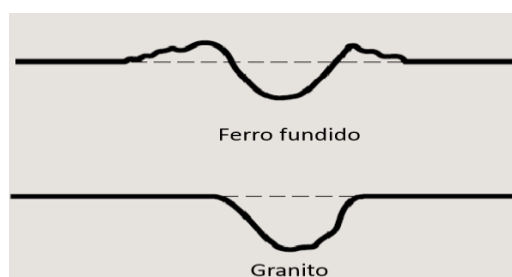


Figura 2.5 - Acabamento em superfícies de trabalho de mesas desempenho de granito e ferro fundido.

Fonte: MITUTOYO, 2015.

O preto fino é um dos tipos de granito mais utilizado, cujas especificidades e características serão descritos na seção 2.4.1.

2.4.1 Granito preto fino

As informações aqui exibidas foram extraídas do catálogo de equipamentos da empresa PRÄZISIONSTECHNIK SCHLITT (2015).

O granito tem uma estrutura muito refinada e homogênea, com grãos de tamanho abaixo de 1 mm. Já o granito preto normal, cinza ou rosa tem um tamanho de grão que varia entre 2 e 3 mm. Os cristais duros de granito normal são irregulares, com espaços entre grãos que o tornam fracos e porosos.

A alta homogeneidade do granito preto fino, com densidade 20% maior do que o granito normal, resulta em uma dureza, geralmente em torno de 6,5 a 7 na escala Mohs, garantindo longevidade e o mais alto grau concebível de exatidão e planeza.

O granito preto fino é duas vezes melhor que o granito normal devido a forma direcional dos cristais que formam sua estrutura, promovendo assim uma elevada

resistência à flexão. Por exemplo, para obter a mesma resistência à flexão com o granito normal, a mesa metrológica deveria ser 44% mais espessa. Portanto, o granito preto fino é fundamentalmente insensível à sobrecarga mecânica.

A absorção de umidade do granito preto fino é reduzida à metade quando comparado com a capacidade de absorção de umidade do granito normal. Instrumentos de medição e equipamentos de inspeção que são montados em mesas de granito normal podem enferrujar devido à característica higroscópica dessas mesas. Mesas de granito preto fino são uma base livre de corrosão para equipamentos de medição e inspeção.

Devido a um baixo coeficiente de expansão, o granito preto fino sofre baixa deformação devido a variações de temperatura. A temperatura desigual, inevitáveis em locais de trabalho e em salas de medição, causa deformação e distorção na superfície metrológica, e como resultado, influencia na exatidão da superfície. Esta característica é mais crítica no granito normal, pois este apresenta maior coeficiente de expansão. A Tabela 2.1 mostra algumas propriedades de tipos de granito, cuja análise justifica a superioridade do granito preto fino em relação aos demais tipos.

Tabela 2.1 Propriedades de alguns tipos de granito.

Tipo de granito:	Preto africano	Preto fino	Impala	Cinza Kuru
Módulo de elasticidade (N/mm²)	70000	100000	74350	52000
Densidade (kg/dm³)	2,85	3,1	2,67	2,66
Resistência à flexão (N/mm²)	23	38	21,5	24,5
Coeficiente de expansão (10⁻⁶ mm/K)	7	5	6,8	-
Poder de absorção (%)	0,09	0,11	0,35	0,11
Dureza (escala Mohs)	4,5 - 5,5	6,5 – 7	5 – 6	6,1
Limite de pressão (N/mm²)	230	280	188	297
Coeficiente de atrito	0,26	-	0,18	-

Observação: Todos os valores indicados são valores médios e o granito é um material natural, logo desvios podem sempre ocorrer.

Fonte: PRÄZISIONSTECHNIK SCHLITT, 2015

O granito preto fino apresenta as vantagens de ser totalmente livre de corrosão, não-magnético e dielétrico. As suas superfícies podem ser facilmente limpas. Apresenta

superfícies foscas e, portanto, não-reflexivas e baixo coeficiente de atrito, permitindo um deslizamento suave de equipamentos e acessórios de medição. Devido à grande exatidão de planeza e alta densidade da superfície superior de mesas desempenho, um colchão de ar pode ser criado na interface mesa-peça, onde peças e ferramentas de medição podem deslizar muito facilmente.

Uma grande capacidade de carga é criada através do processo de micro lapidação de alta exatidão da área da superfície de trabalho. Por meio de polimento fino da superfície, boas qualidades de deslizamento, durabilidade e exatidão necessárias são alcançadas.

Equipamentos de medição de alta exatidão fornecem medidas com boa exatidão graças a um trabalho manual cuidadoso, pelo qual se atinge a máxima exatidão de planeza. A máxima exatidão, por exemplo, de planeza, de superfícies e peças de granito, só são conseguidas através do trabalho de acabamento à mão. Logo, o processo de lapidação à mão ainda não é substituível.

2.5 USO E CUIDADOS COM SUPERFÍCIES METROLÓGICAS DE FERRO FUNDIDO E GRANITO

As informações aqui exibidas foram extraídas da norma ISO 8512-1 e 8512-2 (1990).

As mesas metrológicas devem estar localizadas em um ambiente com temperatura e humidade controladas. Devem ser protegidas contra a incidência de luz solar direta e correntes de ar, que podem gerar gradientes de temperatura verticais indesejáveis, de tal modo que as superfícies inferior e superior da mesa desempenho se encontrem em temperaturas dissimilares, o que afetaria a exatidão das mesas metrológicas. Por exemplo, a diferença de 1 °C entre as superfícies de trabalho e inferior, numa mesa metrológica de 1000 mm de comprimento e 250 mm de espessura, pode causar uma distorção em torno de 5 µm em mesas fabricadas em ferro fundido. Este valor representa 80% da tolerância total de mesas metrológicas fabricadas com dimensões de 1000 mm x 630 mm e grau 0. Em mesas de granito, a distorção giraria em torno de 1 µm, representando 16% da tolerância total de mesas metrológicas fabricadas com dimensões de 1000 mm x 630 mm e grau 0.

A espessura considerável de uma superfície metrológica de granito e sua baixa condutividade térmica fazem com que o equilíbrio térmico seja atingido após um período de tempo consideravelmente longo.

A forma da moldação e distribuição das nervuras, o topo relativamente fino e a alta condutividade térmica das mesas metrológicas de ferro fundido ajudam e facilitam o alcance da estabilidade térmica de forma rápida, quando as mesmas estão expostas a gradientes de temperatura.

Pontos de contato com a superfície metrológica não são permitidos por causa de irregularidades localizadas na superfície de trabalho. O contato deve ser feito por intermédio de um bloco padrão de precisão, com altura preferencialmente não superior a 10 mm, ou alguma outra peça com distância de precisão similar.

Ao utilizar uma mesa metrológica, recomenda-se trabalhar com toda a área útil da superfície de trabalho e não apenas se concentrar em uma única área específica.

A superfície metrológica é um plano de referência e deve ser protegida contra danos. Um sinal comum que indica dano é a presença de riscos consideráveis na superfície. Quando mesas metrológicas não estiverem sendo utilizadas, é recomendado cobrir a superfície de trabalho conforme exibido na Figura 2.6. Para as mesas fabricadas em ferro fundido, deve-se revestir a superfície de trabalho com um produto que previna à corrosão, a exemplo da vaselina, quando a mesa passar por longos períodos em desuso.



Figura 2.6 - Cobertura para mesas de granito.

Fonte: STARRET, 2015

O topo da mesa deve estar frequentemente limpa, sem qualquer tipo de poeira e outras partículas. Ao realizar medições, recomenda-se o uso de um pano macio e limpo para acomodar toda ferramenta ou bloco padrão a ser utilizado.

A mesa desempenho deve estar firmemente apoiada e nivelada. A base da mesa deve estar localizada em uma fundação estável e com boa isolamento contra vibrações mecânicas.

As mesas metrológicas sofrem desgaste em função do uso, onde o usuário pode detectar sinais de desgaste por fricção utilizando mesas de graus superiores, estudando a aparência da região atritada e verificando a retilineidade ao longo de várias linhas paralelas sobre a superfície de trabalho da mesa, avaliando a planeza da superfície. Se necessário, pode-se solicitar o recondicionamento das mesas por meio de pessoal especializado, geralmente o próprio fabricante.

Em mesas metrológicas, compostas por ferro fundido, um sinal comum de dano é o aparecimento de rebarbas em sua superfície de trabalho. O excesso de metal pode ser reduzido através de tratamento local com revestimento. Esta operação deve ser seguido por uma limpeza completa da mesa, utilizando pó abrasivo.

A ferrugem é um sinal de negligência e mal uso de mesas desempenho metálica, que pode ser reduzida através de limpezas periódicas da superfície de trabalho e sempre que for utilizada. Recomenda-se esfregar suavemente a superfície de trabalho com material adequado, como pasta refratária e parafina.

2.6 GRAUS DE EXATIDÃO

Segundo a norma ISO 8512 (1990), a exatidão da superfície de trabalho de mesas metrológicas são aplicadas através de dois valores de tolerâncias de planeza. Uma para toda a área correspondente ao topo da mesa e outro para qualquer local com área de 250 mm x 250 mm, situados sobre a superfície de trabalho.

O desvio de planeza da superfície total de trabalho não pode exceder a tolerância apropriada, em função das dimensões da mesa e do grau de exatidão especificados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Tolerâncias de acordo com o grau de exatidão de mesas metrológicas fabricadas com granito ou ferro fundido.

Dimensões da mesa / mm	Tolerâncias para o desvio de planeza para mesas metrológicas de granito e ferro fundido / μm			
	Grau 0	Grau 1	Grau 2	Grau 3
160 × 100	3	6	12	25
250 × 160	3,5	7	14	27
400 × 250	4	8	16	32
630 × 400	5	10	20	39
1000 × 630	6	12	24	49
1600 × 1000	8	16	33	66
2000 × 1000	9,5	19	38	75
2500 × 1600	11,5	23	46	92
250 × 250	3,5	7	15	30
400 × 400	4,5	9	17	34
630 × 630	5	10	21	42
1000 × 1000	7	14	28	56

Fonte: ISO 8512, 1990, p.3.

Os valores especificados na Tabela 2.2 são baseados na Equação (2.1):

$$t = lc_1 + c_2 \quad (2.1)$$

onde

- t é a tolerância no desvio de planeza, em micrometros (μm);
- l é o comprimento nominal da diagonal da mesa metrológica;
- c_1 e c_2 são obtidas na tabela 2.3 e dispostas em função do grau de exatidão da mesa desempenho.

Tabela 2.3 - Valores das constantes c_1 e c_2 .

Grau da mesa	c_1	c_2
0	0,003	2,5
1	0,006	5
2	0,012	10
3	0,024	20

Fonte: ISO 8512, 1990.

Quando mesas metrológicas apresentam dimensões diferentes das especificadas na Tabela 2.2, a tolerância sobre os desvios de planeza sobre a área total da superfície de trabalho deve ser calculada de acordo com a Equação (2.1).

O desvio de planeza de qualquer local com área de 250 mm x 250 mm da superfície de trabalho, segundo a norma ISO 8512 (1990), não deve exceder:

- 3,5 μm para mesas de grau 0;
- 7,0 μm para mesas de grau 1;
- 15 μm para mesas de grau 2;
- 30 μm para mesas de grau 3.

O propósito principal deste estudo é realizar a calibração de duas mesas metrológicas de granito, determinando seus valores de planeza e, conseqüentemente, o grau de exatidão de cada mesa metrológica de acordo com os padrões fornecidos na norma ISO 8512 (1990).

A classificação de mesas desempenho em graus de exatidão é muito importante na análise e determinação de incerteza e rastreabilidade, uma vez que as mesas metrológicas servem de referência primária na obtenção de medidas e análise de tolerâncias de peças de engenharia.

2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi apresentado o conceito de superfícies metrológicas, ressaltando sua normatização e importância de uso para a indústria e laboratórios de inspeção. Em

seguida foi descrita as principais características das superfícies metrológicas de ferro fundido, destacando suas peculiaridades. Na sequência, foram caracterizadas as superfícies metrológicas de granito, detalhando um tipo especial de granito, o granito preto fino. Por fim, foi descrito o uso e cuidados com superfícies metrológicas de ferro fundido e granito e explicitou-se a classificação das mesas metrológicas de acordo com os graus de exatidão das mesmas, isto, através da norma ISO 8512 (1990).

CAPÍTULO III

DEFINIÇÕES, PARÂMETROS E TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DA PLANEZA

3.1 INTRODUÇÃO

A planeza de superfícies e os produtos mecânicos são requisitos básicos no projeto de engenharia e manufatura, e tem sido extensamente examinado na literatura de engenharia de manufatura de exatidão, destacando os trabalhos pioneiros de Hume (1963) e Moore (1970).

Desde meados de 1900, várias técnicas têm sido desenvolvidos para medir a planeza de superfícies e, em especial, as superfícies planas industriais (DRESCHER, 2003). O primeiro instrumento de medição de planeza incluía o autocolimador alinhado com um espelho. O autocolimador media desvios de angulação na superfície através do deslocamento do espelho ao longo de linhas sobre a superfície de referência. Perfis de alturas foram obtidos integrando as medidas dos desvios de ângulos ou declives (YELLOWHAIR, 2003).

Na década de 1990, os níveis eletrônicos de alta exatidão foram introduzidos e se tornaram comercialmente disponíveis. O princípio de medição de níveis eletrônicos é baseada em um pêndulo livre de atrito, suspenso entre dois eletrodos. Uma deflexão do pêndulo muda a capacitância entre os eletrodos, a qual é detectada por um transdutor e traduzido para um ângulo de leitura. Níveis eletrônicos começaram a substituir o conjunto autocolimador e espelho para medir a planeza de superfícies. Dentre os vários benefícios do uso de níveis eletrônicos, destaca-se que o mesmo pode ser manuseado por um operador que tenha treinamento básico (YELLOWHAIR, 2003).

Neste capítulo, inicialmente será abordado o significado do termo planeza, definições e apresentação dos principais parâmetros e planos de referência associados a esta característica metrológica. Posteriormente, serão abordados as principais estratégias de extração de dados, técnicas e instrumentos de medição utilizados na determinação e avaliação da característica planeza.

3.2 PLANEZA

A norma ISO 1101 (2011), define o termo tolerância de planeza como sendo a zona que é delimitada por dois planos paralelos cuja distância entre eles é igual ao valor “ a ”, conforme exposto na figura 3.1.

A tolerância de planeza determina valores limites para desvios de retilineidade através de um conjunto de linhas dispostas simetricamente sobre um plano ou superfície. Isto significa que todos os pontos da superfície, pontos reais da superfície ou planos simétricos, devem estar contidos entre dois planos paralelos cuja distância de tolerância é especificada em desenho mecânico. A distância entre os dois planos deve ser a mínima possível (DOVICA *et al.*, 2006).

Na obtenção da configuração de uma superfície plana real há a necessidade de realizar medições, as quais passam por um conjunto de pontos ou perfis medidos. Em seguida, tal configuração pode ser comparada com uma superfície plana perfeita. As distâncias entre os dois planos representa o desvio ou erro de planeza (LAKOTA; GÖRÖG, 2011).

O plano ideal, que é comparado com a superfície real mensurada, é chamado de plano de referência. Este é definido a partir de um plano de ajuste ou regressão, associado à superfície real de acordo com convenções especificadas em padrões internacionais, nas quais os desvios e parâmetros de planeza são referidos. O padrão ISO 12781-1 (2011), especifica que o plano de referência para determinação e avaliação dos desvios de planeza pode ser obtido utilizando os métodos de zona mínima (ZM) e mínimos quadrados (MQ). Algumas definições importantes acerca de planos de referência são:

- Planos de referência da zona mínima – *minimum zone reference planes (MZPL)*: dois planos paralelos que envolvem a superfície ou o plano real e que tem a mínima separação (ver Figura 3.1).
 - Plano de referência da zona mínima externo: plano de referência da zona mínima externo ao material, também denominado plano superior;
 - Plano de referência da zona mínima interno: plano de referência da zona mínima interno ao material, também denominado plano inferior;

- Plano de referência da zona mínima médio: plano médio aritmético dos planos de referência da zona mínima. Trata-se portanto, do plano localizado entre os planos superior e inferior e equidistante destes.

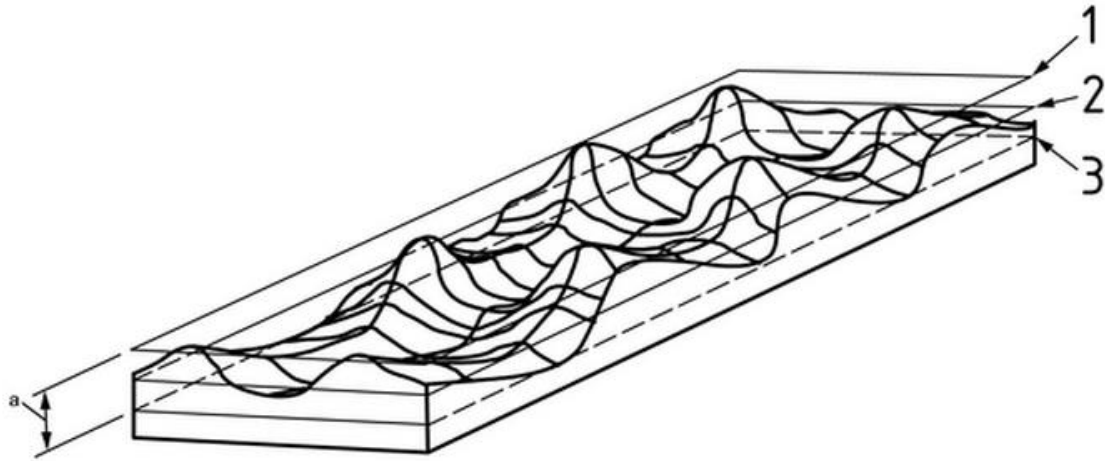


Figura 3.1 – Planos de referência da zona mínima: a – separação mínima entre os planos da ZM; 1 – plano de referência da zona mínima externo; 2 – plano de referência da zona mínima médio; 3 – plano de referência da zona mínima interno.

Fonte: ISO 12781-1, 2011.

- Plano de referência dos mínimos quadrados – *least squares reference plane (LSPL)*: plano cuja soma dos quadrados dos desvios locais de planeza é a mínima (ver Figura 3.2).

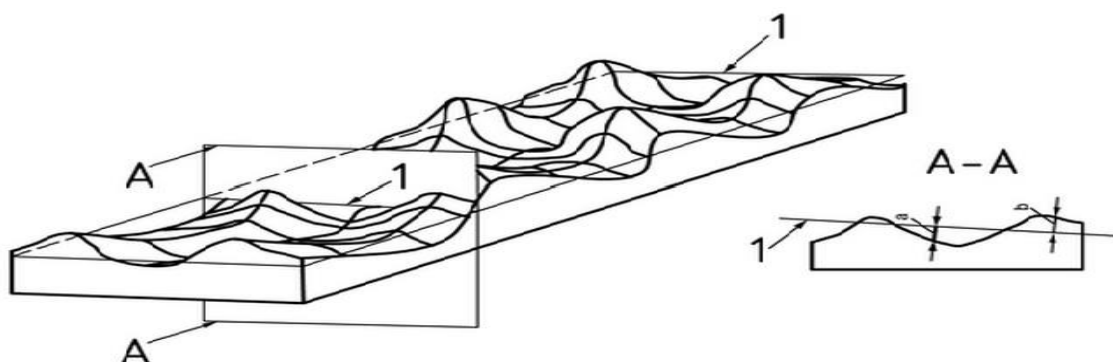


Figura 3.2 – Plano de referência dos mínimos quadrados: a – desvio de planeza negativo; b – desvio de planeza positivo; 1 – plano dos mínimos quadrados.

Fonte: ISO 12781-1, 2011.

3.3 PARÂMETROS DA PLANEZA

A definição de alguns parâmetros de planeza são de extrema importância na avaliação dessa tolerância de forma. Portanto, o conhecimento e entendimento de tais parâmetros é indispensável. As definições dos principais parâmetros de planeza segundo a norma ISO 12781-1 (2011) são:

- Desvio de planeza do pico ao vale (*peak-to-valley flatness deviation*) – valor do maior desvio de planeza local positivo², adicionado ao valor absoluto do maior desvio de planeza local negativo³;
- Desvio de planeza do pico ao plano de referência (*peak-to-reference flatness deviation*) – valor do maior desvio de planeza local positivo em relação ao plano de referência dos mínimos quadrados;
- Desvio de planeza do plano de referência ao vale (*reference-to-valley flatness deviation*) – valor absoluto do maior desvio de planeza local negativo em relação ao plano de referência dos mínimos quadrados.
- Raiz quadrada média dos desvio de planeza ΔF_{rms} (*root-mean-square flatness deviation*) – raiz quadrada da soma dos quadrados dos desvios de planeza local em relação ao plano de referência dos mínimos quadrados.

Matematicamente tem-se:

$$\Delta F_{rms} = \sqrt{\frac{1}{A} \int \Delta F_i^2 dA} \quad (3.1)$$

onde

- ΔF_{rms} é a raiz quadrada média do desvio de planeza;
- ΔF_i é o desvio de planeza local;
- A é a área da superfície da característica planeza.

² Valor positivo do erro de planeza.

³ Valor negativo do erro de planeza.

3.4 MEDIÇÃO DA PLANEZA

Considera-se a superfície de um plano uma área. E uma área, pode ser pensada como a combinação de dois perfis em que suas direções podem ser utilizadas para estabelecer um sistema de coordenadas. No caso de uma superfície plana, os dois perfis são ortogonais entre si dentro do plano, e qualquer posição ou ponto no plano pode ser localizado através de distâncias ao longo dos perfis ou coordenadas, definidos em cada direção, tomando-se um ponto de origem como referência do sistema coordenado (LAKOTA; GÖRÖG, 2011).

A superfície de um plano é uma área e assim os intervalos de amostragem ao longo das duas direções ortogonais, ou sistema cartesiano de coordenadas, precisam ser especificados utilizando estratégias de extração ou técnicas de amostragem, dentre as quais se destacam as descritas na norma ISO 12781-2 (2011), as quais serão abordadas na seção 3.4.1.

3.4.1 Estratégias de extração

A estratégia de extração apropriada é necessária para a obtenção de um conjunto representativo de pontos sobre a superfície a ser avaliada, e assim se obter uma avaliação confiável da tolerância de forma denominada planeza. Tais estratégias de extração são especificados pela norma ISO/TS 12781-2 (2011).

Na prática, muitas vezes é difícil conseguir uma cobertura completa de pontos para avaliação da planeza dada pela densidade teórica mínima de pontos. Nestas situações, estratégias de extração mais limitadas são empregadas, nas quais se consegue informações mais específicas, em vez de gerais, sobre a avaliação da planeza de superfícies. Dentre tais estratégias de extração se destacam a utilização de:

- Malha polar;
- Malha triangular;
- Linhas paralelas;
- Pontos aleatórios;
- Método de Moody ou “Union Jack”;
- Malha retangular.

3.4.1.1 Malha polar

A principal característica da estratégia de extração utilizando malha polar é a alta densidade de pontos ao longo das direções radial e circunferencial. Embora esta estratégia não cubra, com densidade total de pontos, toda a superfície a ser avaliada, ela tem a capacidade de avaliar a superfície harmonicamente em ambos os sentidos, radial e circunferencial, em relação a forma do plano de referência. Assim, esta estratégia de extração é recomendado como um método de amostragem para a avaliação da característica total de planeza em superfícies em forma de disco ou circular.

A estratégia de extração com malha polar consiste em traçar perfis circulares concêntricos e igualmente espaçados em torno de um ponto central pré-estabelecido sobre a superfície a ser mensurada, em conjunto com perfis de retilineidade, através de linhas radiais simetricamente distribuídas, formando ângulos de valores iguais entre si e coincidentes no ponto central da malha, formando uma rede polar (ver Figura 3.3).

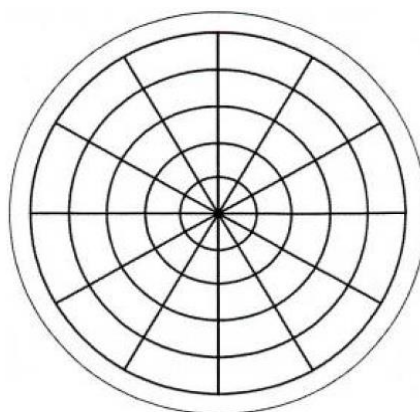


Figura 3.3 - Estratégia de extração utilizando malha polar.

Fonte: ISO/TS 12781-2, 2011.

3.4.1.2 Malha triangular

A principal característica da estratégia de extração com a utilização de malha triangular é uma elevada densidade de pontos ao longo dos perfis diagonais que o definem. Todavia, esta técnica não garante uma cobertura com densidade completa de pontos, porém, tem a capacidade de avaliar o conteúdo harmônico nas direções ortogonais e diagonais que definem a malha triangular em relação à forma do plano. Por isso, esta

estratégia de extração é recomendada como método de amostragem para a avaliação da planeza total da superfície. Trata-se de uma alternativa adicional aos métodos de extração que utilizam malhas polares e retangulares.

A técnica de extração com malha triangular é constituída por linhas, das quais se avalia os perfis de retilineidade, igualmente espaçados em três direções que formam ângulos de 60° entre si, configurando uma malha de forma triangular (ver Figura 3.4).

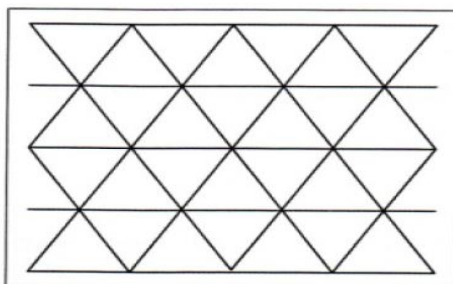


Figura 3.4 - Estratégia de extração utilizando malha triangular.

Fonte: ISO/TS 12781-2, 2011.

3.4.1.3 Linhas paralelas

A estratégia de extração que utiliza linhas paralelas tem como principal característica apresentar uma maior densidade de pontos numa direção específica, em relação à densidade de pontos em direções ortogonais àquelas. Este método de extração tem a capacidade de avaliar uma quantidade maior de informação harmônica na direção dos perfis formados por retas paralelas em relação às direções perpendiculares. Por isso, esta estratégia de extração é recomendado apenas quando se deseja adquirir dados e informações em grande quantidade sobre uma direção em particular ou de maior interesse, em relação às direções ortogonais, cuja análise ou coleta de informações é menos crucial ou importante no estudo a ser efetuado sobre a superfície.

Esta estratégia de extração consiste em traçar perfis de retilineidade, utilizando linhas igualmente espaçados e numa direção específica, de modo a formar uma série de perfis paralelos (ver Figura 3.5).

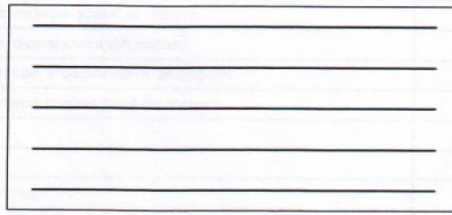


Figura 3.5 - Estratégia de extração com linhas paralelas.

Fonte: ISO/TS 12781-2, 2011.

3.4.1.4 Pontos aleatórios

A densidade de pontos da técnica por pontos é tipicamente menor comparado às outras estratégias de extração. Isso, de certa forma, restringe a capacidade do método em avaliar o conteúdo harmônico da superfície acerca da característica planeza. O menor número de pontos também apresenta problemas durante o processo de filtragem. É por esta razão que esta estratégia de extração não é recomendada na maioria das aplicações em análise da planeza, a menos que sejam necessárias apenas estimativas bastante aproximadas dos parâmetros de planeza (ADAMCZAK, 2008).

O método de extração por pontos consiste em tomar pontos, aleatoriamente ou seguindo um determinado padrão estabelecido pelo usuário, sobre a superfície metrológica, conforme a Figura 3.6.

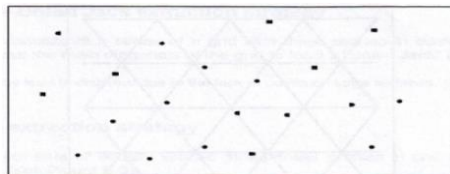


Figura 3.6 - Estratégia de extração por pontos.

Fonte: LAKOTA; GÖRÖG, 2011.

3.4.1.5 Método de Moody ou “Union Jack”

Este método foi proposto por Moody (1955) para calibrar mesas metrológicas redondas, quadradas e retangulares. É aceito em todo o mundo por permitir uma calibração relativamente rápida.

Também conhecido como “Union Jack Method”, esta técnica consiste em traçar oito linhas de medição sobre a mesa metrológica, conforme a Figura 3.7. Cada linha é dividida em várias estações de medição cujo comprimento base é definido previamente. Durante as medições pelas estações das linhas diagonais, o comprimento base deve ser devidamente alterado para que os pontos extremos e central, pelos quais passam as linhas diagonais, coincidam com os mesmos pontos por onde passam as linhas perpendiculares entre si (RENISHAW, 2001).

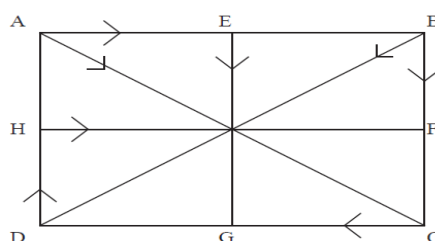


Figura 3.7 - Estratégia de extração utilizando o padrão de Moody.

Fonte: Taylor Hobson Precision, 2005.

O método de Moody é bastante criticado devido sua baixa densidade de pontos na coleta de dados. Isto se torna mais crítico a medida que as dimensões das mesas metrológicas se tornam maiores (LAKOTA; GÖRÖG, 2011).

3.4.1.6 Malha retangular

A principal característica do método de malha retangular é a presença de uma elevada densidade de pontos ao longo das direções ortogonais. Mesmo a densidade de pontos não sendo completa, é possível avaliar o conteúdo harmônico em ambos os sentidos perpendiculares. Assim, este método é recomendado como estratégia de amostragem para a avaliação total da característica planeza.

A estratégia de malha retangular consiste em traçar vários perfis de retilineidade, igualmente espaçados, em duas direções ortogonais a fim de formar uma malha retangular, conforme exemplificado na Figura 3.8. Portanto, o método de malha retangular permite tomar qualquer número de linhas em duas direções ortogonais, cobrindo com grande densidade de pontos a superfície metrológica.

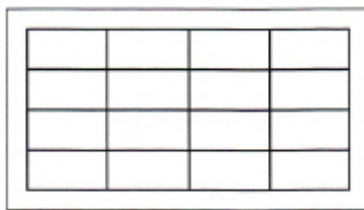


Figura 3.8 – Estratégia de extração utilizando malha retangular.

Fonte: ISO/TS 12781-2, 2011.

A desvantagem deste método, em relação ao desenvolvido por Moody, é o maior tempo requerido para a coleta de dados, devido seu maior número de pontos de medição e consequentemente maior tempo de processamento computacional para obtenção dos resultados de planeza.

Neste trabalho a planeza de duas superfícies metrológicas de granito distintas serão determinadas utilizando nível eletrônico e as estratégias de extração de Moody e malha retangular a fim de determinar seus graus de exatidão segundo a norma ISO 8512 (1990).

3.4.2 Técnicas de medição dos desvios de planeza

Muitas técnicas têm sido propostas para medir a planeza de superfícies metrológicas em função de suas dimensões e qualidade (HUME, 1963). Para superfícies de pequenas dimensões, como blocos padrão e espelhos óticos, o desvio de planeza pode ser medido por interferometria. Já para grandes superfícies, como mesas metrológicas de granito, a planeza pode ser determinada usando além de sistemas a laser interferométrico, os autocolimadores ou níveis eletrônicos (MASINA; KRUGER, 2014).

Para realizar a calibração de mesas metrológicas de granito, Zahwi *et al.* (2013) utilizaram autocolimadores, sistema laser e Máquina de Medir por Coordenadas (MMCs).

Os principais instrumentos utilizados na determinação do desvio da planeza em mesa metrológica são:

- Laser interferométrico;
- Sistema com autocolimadores;
- Nível eletrônico.

3.4.2.1 Sistema laser interferométrico

O sistema laser interferométrico, frequentemente chamado de interferômetro, consiste basicamente em três componentes chave: o laser, o interferômetro angular e o espelho refletor, mostrados na Figura 3.9 (CHAPMAN *et al.*, 2013).

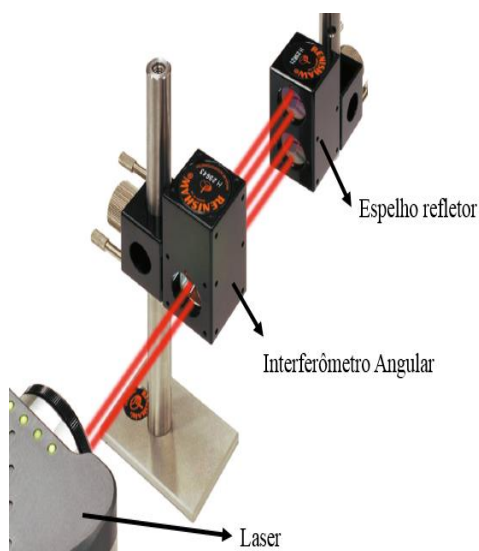


Figura 3.9 – Sistema laser interferométrico.

Fonte: CHAPMAN *et al.*, 2013.

O interferômetro pode ser utilizado em uma variedade de aplicações em metrologia, como na determinação dos erros de *pitch* e *yaw*⁴, calibração de eixos rotativos, medição dos desvios da retilidade em guias de máquinas ferramenta e determinação da planeza de mesas metrológicas. Nesta última aplicação, o sistema laser interferométrico é utilizado para obter medições de ângulos ou inclinações em uma sequência de pontos sobre a superfície a ser avaliada (CHAPMAN *et al.*, 2013). A Figura 3.10 mostra uma configuração típica do sistema laser interferométrico na determinação da planeza e calibração de mesas metrológicas.

⁴ Erros angulares ou de rotação infinitesimal.

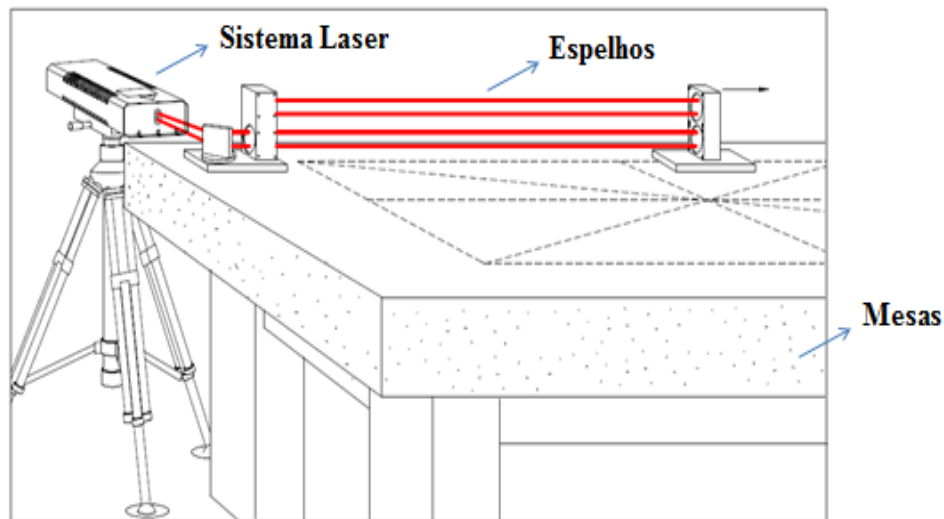


Figura 3.10 – Configuração usual do interferômetro na calibração de mesas metrológicas.

Fonte: JENAER MEBTECHNIK, 2015.

O interferômetro funciona através do princípio de sobreposição de ondas. O laser faz emergir dois modos de luz que são separados por um divisor de polarização no interferômetro angular. O modo de luz desviada em 90° graus sofre outro desvio de igual angulação, de modo a ficar paralelo ao feixe original. Por causa do divisor de polarização, o refletor de medição recebe apenas luz de frequência f_1 , enquanto o refletor de referência só recebe luz de frequência f_2 .

Com a unidade refletora em repouso, E1 detecta a frequência diferencial do laser ($f_1 - f_2 = 640 \text{ MHz}$), que é igual ao sinal de referência eletrônico E2 detectado no laser. Se o refletor sofre qualquer mudança de angulação quando movimentado, os feixes f_1 e f_2 sofrem desvios de Doppler de $\pm df_1$ e $\pm df_2$, respectivamente. Por conseguinte, o detector E1 registra uma frequência de medição de $\Delta f_{\text{Meas}} = (f_1 \pm df_1) - (f_2 \pm df_2)$, que depende da maneira que o refletor de medição é movido. Os dois sinais detectados (E1 e E2) são comparados na secção de alta frequência do sistema laser interferométrico. O resultado obtido é o desvio de frequência Δf_{Meas} devido ao efeito Doppler e representa o deslocamento do refletor, conforme Figura 3.11 (JENAER MEBTECHNIK, 2015).

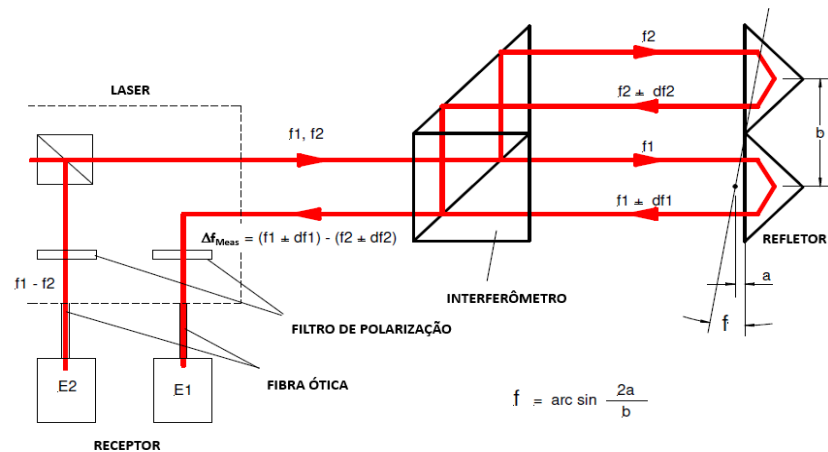


Figura 3.11 – Sistema laser interferométrico.

Fonte: JENAER MEBTECHNIK, 2015.

As medições com interferômetro sofre interferência da temperatura, umidade e pressão. Geralmente, o equipamento dispõe de dispositivos capazes de avaliar tais parâmetros, a fim de compensar suas influências (MAGALHÃES, 2006). O sistema laser interferométrico é utilizado para a determinação da planeza de mesas metrológicas aplicando, principalmente, as estratégias de extração de dados do tipo Union Jack ou Moody e malha retangular (RENISHAW, 2001).

3.4.2.2 Sistema autocolimador

O autocolimador é assim chamado devido sua capacidade de colimar ou deixar alinhados e paralelos os raios de luz, conforme ilustrado na Figura 3.12. Este dispositivo é utilizado para medir pequenos ângulos (MAGALHÃES, 2006).

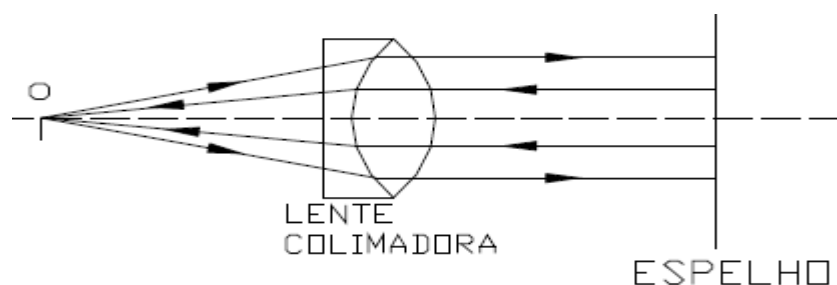


Figura 3.12 – Lente colimadora.

Fonte: MAGALHÃES, 2006.

O ponto O na Figura 3.12 represente uma fonte de feixes luz. Estes, ao atingir a lente colimadora tornam-se paralelos. Se os raios de luz paralelos forem refletidos por um espelho normal ao eixo ótico, retornarão ao foco ou ponto “ O ”. Se o espelho apresentar algum declive de ângulo θ , os raios paralelos serão refletidos com igual inclinação e convergirão para outro ponto, O' , no mesmo plano de O , a uma distância x de O , conforme a Figura 3.13. A dimensão f é a distância focal.

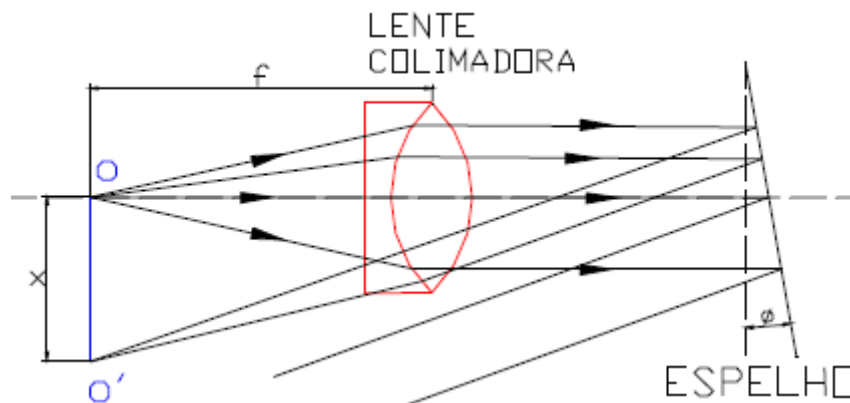


Figura 3.13 – Espelho refletor inclinado.

Fonte: MAGALHÃES, 2006.

Um sistema autocolimador utilizado geralmente na determinação da planeza em mesas metrológicas é exibido na Figura 3.14.

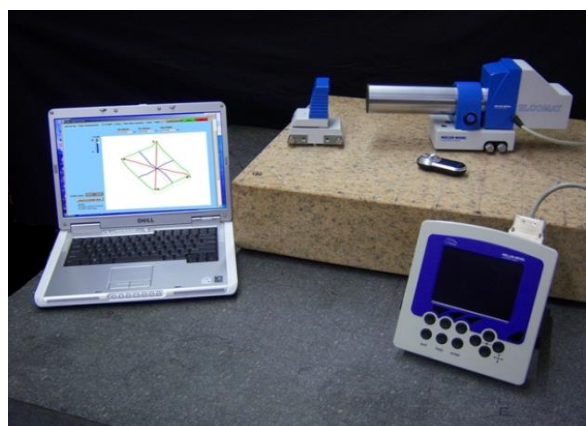


Figura 3.14 – Sistema autocolimador.

Fonte: VERMONT PHOTONICS, 2008.

O sistema autocolimador pode ser utilizado para determinação da planeza de mesas de trabalho aplicando apenas a estratégia de extração de Moody ou Union Jack, pois o ponto zero ou de referência de um autocolimador muda cada vez que este é movimentado inviabilizando o uso da estratégia de extração por malha retangular (VERMONT PHOTONICS, 2008).

3.4.2.3 Nível eletrônico

O nível eletrônico é um dispositivo capaz de medir a inclinação de uma superfície em relação a um determinado plano de referência. Diferentemente de sistemas de medição a laser interferométrico e autocolimadores, o nível eletrônico apresenta seu próprio plano horizontal de referência, isto representa uma vantagem pois permite o cálculo da planeza com maior exatidão (RUNJE *et al.*, 2013). É um dos sistemas de medição mais utilizados para realizar a medição da planeza em mesas metrológicas. Segundo Gusel *et al.* (2000), as vantagens do nível eletrônico sobre outros dispositivos de medição são:

- baixo custo;
- simples manuseio;
- obtenção de resultados de forma fácil e rápida.

O sistema de nível eletrônico é constituído por um pêndulo e sistema elétrico capaz de detectar o seu movimento. O deslocamento do pêndulo gera um sinal elétrico que é amplificado e utilizado para operar um mostrador analógico e/ou digital que exibe o valor correspondente, geralmente em arco de segundos, a inclinação medida. O nível eletrônico pode ser utilizado para realizar medidas absolutas ou relativas e possui duas unidades-chave: o nível propriamente dito e a unidade amplificadora ou mostrador (MAGALHÃES, 2006).

O nível possui em seu interior um pêndulo e transdutores elétricos sensíveis ao posicionamento do pêndulo. O circuito eletrônico consiste basicamente em uma ponte elétrica balanceada quando o pêndulo se encontra igualmente espaçado entre duas bobinas, indicando uma inclinação nula. Quando ocorrer qualquer inclinação do nível eletrônico, a ponte elétrica é desbalanceada e a voltagem induzida no transdutor é diretamente proporcional ao ângulo de declive do instrumento de medição (MAGALHÃES, 2006). Geralmente adotam-se os sentidos positivo e negativo de

inclinação de acordo com a Figura 3.15, na qual exibe a direção correta de medição na utilização do equipamento.

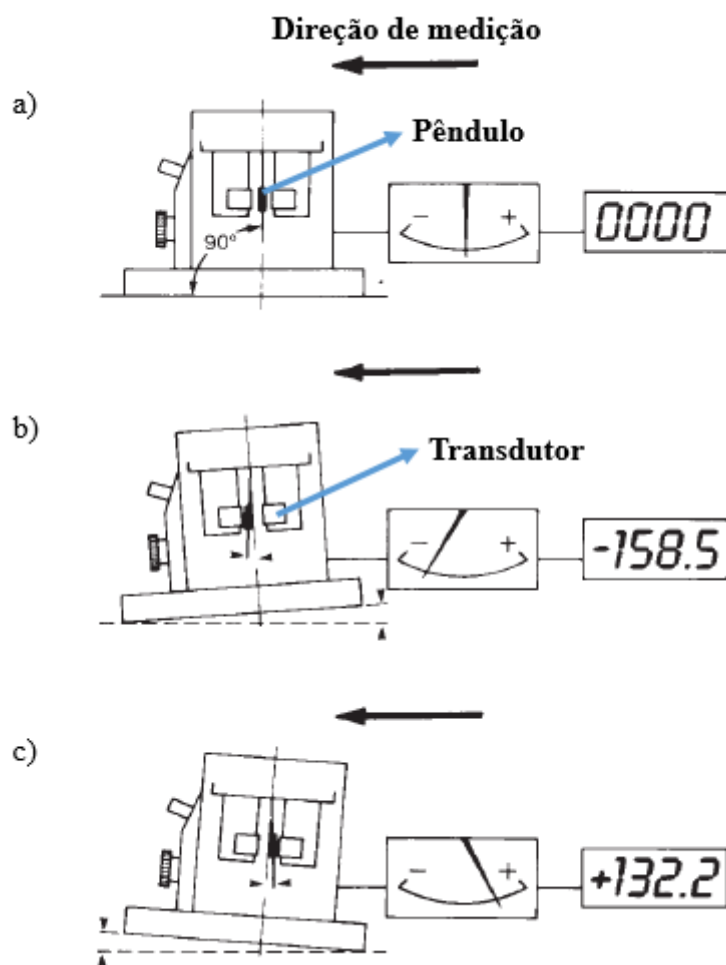


Figura 3.15 – Sistema de referência para a inclinação do nível eletrônico: a) inclinação zero; b) nível inclinado no sentido anti-horário – indicação negativa; c) nível inclinado no sentido horário – indicação positiva.

Fonte: TAYLOR HOBSON PRECISION, 2005 (adaptado).

Segundo a fabricante Taylor Hobson PRECISION (2005), o nível eletrônico pode ser utilizado para diversas aplicações, dentre as quais se destacam nos setores de:

- Engenharia civil.
 - Monitoramento de inclinação de estruturas;
 - Verificação de arcos de pontes para o movimento antes e depois da construção;

- Verificação do assentamento e nivelamento de suportes de fundação;
- Nivelamento de radares, giroscópios e plataformas-base para armas pesadas;
- Verificação do nível e retilineidade de trilhos.
- Alinhamento óptico.
 - Montado em um telescópio de micro alinhamento para estabelecer uma linha verdadeiramente horizontal de visão.
- Engenharia marítima.
 - Verificação do nível de torção em bases de motores em navios;
 - Alinhamento de armas montadas em plataformas de referência;
 - Verificação do paralelismo dos pinos de manivelas dos principais rolamentos em virabrequins.
- Máquinas ferramenta.
 - Verificação da retilineidade e paralelismo de guias;
 - Verificação de colunas por esquadro à barramento;
 - Monitoramento do processo de assentamento de máquinas de grande porte;
 - Medição de cambagem⁵ em rolos cilíndricos de laminação.
 - Avaliação da planeza de mesas metrológicas ou de referência;

Na determinação da planeza de mesas metrológicas, o nível eletrônico é colocado sobre a superfície de trabalho da mesa e movido em linha reta, em intervalos iguais, denominado comprimento base, medindo valores de inclinação da mesa para cada posição do nível.

Resumidamente, trata-se da avaliação da retilineidade de uma série de linhas sobre a superfície de referência. Cada ponto mensurado é denotado geralmente por estação de medição (WYLER, 2003). A Figura 3.16 exemplifica a tomada de n medidas em uma determinada linha de referência sobre a superfície de trabalho da mesa desempenho.

⁵ Ajuste da inclinação de cilindros de laminação em relação a um plano vertical, visando controlar seu rolamento.

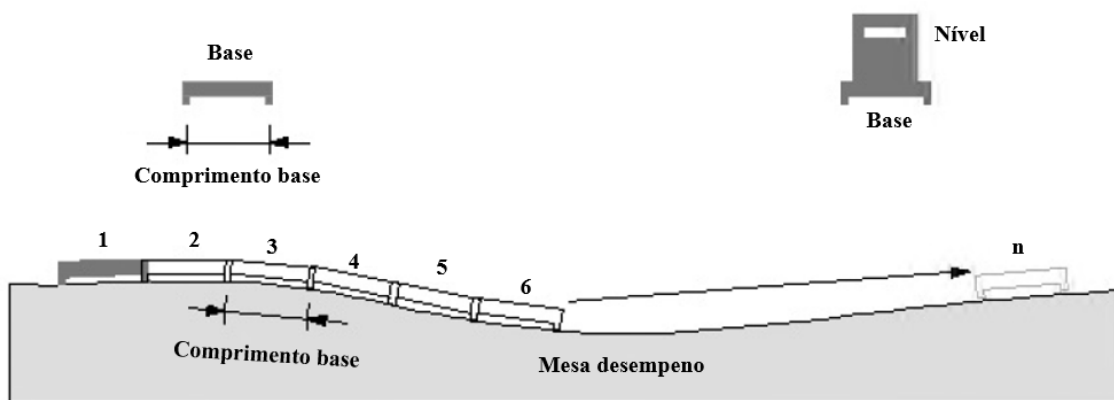


Figura 3.16 – Representação de n medidas de inclinação sobre uma mesa despenho utilizando nível eletrônico.

Fonte: VERMONT PHOTONICS, 2008 (adaptado).

A cada valor de inclinação corresponde uma altura. Esta pode ser adquirida convertendo o valor de ângulo em unidades de comprimento através de relações simples de trigonometria, conforme representado na Figura 3.17 e na Equação (3.1).

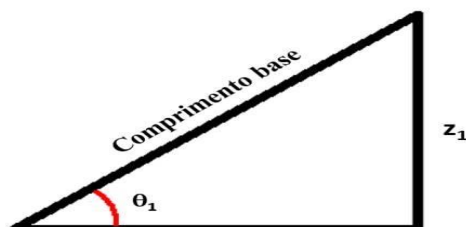
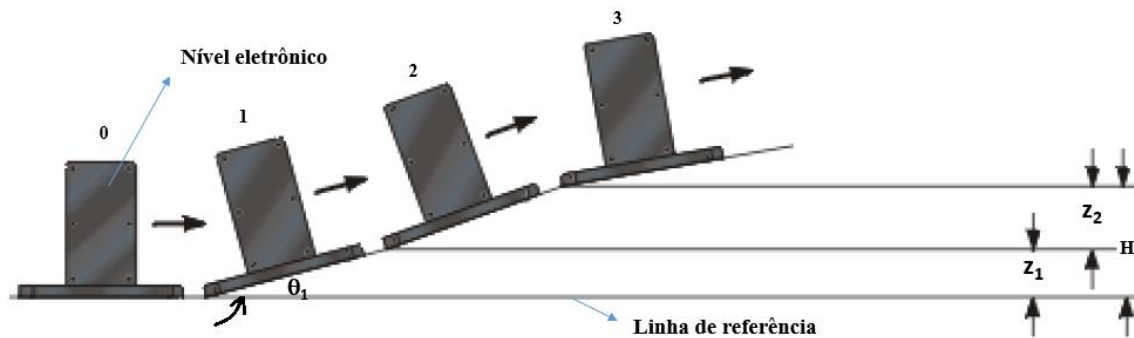


Figura 3.17 – Relação trigonométrica para determinação da altura correspondente ao valor de inclinação.

$$z_1 = (\text{comprimento base}) \cdot \text{sen} \theta_1 \quad (3.1)$$

A Figura 3.18 ilustra a representação da inclinação ou ângulo θ_1 do nível e sua altura correspondente z_1 .



A Figura 3.17–Indicação da inclinação e altura correspondente.

Fonte: MASINA; KRUGER, 2014 (adaptado).

Observa-se que a estação 0 ou posição inicial do nível, serve de ponto de referência, estabelecendo uma linha de referência da qual todas as demais medidas serão relativas. Portanto, na aquisição de dados para a determinação da planeza, será coletado o valor H (soma de z_1 e z_2) de altura para a estação 2 ao invés de z_2 .

O nível eletrônico pode ser utilizado para medir desvios de planeza em mesas de desempenho através das técnicas de extração de Moody e de malha retangular, de forma eficaz, prática e rápida.

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi apresentado o significado do termo planeza, definições e diferentes aspectos dos principais parâmetros e planos de referência associados a esta característica metrológica. Por fim, foram abordadas as principais estratégias de extração de dados, técnicas e instrumentos de medição utilizados na determinação e avaliação da característica planeza, apontando suas principais características.

CAPÍTULO IV

PRINCIPAIS FONTES DE ERRO NA MEDIÇÃO DA PLANEZA DE SUPERFÍCIES METROLÓGICAS

4.1 INTRODUÇÃO

A planeza de superfícies pode ser determinada por diferentes métodos de medição. Os métodos mais comuns de medir a planeza utilizam níveis eletrônicos, autocolimadores e laser interferométrico.

Ao se utilizar níveis eletrônicos para avaliar a superfície medida, o próprio instrumento de medição é movido sobre a superfície através de linhas guias, formando uma malha de medição. Esta é composta por várias linhas e a retilineidade de cada linha é medida. Para determinar a planeza de uma superfície medida, resultados de retilineidade de linhas individuais são arranjadas e combinadas, representando o nível ou desvio de planeza. Cada superfície medida é classificada de acordo com seu nível de planeza, determinado através de calibrações regulares.

É importante ressaltar que as medições são influenciadas por diversos fatores, explicitados ao longo do capítulo, os quais influenciam, direta ou indiretamente, nos resultados e repetitividade (GUSEL *et al.*, 2008).

Para WYLER (2003), alguns fatores influenciam nos resultados de medição da planeza de superfícies metrológicas, dentre as quais se destacam as características da superfície metrológica (propriedades mecânicas, danos, material, etc.); peculiaridades dos equipamentos de medição; fatores adversos do ambiente (temperatura, vibrações, sujeira, poeira, etc.), e pessoa que executa a medição (negligência, erros de posicionamento, dentre outros). Os resultados serão considerados exatos quanto mais fatores forem considerados e quanto mais precisos eles o forem.

Este capítulo apresentará e discutirá sobre as principais fontes de erro na determinação da planeza de superfícies metrológicas, sobretudo, com a utilização de nível eletrônico como sistema de medição.

Inicialmente será discutido sobre a definição dos principais fatores de impacto e suas influências, explicitando a variação de temperatura e sua influência sobre a planeza de superfícies, o erro no posicionamento do equipamento, os desvios causados por vibração, o impacto da poeira na superfície de medição e, por fim, o erro de fechamento.

4.2 DEFINIÇÃO DOS FATORES DE IMPACTO E SUAS INFLUÊNCIAS

Os erros que ocorrem durante a medição da planeza são consequência principalmente do operador do equipamento, das condições e tipo de equipamento de medição, das intempéries do ambiente, dentre outros fatores de impacto. Cada dispositivo de medição é uma fonte dos seus próprios erros que dependem do projeto, construção, desgaste, e outros diversos fatores. Ao mesmo tempo, todo o sistema de medição é exposto ao ambiente e seus fatores adversos, como variações de temperatura, umidade, vibrações, adicionado ao nível de experiência dos profissionais que efetuam a medição. Todos esses fatores influenciam nos resultados de medição (GUM, 1995; WYLER, 2003).

Segundo Ačko (2003), o elemento base em relação aos tópicos de incerteza de medição é que é possível determinar todos os fatores de impacto que afetam a medição e o seu resultado, mesmo antes da medição propriamente dita ter sido efetuada. É importante determinar os fatores individuais e avaliar a sua influência. A contribuição comum C de todos os F_n fatores de impacto pode ser representada pela Equação (4.1).

$$C = f(F_1, F_2, F_3, \dots, F_n) \quad (4.1)$$

4.2.1 Contribuição do equipamento de medição na determinação da incerteza

A confiabilidade do equipamento de medição utilizado é um dos principais fatores que afetam a confiabilidade da medição e os seus resultados. A fim de determinar a incerteza de medição, um intervalo de medição tem que ser considerado. Uma vez que as características do dispositivo de medição sofrem alterações em toda a faixa de medição, deve-se realizar sua calibração de forma adequada. Os níveis eletrônicos são calibrados utilizando blocos padrões (*sine bar*) (GUSEL *et al.*, 2000).

A exatidão de um nível eletrônico, denominado *Talyvel* 5, da fabricante Taylor Hobson PRECISION, vale $0,2 \text{ arcseg} \pm 3\%$, influenciando na incerteza de medição em

um fator $F_{NE} = \pm 0,006$ " (TAYLOR HOBSON, 2005). Convém, ressaltar que nesta pesquisa este foi o equipamento usado para medir a planeza de superfícies metrológicas (ver capítulo III).

4.2.2 Variação de temperatura e sua influência sobre a planeza de superfícies

Além da característica do sistema de medição, a temperatura é um fator que afeta o resultado e a incerteza de medição consideravelmente. Mesmo as menores mudanças de gradiente de temperatura entre as superfícies superior e inferior da mesa metrológica tem um grande impacto sobre a sua planeza global. Para definir a contribuição dessas oscilações de temperatura à incerteza total de medição, é preciso determinar como o gradiente de temperatura muda ao longo do tempo. As medições são realizadas sobre um longo período de tempo, utilizando equipamentos de medição de temperatura de alta exatidão (GUSEL *et al.*, 2008).

Segundo Gusel *et al.* (2008), a maior diferença de temperatura entre os planos superior e inferior da mesa desempenho situa-se em torno de $\Delta T_{max} = 0,188$ °C, enquanto que a menor diferença gira em torno de $\Delta T_{min} = 0,159$ °C. A partir daí, uma mudança da planeza na mesa desempenho pode ser calculada considerando-se a variação de temperatura conseguida através da Equação (4.2).

$$\Delta T_{DT} = \Delta T_{max} - \Delta T_{min} \quad (4.2)$$

Logo, a variação ou desvio de temperatura a ser considerado e que influencia na medida da planeza vale $\Delta T_{DT} = 0,0285$ °C. Para determinar como a mesa metrológica se torna curva em função desta diferença de temperatura, utiliza-se a Equação (4.3) (GUSEL *et al.*, 2008).

$$z_T = \frac{\Delta T_{DT} \cdot \beta \cdot L^2}{8 \cdot e} \quad (4.3)$$

Na Equação (4.3), z_T representa o maior desvio de retilidade em uma determinada linha de medição de comprimento L , ΔT_{DT} é o desvio de temperatura considerado entre as superfícies superior e inferior da mesa metrológica, β é o coeficiente

de expansão térmica do material que é feita a superfície metrológica e e refere-se a sua espessura. Considerando:

- $\Delta T_{DT} = 0,0285 \text{ } ^\circ\text{C}$;
- $\beta = 5,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (para o granito);
- $L = 1,182 \text{ m}$ (valor da diagonal de uma mesa $630 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$);
- $e = 0,155 \text{ m}$

Os dados considerados foram inseridos na Equação (4.3), obtendo-se o resultado de $0,18 \text{ }\mu\text{m}$. Este valor é convertido em arco de segundos, correspondendo ao valor de $0,0314''$. Assim, o desvio diagonal é $F_{DTS} = \pm 0,0314''$, correspondendo ao valor na qual se utilizasse apenas um único passo ou estação de medição. Todavia, ambos os componentes de largura e comprimento podem ser calculados. Porém, neste caso, o componente diagonal foi utilizado por apresentar o maior valor numérico e consequentemente maior desvio (GUSEL *et al.*, 2008). Lima Jr (2003), aplicou o método dos elementos finitos para determinar as deformações térmicas de uma mesa metrológica.

4.2.3 Influência da variação de temperatura sobre o equipamento de medição

Desvios adicionais ocorrem devido às mudanças na temperatura ambiente, influenciando nos resultados de medição de um determinado sistema, como um nível eletrônico, por exemplo. A faixa de medição típica de níveis eletrônicos atualmente equivale a $FM = \pm 600$ arco de segundos. Um desvio causado pela mudança de temperatura (declarado pelo fabricante) geralmente situa-se em torno de $I = 0,02\%$ da faixa de medição para um desvio de $1 \text{ } ^\circ\text{C}$. Este valor deve ser corrigido de acordo com a oscilação de temperatura ambiente atual estabelecida, que depende da região e condições específicas e singulares. Considerando-se, por exemplo, uma variação na temperatura ambiente em torno de $\Delta T_{amb} = 1 \text{ } ^\circ\text{C}$. Para Gusel e colaboradores (2008) a correção é conseguida utilizando a Equação (4.4).

$$P'_T = \Delta T_{amb} \cdot I \cdot FM \quad (4.4)$$

Finalmente, substituindo os devidos valores na Equação (4.4), um componente da incerteza correspondente à oscilação da temperatura ambiente sobre o nível eletrônico pôde ser determinada, sendo igual a $F_{DTAmb} = \pm 0,12''$.

4.2.4 Erro no posicionamento do equipamento de medição

Um outro erro do ângulo medido é causada por um posicionamento inexato do nível eletrônico em suas posições de medição. Para avaliar esse erro, algumas hipóteses serão empregadas. A primeira hipótese é assumir uma diferença média de inclinação em torno de $3''$ entre dois posicionamentos distintos do nível em uma mesma estação de medição. No caso de um ângulo de $0''$ para a primeira posição de medição, o ângulo para a próxima posição de medição seria $3''$. Logo, se o nível eletrônico fosse deslocado para a próxima posição ou estação de medição, o resultado da medição indicaria uma inclinação de $3''$, em vez de $0''$ (GUSEL *et al.*, 2008).

A Figura 4.1 exibe algumas características dimensionais no posicionamento do nível eletrônico. L_p refere-se ao desvio de inclinação (*arcseg*), n_p é o erro de posicionamento (*mm*) e L_{pl} é o comprimento base do nível eletrônico (também em *mm*).

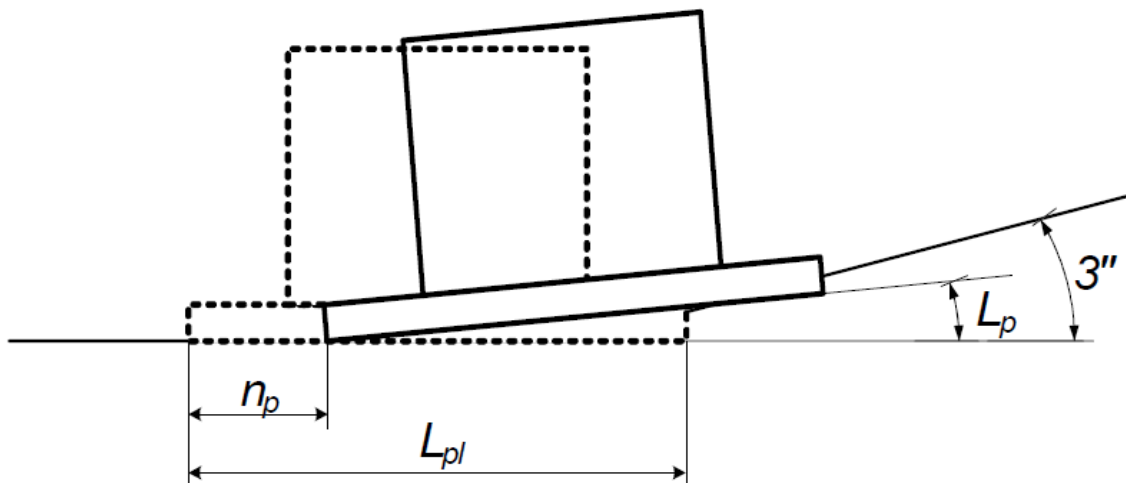


Figura 4.1 – Erro causado pelo posicionamento impreciso do nível eletrônico.

Fonte: GUSEL *et al.*, 2008.

Ao posicionar o equipamento de medição, algum erro está sempre presente, acredita-se que esse erro de posicionamento gira em torno de $\pm 1 \text{ mm}$. Quando tomamos as características dimensionais do equipamento de medição em consideração, tem-se:

$$L_p = \frac{n_p}{L_{pl}} \cdot 3'' = \frac{1}{100} \cdot 3'' = 0,03'' \quad (4.5)$$

Portanto, o componente de incerteza por causa do posicionamento impreciso do nível eletrônico em uma estação de medição é $F_p = \pm 0,03''$.

4.2.5 Desvios causados por vibração

As vibrações estão certamente entre os fatores que podem afetar os resultados e incerteza de medições em uma escala maior. Ao utilizar níveis eletrônicos como um meio para a realização de medições em vez de, por exemplo, laser interferométrico ou autocolimador, é possível eliminar uma parte significativa das vibrações (GUSEL *et al.*, 2008).

A principal vantagem da utilização de níveis eletrônicos para a medição de inclinação é a possibilidade da medição diferencial, utilizando duas unidades de nível simultaneamente. Esta configuração provou-se muito útil, podendo eliminar a influência de vibrações nos resultados de medição (GUSEL *et al.*, 2008).

Ambas as unidades de níveis eletrônicos colocados sobre uma mesa metrológica são orientados da mesma maneira, de modo que a influência da vibração é praticamente a mesma em ambas as unidades. O resultado deste tipo de medição é a diferença de inclinação real entre as duas unidades de nível. Um teste prático baseado em perturbações induzidas tem mostrado resultados positivos dessa configuração de medição (GUSEL *et al.*, 2008).

Existem casos em que a influência da vibração nos resultados de medição não pode ser simplesmente desprezada. Isto ocorre, principalmente, quando lidamos com defeitos estruturais ou desvios de forma, como, por exemplo, a variação da espessura de mesas metrológicas. Geralmente, localizados modos de vibração de alta frequência, que ocorrem em superfícies metrológicas de espessura levemente variada, ocorrem nas imediações de seções transversais máximas ou mínimas (KAPLUNOV *et al.*, 2005). Tal influência ganha força quando as vibrações estão constantemente presentes durante o processo de medição. Geralmente, especificamente sob condições de laboratório, as superfícies de referência são colocadas sobre uma base apropriada, distante das fontes de

vibração. Logo, as vibrações, como uma possível influência nas flutuações de resultados de medição, têm sido negligenciadas (GUSEL *et al.*, 2008).

4.2.6 Impacto da poeira na superfície de medição

É difícil determinar o componente de incerteza causado pela poeira e sujeira que pode ser encontrada sobre a superfície de trabalho da mesa metrológica. Seria impossível analisar o tamanho, número e tipos de partículas de poeira que estão localizados na superfície e no ar em torno do local de medição.

É importante destacar que antes de cada medição a superfície a ser mensurada deve estar limpa, isente de poeira e pequenas partículas. Além disso, as impurezas não são equitativamente distribuídos ao longo de toda a área, de modo que o seu impacto sobre a medição é limitada apenas em posições de medição individuais. Logo, essas impurezas afetam apenas os resultados em algumas posições. Independentemente disso, supõe-se que a contribuição da poeira e impurezas para a incerteza total é de aproximadamente $F_{PS} = \pm 0,01''$. Este valor foi levado em consideração em simulações realizadas por Gusel *et al.* (2008) na determinação da incerteza na calibração de mesas metrológicas, porém valores distintos podem ser encontrados dependendo das condições de locais específicos.

A Equação (4.1) foi utilizada para determinar a influência total de todos os componentes de incerteza considerados, onde a soma direta foi realizada, obtendo-se uma influência de incerteza total de $F_{TOT} = 0,1944''$.

4.3 ERRO DE FECHAMENTO

O componente de erro mais importante na determinação da planeza de mesas metrológicas (mesas de desempenho) denomina-se erro de fechamento. Através de seu valor é possível assegurar que o mínimo de erros aceitáveis e que influenciam nos resultados de medição, foram considerados durante a medição. Esses erros de fechamento representam a diferença de elevação ou altura entre dois pontos quando duas linhas de referência não se cruzam no mesmo ponto. Uma situação ideal seria ter erros de fechamento iguais a zero, ocasião em que a intersecção de duas linhas de medição ocorreria em um determinado ponto de medição (MASINA; KRUGER, 2014).

O erro de fechamento é uma indicação da qualidade da medição e pode ser definido como sendo o máximo desvio que ocorre entre duas medições em um mesmo

ponto de medição, quando medidos usando caminhos distintos (WYLER *et al.*, 2003). Na Figura 4.2 é apresentada a representação gráfica do erro de fechamento em um determinado ponto.

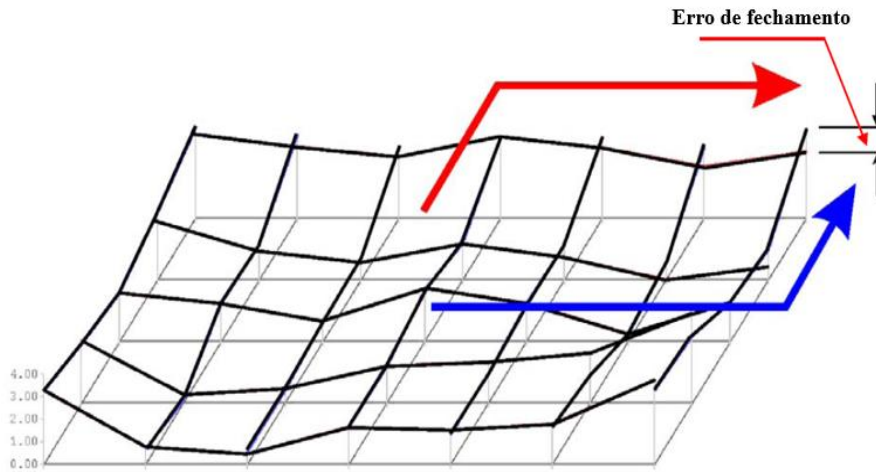


Figura 4.2 – Erro de fechamento.

Fonte: WYLER, 2003.

Segundo WYLER (2003), as principais causas que originam e promovem o aumento dos erros de fechamento são:

- a diferença de temperatura entre o objeto de medição e a base de medição;
- pequenas oscilações na posição do objeto de medição ou vibrações;
- medição realizada sem os cuidados necessários (aspecto que depende do operador);
- sujeira na superfície de medição ou na base do instrumento utilizado para medir;
- tempo de estabilização do instrumento desconsiderado antes da coleta de dados;
- sobreposição correta das etapas de medição ignorada (grandes erros de fechamento irão ocorrer quando os pontos de medição das linhas longitudinal e transversal não tiverem uma sobreposição adequada);
- posicionamento impreciso do instrumento na malha de medição;
- base de medição apresentando desgastes;
- superfície apresentando acidentes, ou pequenas ondulações de superfície, ou até mesmo pequenos furos ou rasgos que impossibilitam a medição com certos tipos

de bases do nível eletrônico e tornando o posicionamento correto do equipamento de medição difícil (oscilação da base de medição implica em má repetibilidade).

Observa-se portanto que o erro de fechamento trata-se de um erro que leva em consideração todos os fatores de influência na incerteza de medição discutidos nas seções anteriores.

O erro de fechamento é um índice importante para a qualidade da medição e da incerteza de medição. Normalmente, o erro de fechamento não deve exceder 20% a 25% do erro máximo, exceto quando este for menor do que $4\text{ }\mu\text{m}$, caso em que a percentagem do erro de fechamento pode ser maior (WYLER *et al.*, 2003).

Segundo a Laser Measurement System Application Note (2015), o erro de fechamento é uma medida da repetibilidade das medições e para muitos propósitos, um erro de fechamento menor que 2,5 micrometros (100 micropolegadas) é requerido para garantir boa reprodutibilidade. A RENISHAW (2001) considera a calibração de mesas metrológicas aceitável quando o máximo erro de fechamento não ultrapassar o valor de $2,5\text{ }\mu\text{m}$. Já a empresa Taylor Hobson PRECISION (2005) é um pouco mais conservadora, recomendando que o erro de fechamento não deva exceder 90% do valor do parâmetro de planeza denominado do pico ao vale (*peak-to-valley*), para garantir que as medições sejam de boa qualidade metrológica.

4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou as principais fontes de erro na determinação da planeza de mesas metrológicas, enfatizando suas principais características e determinando alguns fatores de influência da incerteza de forma quantitativa (equipamento de medição, diferença de temperatura entre superfícies da mesa desempenho, variação da temperatura ambiente sobre o sistema de medição, posicionamento do equipamento de medição e sujeira sobre a superfície de trabalho), e outro de forma qualitativa (vibração), utilizando dados presentes na literatura.

Finalmente o erro de fechamento foi definido e considerado o mais importante parâmetro na determinação da qualidade metrológica na determinação da planeza e mesas metrológicas (mesas de desempenho).

Neste trabalho utilizou-se um nível eletrônico da Taylor Hobson PRECISION, o *Talyvel 5*, para medir a planeza de duas mesas metrológicas de granito, utilizando o erro

de fechamento como parâmetro chave para avaliar a qualidade metrológica dos resultados de medição. É importante destacar que todo o procedimento de medição e avaliação dos resultados foi realizado seguindo as recomendações da fabricante Taylor Hobson PRECISION.

CAPÍTULO V

MÉTODOS MATEMÁTICOS APLICADOS NA DETERMINAÇÃO DA PLANEZA

5.1 INTRODUÇÃO

As características geométricas dos componentes manufaturados são formas geralmente simples, como linhas retas, planos, círculos, esferas, cilindros e cones. Estas características podem ser verificadas usando peças específicas de calibração padrão, porém, atualmente tal tarefa tem sido cada vez mais realizada por Máquinas de Medição por Coordenadas (MMCs) devido as mesmas apresentarem características como flexibilidade e ótima capacidade de aquisição de dados. A obtenção de um conjunto de pontos de dados que represente com exatidão a peça de trabalho a ser verificada provou ser difícil. A exatidão da medição depende do esquema de amostragem, de erros sistemáticos, da incerteza de medição e da robustez e eficiência dos algoritmos de verificação (GYULA, 2007).

As tolerâncias de forma, relacionadas às características individuais de peças de engenharia, controlam o quão perto da forma ideal a forma real deve ser. As tolerâncias de forma mais comumente ligadas às superfícies planas são a retilineidade e planeza. A utilização de algoritmos precisos na determinação do desvio da característica geométrica ideal irá reduzir a possibilidade de rejeição de peças em boas condições, evitando o diagnóstico errado e consequentemente o refugo de material.

Este capítulo apresentará os principais métodos matemáticos empregados na determinação da característica planeza, destacando-se o método dos mínimos quadrados (MQ) e o método da zona mínima (ZM). Ambos recomendados pela ISO 12781 (2011) na determinação da planeza.

Adicionalmente, o método denominado metodologia de superfície de resposta (*RSM*) será apresentado e utilizado na obtenção de uma superfície de regressão aplicada na determinação dos desvios de planeza.

5.2 MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS (MQ)

Segundo Kanada e Suzuki (1993), o método dos mínimos quadrados (MQ) é utilizado para determinar a melhor curva que se ajusta a um conjunto de pontos coordenados, em que a soma quadrática dos erros seja a mínima possível. Os erros provêm da diferença entre os valores a partir da curva de regressão ou de ajuste e os valores mensurados.

Considera-se um conjunto de i pontos coordenados (X_i, Y_i) no qual para cada valor de X_i haverá um valor correspondente de Y_i . A Figura 5.1 mostra um conjunto de pontos e a curva C que melhor se ajusta a eles. A diferença entre os valores de Y da curva e Y medido é denominado erro ou desvio de medição (D ou ε), representado pela Equação (5.1).

$$D = Y_{medido} - Y_{curva} \quad (5.1)$$

onde:

- $\varepsilon = D = \text{Desvio ou erro de medição};$
- $Y_{medido} = \text{Valor de } Y \text{ medido};$
- $Y_{curva} = \text{Valor de } Y \text{ obtido da curva de regressão}.$

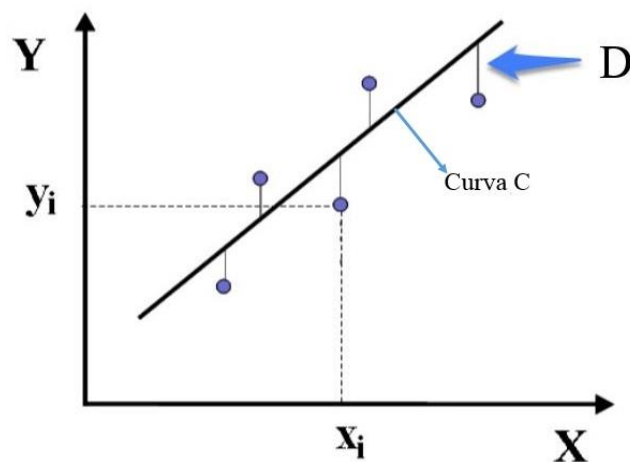


Figura 5.1 - Conjunto de pontos e a curva C que melhor se ajusta a eles.

O ajuste da curva C é tão confiável quanto menor for o somatório do quadrado dos erros, este definido pela Equação 5.2.

$$\sum D^2 = D_1^2 + D_2^2 + \dots + D_i^2 \quad (5.2)$$

onde:

- $\sum D^2 = \sum \varepsilon^2 = \text{somatório dos erros};$
- $D_1^2 + D_2^2 + \dots + D_i^2 = \text{Soma das } i \text{ parcelas de erro.}$

A curva dos mínimos quadrados é àquela em que o valor de $\sum D^2$ é o menor possível e pode ser uma reta, parábola, plano e assim por diante.

Segundo Lima Jr. (2003), quando há uma relação entre duas variáveis independentes e uma dependente é possível obter um plano regido pela Equação (5.3). Esta, estabelece uma relação em três dimensões cujos pontos são representados da seguinte forma: $(X_1, Y_1, Z_1), (X_2, Y_2, Z_2), \dots, (X_i, Y_i, Z_i)$.

$$Z_{MQ} = a_o + a_1X + a_2Y \quad (5.3)$$

onde:

- $a_o, a_1 \text{ e } a_2 = \text{Coeficientes do plano, a serem determinados};$
- $Z_{MQ} = \text{coordenada } Z \text{ do plano dos mínimos quadrados em função das coordenadas } X \text{ e } Y.$

As equações normais que correspondem ao plano dos mínimos quadrados são apresentadas na Equação (5.4), onde N representa o número de pontos medidos.

$$\begin{aligned} \sum Z &= a_o N + a_1 \sum X + a_2 \sum Y \\ \sum XZ &= a_o \sum X + a_1 \sum X^2 + a_2 \sum XY \\ \sum YX &= a_o \sum Y + a_1 \sum XY + a_2 \sum Y^2 \end{aligned} \quad (5.4)$$

Através da Equação (5.4) é possível obter os coeficientes a_0 , a_1 e a_2 , que determinam o plano que melhor se ajusta aos pontos medidos. A fim de facilitar a visualização do equacionamento, a Equação (5.4) é escrita em forma matricial como mostrado na Equação (5.5).

$$\begin{bmatrix} \sum Z \\ \sum XZ \\ \sum XY \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N & \sum X & \sum Y \\ \sum X & \sum X^2 & \sum XY \\ \sum Y & \sum XY & \sum Y^2 \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

Uma vez que o objetivo deste método é determinar os coeficientes da Equação (5.3), isola-se a matriz dos coeficientes a partir da Equação (5.5), obtendo-se a Equação (5.6).

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N & \sum X & \sum Y \\ \sum X & \sum X^2 & \sum XY \\ \sum Y & \sum XY & \sum Y^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum Z \\ \sum XZ \\ \sum XY \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

Lima Jr. (2003) desenvolveu um programa capaz de calcular os coeficientes mostrados na Equação (5.5) e consequentemente conseguir o plano de regressão dos mínimos quadrados. Este plano é a superfície de referência para o cálculo e avaliação dos desvios de planeza, como mostrado no Capítulo III.

5.3 MÉTODO DA ZONA MÍNIMA (ZM)

Sabe-se que as superfícies manufaturas exibem aleatoriedade dimensional devido a uma variedade de fatores de incerteza envolvidos no processo de fabricação (LIANG *et al.*, 1998). Como medir e avaliar de forma eficaz e eficiente as tolerâncias de forma de superfícies tem sido amplamente estudado por pesquisadores, uma vez que elas desempenham um papel importante no projeto mecânico e no controle da qualidade geométrica de produtos, do ponto de vista da precisão do processo de manufatura, da funcionalidade, intercambiabilidade e montagem do produto.

O método dos mínimos quadrados (MQ) é o mais utilizados na avaliação de tolerâncias de forma por conta de sua fácil implementação computacional, obtendo-se um programa eficiente e robusto. No entanto o MQ não garante o critério de zona mínima

especificado na ISO 1101 (2011), não podendo obter o valor mínimo ideal para tolerâncias de forma, podendo causar a rejeição de peças boas ou dentro das especificações de projeto.

A fim de melhorar a exatidão na avaliação de tolerâncias de forma, o critério de zona mínima (ZM) tem recebido maior atenção, sendo alguns algoritmos avançados baseados na ZM desenvolvidos recentemente (LIU *et al.*, 2011).

5.3.1 Revisão de literatura sobre métodos matemáticos aplicados na determinação da planeza

Métodos de busca direta para determinar a zona mínima (ZM) foram mencionados pela primeira vez por Murthy e Abdin (1980), que aplicaram as técnicas *Monte Carlo*, *simplex search* e *spiral search*, para solucionar e avaliar o problema da zona mínima de diversas tolerâncias de forma, obtendo melhores resultados comparado ao método dos mínimos quadrados (MQ).

Danish e Shunmugam (1991), calcularam a solução da zona mínima para tolerâncias de forma, modelando a forma ideal de características variadas como a função polinomial linear de *Chebyshev* e formulando uma função aproximação que minimiza o erro entre este e a função de *Chebyshev*. Anthony *et al.* (1996), discutiram a base teórica por trás dos algoritmos de troca (*“exchange algorithms”*), baseados em programação não-linear, desenvolvendo um algoritmo de troca de dados, baseados na inclinação ou declive (*“downhill”*). Eles também descreveram um algoritmo derivado, o qual começa com a solução para um subconjunto de pontos e, posteriormente, adiciona pontos e encontra a solução de forma iterativa até que todos pontos sejam considerados e estejam dentro da fronteira solução, determinando a zona mínima (ZM).

Carr e Ferreira (1995), propuseram um modelo de programação linear usando a matriz de rotação, com pequeno deslocamento, para linearizar as restrições de não-linearidade. Eles usaram essa técnica para resolver o problema da zona mínima e portanto calculando os desvios de retilineidade, planeza e cilindricidade.

Outro método proposto por Huang e colaboradores (1993), foi o método do menor paralelepípedo envolvente para a avaliação do desvio de retilineidade espacial a partir da composição de dois erros de retilineidade planar ortogonal (vertical e horizontal). Esta solução não pode garantir que o desvio avaliado tenha o mesmo valor em todas as direções.

Kaiser e Krishnan (1998), desenvolveram uma abordagem denominada “força bruta” (“*brute force*”), com a qual é possível encontrar a zona mínima usando um algoritmo iterativo simples, rotacionando as linhas que envolvem a zona mínima (ZM), geradas a partir de uma solução hipotética ou estimada inicialmente. O processo é interrompido quando a condição mencionada na definição de retilineidade é atingida. Este algoritmo foi estendido para determinar a planeza de uma face plana.

Ainda sobre a determinação da zona mínima, Samuel e Shunmugam (1999), utilizaram técnicas de geometria computacional para resolver o problema da zona mínima na determinação da retilineidade e planeza. No entanto, a planeza obtida a partir do caso 2-2 não foi considerado. O artigo de Lee (1997), trata extensivamente o modelo 2-2 e apresenta uma solução baseada no método da casca convexa (“*convex hull*”). Já Suen e Chang (1997), propuseram a aplicação de redes neurais (“*neural networks*”) para determinar a zona mínima para avaliação da retilineidade e planeza usando análise de regressão intervalar. Todavia, Zhang *et al.* (1999), afirmam em seu artigo que encontrar o desvio de retilineidade com base na condição da zona mínima não é possível, quando se utiliza um modelo linear simplificado. Eles propõem que tal avaliação seja realizada utilizando um modelo não-linear original.

Algoritmos para determinar a zona mínima que delimita a planeza ou retilineidade foram estabelecidos com êxito por um certo número de pesquisadores. Como o número de pontos de dados envolvidos na avaliação não é muito grande, geralmente menor do que 50. Hermann (2007), centrou-se na simplicidade e robustez de técnicas matemáticas na determinação da zona mínima, ao mesmo tempo primando pela eficiência do algoritmo baseado em geometria computacional na determinação da casca convexa (“*convex hull*”). Weber e colaboradores (2002), propuseram uma técnica de aproximação linear unificada para determinar tolerâncias de forma. A equação não linear para cada tipo de tolerância de forma foi solucionada através de programação linear usando expansão de *Taylor*.

Para a avaliação exata da zona mínima de tolerância de forma, Endrias e Feng (2003), formularam a função objetiva, através da transformação de parâmetros de um corpo rígido coordenado, empregando o algoritmo “*downhill simplex search algorithm*” para minimizar a função objetiva. Venkaiah e Shunmugam (2007), propuseram um algoritmo baseado em geometria computacional e um novo tipo de casca de controle (*control hull*) para estabelecer e avaliar os desvios de circularidade e cilindricidade pela zona mínima (ZM).

Os métodos acima referidos podem ser classificados em dois tipos: otimização numérica e geometria computacional. A otimização numérica utiliza métodos de programação não-linear ou linear, dentre os quais se destacam os métodos baseados em programação sucessiva linear, método Simplex (*simplex search*), *Monte Carlo* e expansão de *Taylor* para avaliar tolerâncias de forma utilizando o critério de zona mínima (ZM). Essas abordagens são métodos universais para resolver problemas de otimização e computacionais de forma eficiente, no entanto, elas podem apresentar resultados inexatos devido aos erros ocasionados pelas aproximações matemáticas (CUI *et al.*, 2007; LIAO; YU, 1998; MAO; CAO, 2006; KOVVUR *et al.*, 2008).

A geometria computacional pode identificar fielmente a zona mínima, garantindo como resultado o valor ideal ou muito próximo deste, porém, são computacionalmente onerosos por causa de sua natureza iterativa. Recentemente, com o desenvolvimento da inteligência computacional, a população bio-inspirado ou sócio-inspirado baseada em abordagens computacionais evolucionárias tais como algoritmo genético (*genetic algorithm* - GA), “*immune evolutionary algorithm*” (IEA) e “*particle swarm optimization*” (PSO) têm sido empregadas para resolver os problemas de otimização não-linear baseados no critério da zona mínima (ZM) para a avaliação de tolerâncias de forma e provou ser capaz de fornecer uma solução robusta e ideal (CUI *et al.*, 2007; LIAO; YU, 1998; MAO; CAO, 2006; KOVVUR *et al.*, 2008).

O método denominado “*ant colony optimization*” (ACO) é outra técnica de computação evolucionária mais recente e popular, desenvolvido por Dorigo *et al.* (1991) inspirado no comportamento de forrageamento da colônia de formigas, nas qual estas encontram os caminhos mais curtos entre seu ninho e a fonte de alimentação. Formigas depositam feromônio no terreno a fim de marcar algumas rotas favoráveis que devem ser seguidas por outros membros da colônia e, finalmente, um caminho ideal poderia ser revelado após a pesquisa de todos os membros (DORIGO *et al.*, 1996).

A técnica ACO explora um mecanismo semelhante para resolver problemas de otimização, sendo aplicado para resolver os problemas de “*traveling salesman*”, “*shop scheduling*”, “*mission planning*”, dentre outros nas quais mostrou-se, de forma inesperada, bem-sucedida nos últimos anos (DORIGO; GAMBARDELLA, 1997; BLUM; SAMPELS, 2004; REN *et al.*, 2008).

5.3.2 Modelamento matemático aplicado na determinação da planeza

Em seus estudos Park e Burdekim (1989), utilizaram dois modelamentos distintos para determinar a planeza de mesas metrológicas, chamados: modelo 3-1 e modelo 2-2.

No modelo 3-1, três pontos (P_1, P_2, P_3) são tomados para definir um plano superior e um ponto (P_4) é tomado de tal forma que um plano inferior passe por ele (ver Figura 5.2a). Já no modelo 2-2, dois pontos (P_1, P_2) são utilizados para um plano superior e mais dois pontos (P_3, P_4) para um plano inferior (ver Figura 5.2b). Cada ponto P_i é definido pelas coordenadas X_i, Y_i, Z_i . Cabe salientar que os pontos escolhidos não devem ser colineares.

Observa-se que os planos superior e inferior delimitam a região denominada zona mínima e, portanto, todos os pontos devem estar contidos entre estes dois planos, além de que estes devem ser paralelos e possuir a menor distância possível.

As Equações (5.7) e (5.8) definem os planos superior e inferior respectivamente.

$$Z_{superior} = aX + bY + c_{superior} \quad (5.7)$$

$$Z_{inferior} = aX + bY + c_{inferior} \quad (5.8)$$

onde:

- $a, b, c_{superior}, c_{inferior}$ = constantes a serem determinados para a obtenção dos planos que definem a zona mínima.

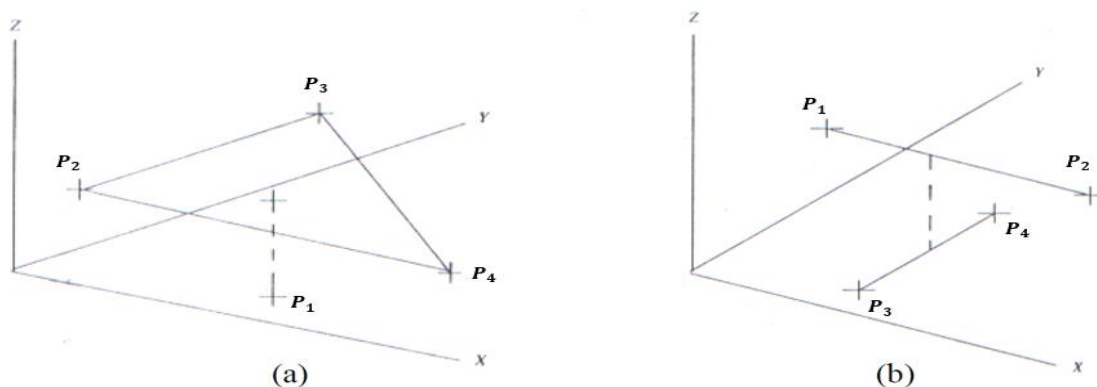


Figura 5.2 – Tomada de pontos de acordo com o modelo: (a) 3-1 e (b) 2-2.

Fonte: PAHK; BURDEKIN, 1989.

As equações para determinar os coeficientes presentes nas Equações (5.7) e (5.8) variam de acordo com o modelo utilizado. Para o modelo 3-1 tem-se:

$$a = \frac{(Z_2 - Z_3)(Y_3 - Y_4) - (Z_3 - Z_4)(Y_2 - Y_3)}{(X_2 - X_3)(Y_3 - Y_4) - (X_3 - X_4)(Y_2 - Y_3)} \quad (5.9)$$

$$b = \frac{(X_2 - X_3)(Z_3 - Z_4) - (X_3 - X_4)(Z_2 - Z_3)}{(X_2 - X_3)(Y_3 - Y_4) - (X_3 - X_4)(Y_2 - Y_3)} \quad (5.10)$$

$$c_{superior} = Z_2 - aX_2 - bY_2 \quad (5.11)$$

$$c_{superior} = Z_1 - aX_1 - bY_1 \quad (5.12)$$

Para o modelo 2-2 tem-se:

$$a = \frac{(Y_1 - Y_2)(Z_3 - Z_4) - (Y_3 - Y_4)(Z_1 - Z_2)}{(X_3 - X_4)(Y_1 - Y_2) - (X_1 - X_2)(Y_3 - Y_4)} \quad (5.13)$$

$$b = \frac{(X_3 - X_4)(Z_1 - Z_2) - (X_1 - X_2)(Z_3 - Z_4)}{(X_3 - X_4)(Y_1 - Y_2) - (X_1 - X_2)(Y_3 - Y_4)} \quad (5.14)$$

$$c_{superior} = Z_1 - aX_1 - bY_1 \quad (5.15)$$

$$c_{superior} = Z_3 - aX_3 - bY_3 \quad (5.16)$$

Kaiser e Krishnan (1998) mostraram que para uma nuvem de pontos é possível determinar, em primeira aproximação, a zona mínima. Neste estudo, uma distância inicial $d\theta$ entre os planos é definida, podendo ser ou não a mínima (ver Figuras 5.3a e 5.3b).

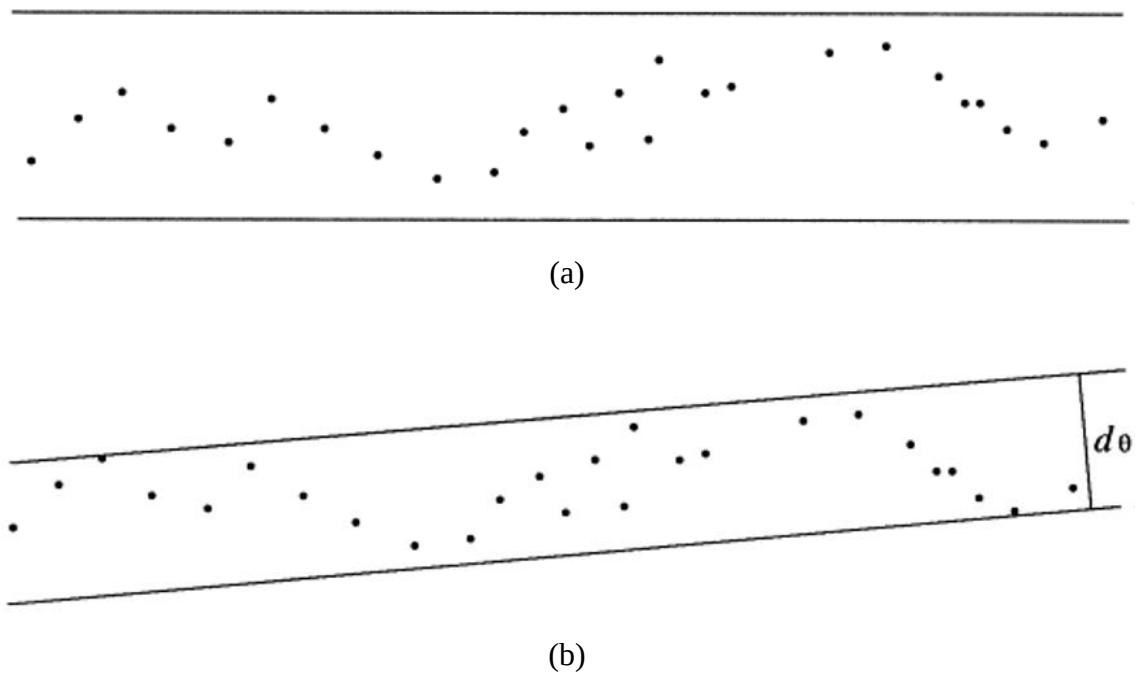


Figura 5.3 - Conjunto de pontos para determinação da zona mínima: (a) zona qualquer que delimita o conjunto de pontos; (b) solução inicial para a zona mínima.

Fonte: KAISER; KRISHNAN, 1998.

A distância inicial pode ser determinada considerando que um plano é regido pela Equação (5.17)

$$F: aX + bY + cZ + d = 0 \quad (5.17)$$

onde:

- a, b, c e d são constantes a serem determinadas.

Kaiser e Krishnan (1998) expressaram a Equação (5.17) em coordenadas esféricas para o caso planar conforme a Equação (5.18).

$$F_{\theta,\phi} : a \sin\phi \cos\theta + b \sin\phi \sin\phi + c \cos\phi + \rho_{\theta,\phi} = 0 \quad (5.18)$$

onde:

- θ e ϕ são os ângulos de rotação em torno dos eixos X e Y respectivamente, variando entre 0 e 360°.
- $\rho_{\theta,\phi}$ representa a distância normal à origem do sistema cartesiano para cada ponto coordenado (X_i, Y_i, Z_i) .

A distância de todos os pontos para o plano definido pela Equação (5.17) é calculado para posteriormente calcular a distância entre planos. Considerando que as constantes a, b, c e d são conhecidas, a distância de um plano F a um ponto $P_i = (X_i, Y_i, Z_i)$ é definido pela Equação (5.19).

$$d(P_i, F) = \frac{|aX_i + bY_i + cZ_i + d|}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad (5.19)$$

Através da Equação (5.18) é possível aplicar o conceito de rotação dos planos que compõem a zona mínima, em torno dos eixos X e Y . Todas as distâncias são coletadas para cada incremento de rotação em X e Y de forma separada. Finalmente toma-se a menor distância calculada em um determinado incremento de rotação, em X ou Y . Estas distâncias são calculadas por meio da Equação (5.20).

$$d_{\theta,\phi} = d_{max} - d_{min} \quad (5.20)$$

onde:

- d_{max} é a máxima distância entre um ponto e o plano em cada rotação incremental;
- d_{min} é a mínima distância entre um ponto e o plano em cada rotação incremental.

Calcular a menor distância entre planos de modo que todos os pontos de medição estejam entre eles, equivale a determinar o menor valor de $d_{\theta,\phi}$, qual o valor de rotação e em torno de qual eixo ocorreu. A Figura 5.4a exibe os planos após rotação e a Figura 5.4b indica em qual ângulo ocorreu a mínima distância calculada. Observa-se que a menor distância entre planos vale 7,88 mm quando a rotação foi em torno de 120° (KAYSER; KRISHNAN, 1998).

Lima Jr. (2003) utilizou os conceitos propostos por Pahk e Burdekin (1989), e Kaiser e Krishnan (1998) para avaliar a planeza de mesas metrológicas através do conceito de zona mínima. Lima Jr. desenvolveu um programa computacional baseado no algoritmo de Zhu e Ding (2002), descrito a seguir:

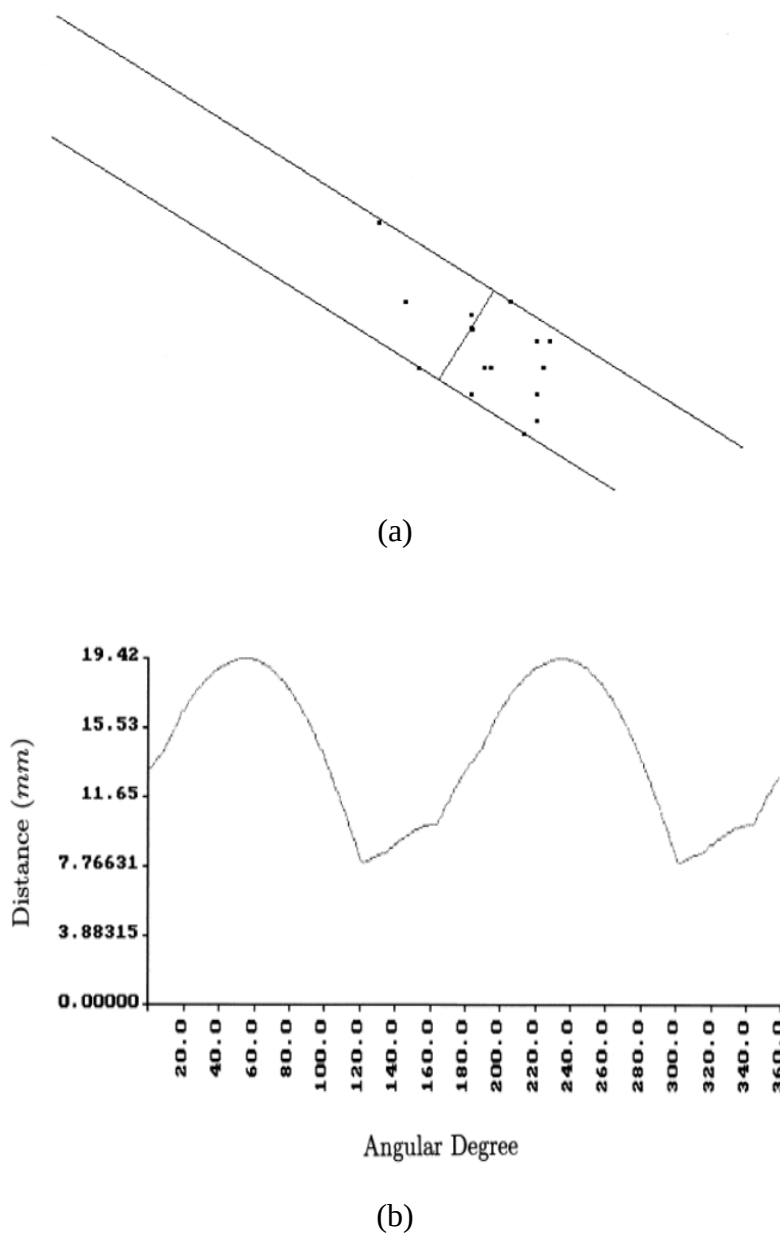


Figura 5.4 – Resultados da zona mínima: (a) após rotação; (b) ângulo correspondente a distância entre planos e que delimita a zona mínima.

Fonte: KAISER; KRISHNAN, 1998.

1. *Entrada de dados*: são informados as coordenada X e Y e os valores medidos (coordenada Z);
2. *Cálculo dos planos*: o programa seleciona três pontos que possuem os maiores Z , formando um plano, denominado plano inicial. Após a obtenção deste plano é necessário calcular a distância de todos os pontos para o plano inicial e verificar qual o ponto que apresenta a maior distância. Feito isso translada-se, de forma paralela, o plano inicial para que o mesmo passe pelo ponto com maior distância. Este plano agora é denominado plano inferior. A partir deste, calcula-se todas as distâncias aos pontos. Tomando mais uma vez o maior valor de distância, translada-se o plano inferior até o ponto correspondente a máxima distância, obtendo assim o plano superior que delimita uma zona cujos pontos estão contidos. Sendo portanto uma solução inicial para a zona mínima.
3. *Rotação sobre os eixos*: faz-se rotacionar um dos planos em torno de X e Y separadamente a fim de verificar se existe outro par de planos paralelos, que contenham todos os pontos, cuja distância seja menor do que a solução inicial. Caso isso ocorra deve-se adotar como solução a que apresentar menor valor de distância entre os planos.
4. *Determinação da zona mínima*: todas as distâncias entre planos são calculadas e coletadas para cada incremento de angulação e para cada eixo coordenado. A zona mínima é determinada pelo menor valor de distância entre planos calculado.

Nesta dissertação, o programa desenvolvido por Lima Jr. (2003) foi adaptado para receber valores de entrada em unidade de ângulos, uma vez que o mesmo foi feito para receber dados em unidades de comprimento. Isto foi realizado para facilitar e agilizar a calibração de mesas metrológicas quando se utiliza sistemas de medição que fornecem indicação de inclinação, como nível eletrônico, por exemplo.

5.4 METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA (RSM)

Segundo Silva e Burdekin (2002), a metodologia de superfície de resposta (*Response Surface Methodology - RSM*) é uma técnica de otimização que se baseia no emprego de planejamento fatorial. Esta técnica foi proposta inicialmente por Box (1950) e, desde então, tem sido difundida na modelagem matemática de diversos processos industriais. Como outra técnica de regressão, o *RSM* necessita de dados de entrada que

possuam relação entre si, ou seja, de variáveis dependentes e independentes. O principal objetivo de uma regressão é determinar as constantes que correlacionam as variáveis dependentes e independentes.

Para um conjunto de pontos, a Equação (5.21) pode representar uma regressão linear.

$$y_i = b_0 + b_1 x_i \quad (5.21)$$

Onde:

- y_i é a variável dependente;
- x_i é a variável independente;
- b_0 e b_1 são as constantes a serem determinadas;
- i é o i -ésimo ponto.

Por simplicidade, a Equação (5.21) pode ser escrita em forma de matriz, conforme mostra Equação (5.22).

$$Y = XB \quad (5.22)$$

Onde:

$$\bullet \quad Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_i \end{bmatrix}; X = \begin{bmatrix} 1 & x_1 \\ 1 & x_2 \\ 1 & x_i \end{bmatrix} \text{ e } B = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \end{bmatrix}.$$

Como todos os outros métodos de regressão, o *RSM* apresenta uma diferença entre o valor medido y_i e o valor calculado $\hat{y}$ pela curva de regressão, gerando um resíduo (e). Uma melhor otimização gera uma curva com menores valores de resíduos. Os valores de y_i são conhecidos previamente e os resíduos dependem apenas dos coeficientes b_0 e b_1 . No método por mínimos quadrados estas constantes são determinadas de modo que o somatório $\sum \varepsilon_i^2$ seja mínimo e para que isso ocorra é necessário que as suas derivadas em relação a b_0 e b_1 sejam nulas.

Portanto, b_0 e b_1 podem ser determinados resolvendo apenas uma equação matricial, mostrado pela Equação (5.23).

$$X^t X B = X^t Y \quad (5.23)$$

Onde:

- X^t = transposta de X ;
- X = matriz das variáveis independentes;
- B = matriz dos coeficientes (b_0 e b_1);
- Y = matriz das variáveis dependentes.

Para isolar a matriz B , basta multiplicar ambos os lados da Equação (5.23) pela matriz inversa $(X^t X)^{-1}$, obtendo-se a Equação (5.24).

$$B = (X^t X)^{-1} X^t Y \quad (5.24)$$

A Equação (5.24) é de extrema importância por que estabelece uma solução geral para uma regressão ou ajuste de um modelo por mínimos quadrados, independentemente da quantidade de parâmetros e observações necessárias para caracterizar o modelo, desde que as matrizes X e Y apresentem-se em coerência dimensional. Para que a Equação (5.24) seja solucionável, a matriz $(X^t X)^{-1}$ deve ser não singular ou, similarmente, apresentar determinante não nulo.

5.4.1 Modelamento da técnica RSM para uma superfície

Como mostrado na seção 5.4, foi possível determinar a solução geral da matriz de coeficientes b , a partir de uma regressão linear, de maneira que possa ser aplicada tanto em modelamentos lineares como em não lineares. Aplicar a técnica *RSM* na avaliação da planeza requer certos cuidados, pois existe a dependência de uma variável z em função de duas variáveis independentes x e y $\{z = f(x, y)\}$. A localização de um ponto de altura z sobre um plano é representado pelo par coordenado (x, y) . Como mostrado no capítulo III, os valores de inclinação ou altura sobre uma mesa metrológica definem sua planeza.

Silva e Burdekin (2002) estabeleceram uma metodologia para determinar o modelo matemático que melhor represente a regressão para o caso da exatidão volumétrica de máquinas de medição por coordenadas. Tal metodologia, consiste na utilização de dois modelos matemáticos sendo um de primeira ordem e outro de segunda ordem. As Equações (5.25) e (5.26) representam os modelos de primeira e segunda ordem respectivamente.

$$z_i = b_0 + b_1x_i + b_2y_i + b_3x_iy_i \quad (5.25)$$

$$z_i = b_0 + b_1x_i + b_2y_i + b_3x_i^2 + b_4y_i^2 + b_5x_iy_i \quad (5.26)$$

Escrevendo as Equações (5.25) e (5.26) em forma matricial, obtém-se as Equações (5.27) e (5.28).

$$[z_i] = [1 \quad x_i \quad y_i \quad x_iy_i] \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} \quad (5.27)$$

$$[z_i] = [1 \quad x_i \quad y_i \quad x_i^2 \quad y_i^2 \quad x_iy_i] \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \end{bmatrix} \quad (5.28)$$

Lima Jr. (2003) desenvolveu um programa computacional para determinar a matriz B para os modelos de primeira e segunda ordem, calculando e plotando a melhor superfície que passa por um conjunto de pontos medidos sobre um sistema coordenado.

O emprego da técnica *RSM* na determinação e avaliação da planeza não tem sido muito difundido, sendo mais empregado as técnicas dos mínimos quadrados (MQ) e da zona mínima (ZM). Porém, Lima Jr. (2003) provou que, estatisticamente, a regressão

obtida pela técnica *RSM* é mais eficaz comparado às técnicas *MQ* e *ZM*, uma vez que apresentou resíduos menores nos resultados apresentados.

5.5 COORDENADAS CODIFICADAS

Na programação, Lima Jr. (2003) utilizou coordenadas codificadas X_C e Y_C , ao invés das coordenadas usuais (x, y) , para as técnicas *ZM* e *RSM*, uma vez que as unidades empregadas nos eixos x e y (mm) se distinguem em relação ao eixo z (μm), de tal forma que se adotados a mesma unidade para x, y e z , existiria uma diferença de no mínimo 1000 (mil) vezes, o que poderia comprometer a confiabilidade dos resultados.

Lima Jr. (2003) utilizou a formulação proposta por Silva e Burdekim (2002) para definição das coordenadas codificadas X_C e Y_C , apresentadas nas Equações (5.29) e (5.30), respectivamente.

$$X_C = \frac{X_i - \left(\frac{X_{\text{máx}} + X_{\text{mín}}}{2}\right)}{X_{\text{máx}} - \left(\frac{X_{\text{máx}} + X_{\text{mín}}}{2}\right)} \quad (5.29)$$

$$Y_C = \frac{Y_i - \left(\frac{Y_{\text{máx}} + Y_{\text{mín}}}{2}\right)}{Y_{\text{máx}} - \left(\frac{Y_{\text{máx}} + Y_{\text{mín}}}{2}\right)} \quad (5.30)$$

Onde:

- $X_{\text{máx}}$ = maior valor ao longo de x ;
- $Y_{\text{máx}}$ = maior valor ao longo de y ;
- $X_{\text{mín}}$ = menor valor ao longo de x ;
- $Y_{\text{mín}}$ = menor valor ao longo de y ;
- X_i = coordenada x no ponto i ;
- Y_i = coordenada y no ponto i .

Utilizando as coordenadas codificadas X_C e Y_C , as expressões para os planos inferior, superior e médio, que definem a zona mínima, assumem as formas apresentadas nas Equações (5.31), (5.32) e (5.33) respectivamente.

$$aX_C + bY_C + cZ + d_{inferior} = 0 \quad (5.31)$$

$$aX_C + bY_C + cZ + d_{superior} = 0 \quad (5.32)$$

$$aX_C + bY_C + cZ + d_{medio} = 0 \quad (5.33)$$

As Equações (5.34) e (5.35) exibem as expressões, quando se utiliza coordenadas codificadas para as técnicas *RSM* de primeira e segunda ordem, respectivamente.

$$z_i = b_0 + b_1X_{Ci} + b_2Y_{Ci} + b_3X_{Ci}Y_{Ci} \quad (5.34)$$

$$z_i = b_0 + b_1X_{Ci} + b_2Y_{Ci} + b_3X_{Ci}^2 + b_4Y_{Ci}^2 + b_5X_{Ci}Y_{Ci} \quad (5.35)$$

5.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, foram apresentados os fundamentos teóricos acerca dos principais métodos matemáticos aplicados na determinação da planeza de superfícies metrológicas. Os métodos mostrados foram os difundidos métodos dos mínimos quadrados e da zona mínima, ambos recomendados pela ISO 12781 (2011) na determinação da planeza, e a técnica relativamente recente e que vem sendo difundido nos últimos anos denominado metodologia de superfície de resposta (*RSM*).

Nesta dissertação, os resultados de medição da inclinação de uma mesa metrológica serão coletados e inseridos no programa desenvolvido por Lima Jr. (2002), obtendo os desvios de planeza através dos três métodos matemáticos enfatizados neste capítulo (mínimos quadrados, zona mínima e metodologia de superfície de resposta).

CAPÍTULO VI

MATERIAIS, PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO, RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo versa sobre os materiais utilizados nos ensaios de calibração de mesas metrológicas realizados neste trabalho. Adicionalmente, relata sobre todo o procedimento de medição adotado, desde a limpeza das superfícies metrológicas até a obtenção dos dados de inclinação mensurados. Posteriormente, todos os resultados conseguidos são exibidos, tanto graficamente como em tabela de resultados (certificados), exibindo os desvios de planeza obtidos. Finalmente, realiza-se a análise e discussão acerca dos resultados obtidos.

6.2 MATERIAIS

6.2.1 Mesas metrológicas

Duas mesas metrológicas fabricados em granito, aqui denominados por Mesa 1 e Mesa 2, com dimensões de 1000 mm de comprimento, 630 mm de largura e 155 mm de espessura, foram utilizadas para a avaliação da planeza. Tais mesas servem como superfície de referência primária no Laboratório de Engenharia de Precisão (LEP) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Portanto as mesmas devem estar devidamente calibradas e seus graus de exatidão devem ser conhecidos.

6.2.2 Nível eletrônico - *Talyvel 5*

O nível eletrônico é um dispositivo capaz de medir a inclinação de uma superfície em relação a um determinado plano de referência. Diferentemente de sistemas de medição a laser e autocolimadores, o nível eletrônico apresenta seu próprio plano horizontal de referência, isto representa uma vantagem pois permite o cálculo da planeza com maior exatidão (RUNJE *et al.*, 2013). É um dos sistemas de medição mais utilizados para realizar a medição da planeza de mesas metrológicas. As vantagens do nível eletrônico sobre outros dispositivos de medição, como o laser interferométrico e autocolimador, são: baixo custo, simples manuseio e obtenção de resultados de forma fácil e rápida (GUSEL *et al.*, 2000).

Um nível eletrônico fabricado pela *TAYLOR HOBSON PRECISION*, denominado *Talyvel* 5, foi utilizado para medir as inclinações sobre duas mesas desempeno. O *Talyvel* 5 é basicamente um sistema eletrônico usado para detectar com exatidão a posição de um pêndulo em relação a seu invólucro protetor. É um equipamento de simples operação e não requer vasta experiência do operador para obter resultados com repetibilidade e exatidão. O *Talyvel* 5 é composto por duas unidades: a unidade de nível e a unidade de *display*, ambos exibidos na Figura 6.1 e Figura 6.2 respectivamente.

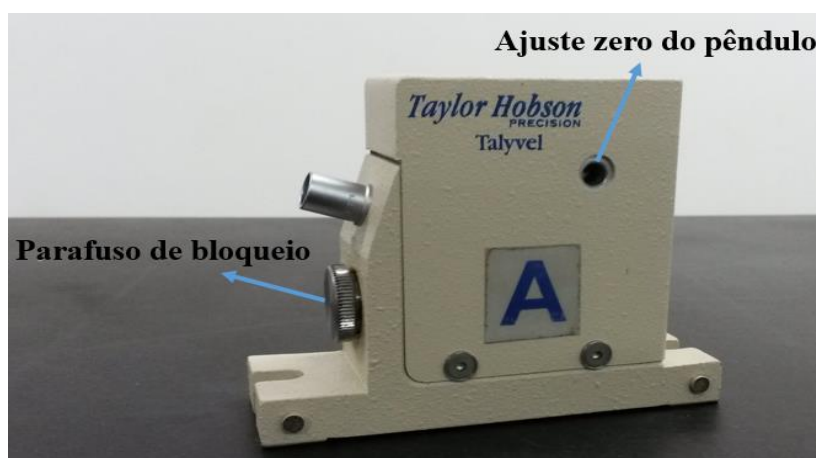


Figura 6.1 – Unidade de nível.



Figura 6.2 – Unidade de *display*.

A unidade de nível é o nível propriamente dito. É a parte do equipamento que é colocado sobre a superfície a ser verificada. Contém, além do pêndulo, um transdutor

elétrico para a detecção da posição do pêndulo. A parte frontal da unidade de nível é marcada com a palavra “*TALYVEL*” e as direções de inclinação tomam como referência esta face. Uma inclinação anti-horário resulta em uma leitura negativa e em um movimento do ponteiro para a esquerda e o contrário ocorre quando a inclinação é horária. Deve ser lembrado que quando a unidade de nível é invertida, o sinal de leitura e o movimento do ponteiro do mostrador analógico na unidade de *display* irá também ser invertida. A face frontal da unidade, também traz o ajuste zero do pêndulo, este é utilizado para conseguir um ajuste fino, na posição de equilíbrio. Um parafuso que bloqueia o pêndulo está localizado no lado esquerda da unidade de nível. Este, deve ser girado totalmente, no sentido horário, para bloquear o pêndulo durante seu transporte e armazenamento, e totalmente no sentido contrário para libertar o pêndulo antes da unidade de nível ser usada para a realização da medição.

A unidade do display, por sua vez, contém o amplificador operado a bateria, um mostrador analógico e um *display* de cristal líquido que fornece os valores das leituras de inclinação em arco de segundos. A alça de transporte pode ser movido para uma posição conveniente para o operador. O display digital pode ser comutado para mostrar a leitura na forma de ângulo, em arco de segundos, ou como um gradiente, em mm/m (0,001 in / in). O painel frontal inclui um controle “*SET ZERO*”, o que proporciona uma compensação elétrica equivalente a ± 50 segundos. Para a indicação do nível absoluto, o controle do “*SET ZERO*” deve registrar o valor 5,00 (ou seja, o ponto médio). Para efeitos de configuração, uma chave “*FINE*” é também incluída no medidor analógico. Quando esta é usada, a faixa mostrada do medidor analógico (normalmente ± 600 seg) é mudada para ± 10 seg. Também incorporada a parte frontal do painel está uma chave de amortecimento, que serve para minimizar efeitos de trepidação ou vibração (TAYLOR HOBSON, 2005).

Algumas especificações técnicas do *Talyvel 5* são exibidas a seguir.

- Faixa de medição: ± 600 segundos;
- Gradiente: ± 3 mm/metro $\pm 0,003$ in/inch;
- Saída analógica: 5 mV por arco de segundo;
- Precisão do sistema: 0,2 segundo ± 3 % do valor medido;
- Tempo de resposta: tempo de estabilização do display de 2 segundos;
- Faixa de temperatura de trabalho: -5 °C a 40 °C.

6.2.3 Base ajustável

Durante os testes de medição de planeza foi utilizado uma base ajustável para pré-determinar o comprimento base das linhas de medição. Este comprimento define o intervalo a ser percorrido sobre cada linha de medição (*generator*), ou em outras palavras, é a dimensão de cada estação de medição. Com a base ajustável pode-se ajustar o comprimento base de cada estação de medição em um valor não superior a 200 mm, com o auxílio de uma escala graduada para as medições de planeza e retilineidade. Ela acomoda a unidade de nível do *Talyvel 5* e a parte destinada a entrar em contato com o componente a ser mensurado apresenta a característica de auto alinhamento, projetado com rolamentos especiais de amortecimento. O ajuste de inclinação pode ser realizado através de um parafuso localizado na parte superior da base ajustável, assim é possível obter um declive zero, ou suficientemente próximo deste, na primeira estação de medição, para servir de referência às demais estações (TAYLOR HOBSON, 2005). A Figura 6.3 exibe a base ajustável.

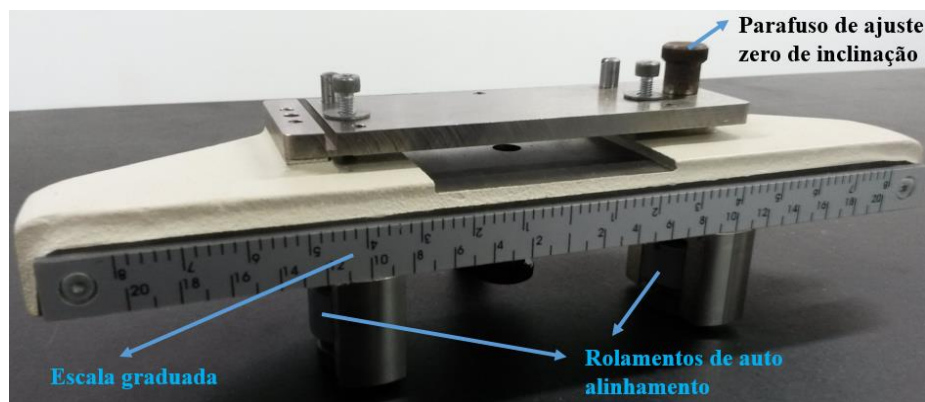


Figura 6.3 – Base ajustável.

6.2.4 Optical Analysis Software (OAS)

O *Optical Analysis Software (OAS)* foi desenvolvido para *Windows* pela empresa *Taylor Hobson PRECISION* para funcionar recebendo dados de medição de forma direta, utilizando o nível eletrônico *Talyvel 5*, ou indireta, através da inserção manual de dados mensurados. Com ele é possível realizar análises tanto de planeza quanto de retilineidade.

O *software* permite medir o desvio de planeza utilizando os métodos de Moody (*Union Jack*) e de malha retangular. Apresenta um menu simples e intuitivo, mostrando

um diagrama inicial da superfície a ser medida junto com as linhas de medição (*generators*) de superfície e instruções sobre o método de inserção de dados de medição. Cada linha de medição recebe uma denominação dependendo da direção considerada. Com o método de malha retangular, linhas mostradas na tela horizontalmente são denominadas linhas *A, B, C, D* e assim por diante, dependendo do número de estações ou tamanho da malha que se utilizará nas medições. As linhas perpendiculares às horizontais são chamadas *a, b, c, d*, etc (ver Figura 6.4). Com o método Union Jack as oito linhas de medição são denominadas: *AB, DC, HF, BC, AD, EG, AC e BD* (ver Figura 3.7 no capítulo III).

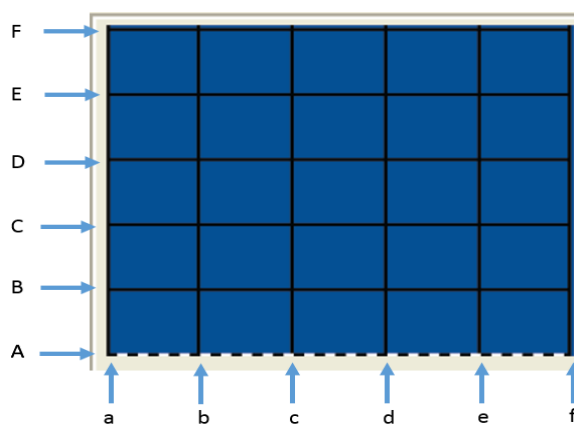


Figura 6.4 – Direções de medição referentes à malha retangular.

Todavia, cada ponto de medição recebe uma identificação. Por exemplo, adotando malha retangular como estratégia de extração de pontos, os pontos sobre a linha de medição *A* são denominados *A(0), A(1), A(2), A(3)...* Da mesma forma, pontos sobre a linha de medição (*generator*) *c* são chamados de *c(0), c(1), c(2), c(3)...* Os pontos *A(0), B(0), C(0), D(0)...* *a(0), b(0), c(0), d(0)...* localizam-se no início de cada linha de medição e são pontos de referência, portanto neles, as inclinações são consideradas nulas. Da mesma forma os pontos, quando se utiliza o método de Moody, por exemplo, sobre a linha *AB*, são denotados por *AB(0), AB(1), AB(2), AB(3)...*

Após o número selecionado de passos de medição ter sido introduzido e a inserção dos dados de medição, o programa calcula e mostra a forma de cada linha de medição e a planeza da superfície, denotando o valor denominado por do pico ao vale (*peak-to-valley*) como principal parâmetro de planeza.

Durante a medição, as leituras podem ser inseridas automaticamente no computador, utilizando o controle remoto do *Talyvel* 5. Uma vez que o computador coletou os valores das leituras realizadas pelo *Talyvel* 5, os valores são mostrados em arco de segundos e depois convertido em micrometros ou milionésimos de polegada (μm ou 0.000001 in).

Os resultados da medição de planeza são exibidos em forma de diagrama isométrico, em forma de tabela de dados contendo os desvios de planeza em cada ponto de medição ou como um certificado. Nesta última representação, os desvios de planeza, em micrometros (μm), são mostrados em cada ponto ou estação de medição, formando o traçado padrão escolhido, seja ele o de Moody ou malha retangular.

O *Flatness Program* utiliza o método de zona mínima, em conformidade com a ISO 8512 (1990) para determinar os desvios de planeza (TAYLOR HOBSON, 2005). Logo, o software calcula o desvio de cada ponto medido em relação a um plano ideal localizado numa zona mínima, ou seja, entre dois planos paralelos nos quais todos os pontos de medição estão contidos e cuja distância entre eles é a mínima possível.

O *Analysis Optical Software* calcula um parâmetro de extrema importância nas medições de planeza utilizando os métodos de Moody e de grade retangular, o erro de fechamento. Este é definido como sendo o máximo desvio que ocorre entre duas medições em um mesmo ponto ou estação de medição quando medidos usando caminhos distintos (WYLER, 2003). Este parâmetro representa uma medida da precisão e da qualidade das medições. A TAYLOR HOBSON PRECISION (2005) recomenda que o erro de fechamento não deve exceder 90% do valor do pico ao vale ou do pico máximo, para garantir que as medições são de boa qualidade metrológica, como foi mostrado no capítulo IV.

Há ainda a possibilidade da exibição dos resultados de duas formas distintas: a normal e a nivelada (*levelled*). No primeiro modo, todos os resultados de planeza são exibidos em relação ao plano inferior que delimita a zona mínima (ZM), sobre o qual todos os pontos de medição estão contidos. Logo, todos os desvios de planeza assumirão valores positivos, ou em outras palavras, apenas picos (*peak*) aparecerão nos resultados, inexistindo vales (*valley*). Neste caso a planeza é dada pelo valor do máximo pico (*maximum peak*) ou o máximo desvio de planeza. Vale salientar que no modo normal o máximo erro de fechamento (*maximum closure*) é exibido, sendo seu valor compensado em cada ponto de medição. Portanto, todos os resultados de desvio de planeza na forma normal se encontram corrigidos, sendo compensado o erro de fechamento.

Na forma nivelada (*levelled*) o plano de referência para o cálculo dos desvios de planeza é o plano médio, situado equidistante dos planos superior e inferior que delimitam a zona mínima (ZM). Neste caso podem aparecer picos (*peak*) e vales (*valley*), sendo a planeza definida como a distância do maior pico ao maior vale (*peak-to-valley*). Em outras palavras, a planeza é a soma entre o módulo do máxima pico (*maximum peak*) e o módulo do máximo vale (*maximum valley*). No modo nivelado, o erro de fechamento não é exibido e os resultados dos desvios de planeza não sofrem compensação devido a influência dos erros de fechamento.

Finalmente, cabe salientar que níveis eletrônicos muitas vezes não são acompanhados com *software* para aquisição e processamento de dados e obtenção de resultados em forma de tabelas ou gráficos. E, na maioria das vezes, necessita-se de um desembolso adicional para a aquisição de tal *software*. Neste contexto, Lima Jr. (2003) desenvolveu um programa computacional capaz de calcular a planeza de mesas metrológicas através de três métodos matemáticos distintos: mínimos quadrados, zona mínima e metodologia de superfície de resposta (como mostrado no capítulo V). A seção 6.4.2 desta dissertação mostra os resultados de planeza utilizando o sistema computacional desenvolvido por Lima Jr (2003) a partir de dados de medição conseguidos experimentalmente utilizando nível eletrônico de precisão, analisando-os e determinando a classificação das superfícies metrológicas do LEP, quanto ao grau de exatidão segundo a ISO 8512 (1990), visando avaliar os resultados encontrados em relação aos resultados calculados através do *software* desenvolvido pela empresa *Taylor Hobson PRECISION*.

6.3 PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO

Inicialmente a Mesa 1 foi limpada com líquido adequado e pano macio para retirar qualquer tipo de pó ou sujeira que poderiam influenciar nos resultados. Com o uso de régua graduada e giz macio traçou-se o padrão de Moody para o cálculo da planeza com área de 400 mm x 800 mm conforme Figura 6.5. Novamente utilizou-se um pano macio para retirar o excesso e pequenas partículas de giz, tomando o devido cuidado para que as linhas de Moody ficassem ainda visíveis.

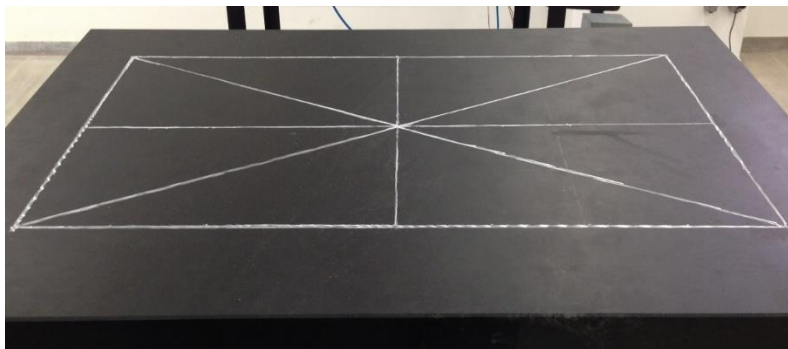


Figura 6.5 – Traçagem de Moody.

Posteriormente, o *Talyvel 5* foi adequadamente montado. Esperou-se um certo período de tempo para que o sistema se estabilizasse e o equilíbrio térmico fosse atingido, em torno de 20 °C.

A unidade de nível do *Talyvel 5* foi montada sobre a base ajustável com o qual se estabeleceu um comprimento base de 100 mm para medições sobre as seis linhas ortogonais. Ao medir sobre as linhas diagonais, o comprimento base deve ser devidamente alterado. O *Optical Analysis Software* fornece automaticamente este valor, o qual deve ser utilizado para ajuste utilizando a escala graduada da base ajustável. Com este acessório foi possível ainda ajustar o zero de referência na primeira estação da linha de medição (*generator*) inicial utilizando o parafuso de ajuste zero de inclinação.

Finalmente foram realizadas as medições de inclinação em cada linha de medição, movendo-se o conjunto unidade de nível-base ajustável sobre as linhas de medição e em espaços iguais ao comprimento base. Uma barra extrudada de alumínio foi utilizada como guia, garantindo o percurso em linha reta do nível eletrônico. Todos os dados foram coletados e inseridos no *Optical Analysis Software* automaticamente com o uso de controle remoto e o resultado de planeza foi obtido.

O perfil de malha retangular agora é traçado sobre a Mesa 1 utilizando novamente a régua graduada e giz macio, obtendo o traçado conforme exibido na Figura 6.6. Utilizou-se a mesma área desenhada com o método *Union Jack*.

No método de malha retangular o comprimento base é sempre o mesmo em todas as linhas de medição (*generators*). Ajustou-se este em 100 mm, logo, a malha retangular foi formada com 5 linhas numa direção (denominadas *A, B, C, D, E*) e 9 linhas perpendiculares àquelas (denominadas *a, b, c, d, e, f, g, h, i*). Ao término da coleta de dados, o *Optical Analysis Software* calcula e mostra os resultados de desvio de planeza.



Figura 6.6 – Traçagem da malha retangular.

Todo o procedimento descrito anteriormente foi aplicado à Mesa 2.

A Figura 6.7 exibi o *setup* utilizado para os testes de planeza em mesas metrológicas no Laboratório de Engenharia de Precisão (LEP) da UFPB.

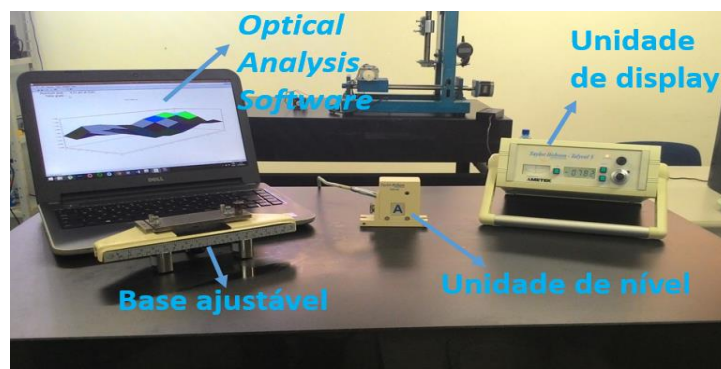


Figura 6.7 - *Setup* do sistema de medição – nível eletrônico, Talyvel 5.

6.4 RESULTADOS, ANÁLISES E DISCUSSÕES

6.4.1 Resultados a partir do *Optical Analysis Software (OAS)*

O *Optical Analysis Software* apresenta os resultados de medição de desvio de planeza através de representação gráfica isométrica, lista de dados e certificado. As Figuras 6.8, 6.9, 6.10 e 6.11 exibem os resultados da análise de planeza para a Mesa 1 utilizando os métodos de Moody e de malha retangular gerados pelo *Flatness Program*.

Todos os resultados são exibidos no modo normal de visualização conforme descrito na seção 6.2.4.

O valor de planeza encontrado para a Mesa 1, utilizando o método Union Jack, foi de 4,68 μm , apresentando um erro de fechamento de -0,55 μm na linha HF e -3,34 μm na linha EG. Já utilizando o método de malha retangular, o valor do máximo desvio de planeza obtido foi de 3,02 μm , com erro de fechamento igual a -1,53 μm . Os máximos desvios de planeza mostrados nas Figuras 6.9 e 6.11 se encontram circulados a fim de destacá-los.

Maximum peak : 4,68 μm
Closing error in HF : -0,55 μm
Closing error in EG : -3,34 μm

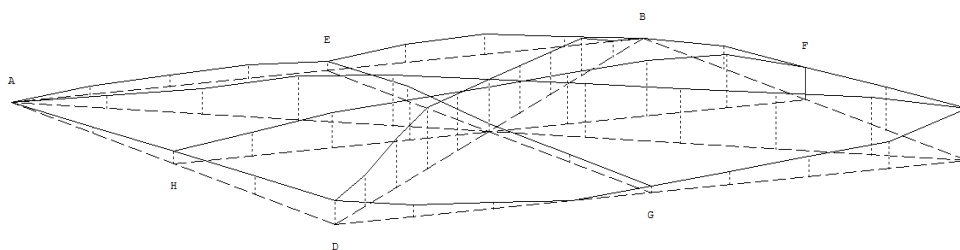


Figura 6.8 - Gráfico isométrico para o método Union Jack - Mesa 1.

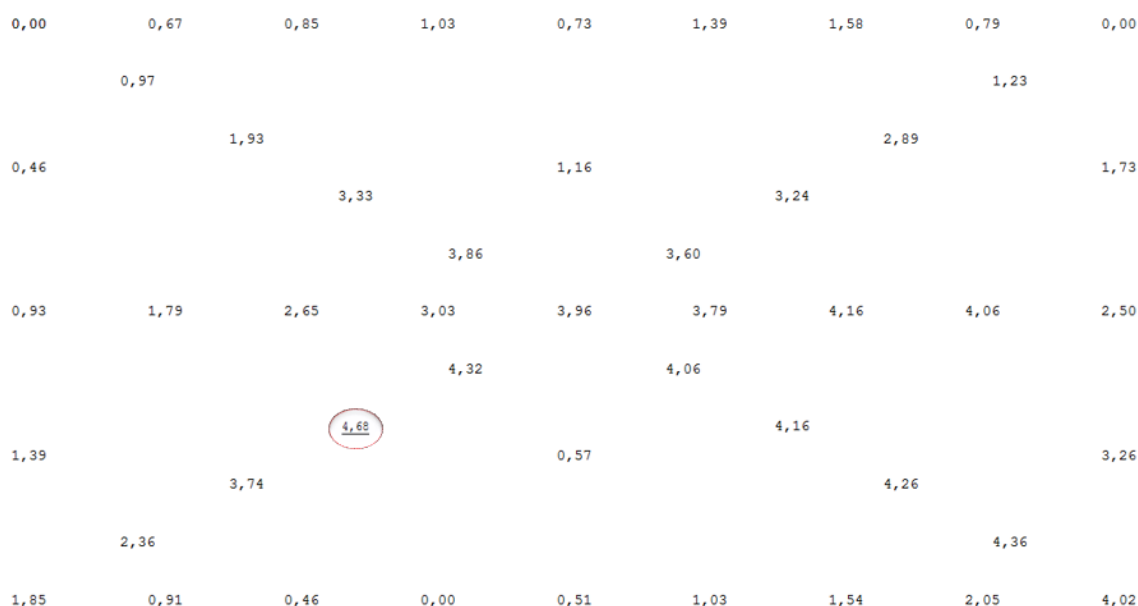


Figura 6.9 - Certificado para o método Union Jack - Mesa 1 (valores em μm).

Maximum peak : 3,02 μm at A(0)
Maximum closure : -1,53 μm at C(2)

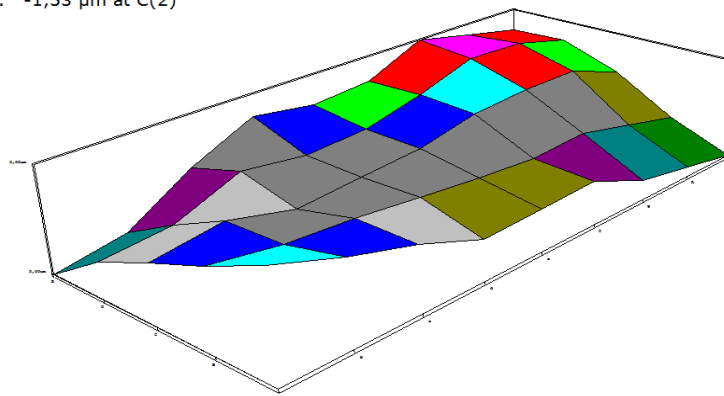


Figura 6.10 - Gráfico isométrico para o método de malha retangular - Mesa 1.

0,00	0,37	1,52	2,38	2,11	2,26	3,02	2,66	2,32
1,04	1,22	1,99	1,74	1,87	2,30	2,86	2,81	2,38
1,69	1,98	1,53	1,70	1,83	2,21	2,35	2,36	1,75
2,31	2,02	1,90	1,70	1,54	1,39	1,48	1,09	0,71
3,02	2,36	1,87	1,17	1,23	1,29	0,60	0,30	0,00

Figura 6.11 - Certificado para malha retangular - Mesa 1 (valores em μm).

Os resultados de planeza para a Mesa 2 são exibidos, a seguir, nas Figuras 6.12, 6.13, 6.14 e 6.15. A partir destas, observa-se que o valor de planeza encontrado para a mesa metrológica 2, utilizando o método Union Jack, foi de 5,17 μm , apresentando um erro de fechamento de 1,48 μm na linha HF e 2,93 μm na linha EG. Já utilizando o método de malha retangular, o valor do máximo desvio de planeza obtido foi de 2,72 μm , com erro de fechamento igual a -1,62 μm . Os máximos desvios de planeza mostrados nas Figuras 6.13 e 6.15 se encontram circulados, destacando-os.

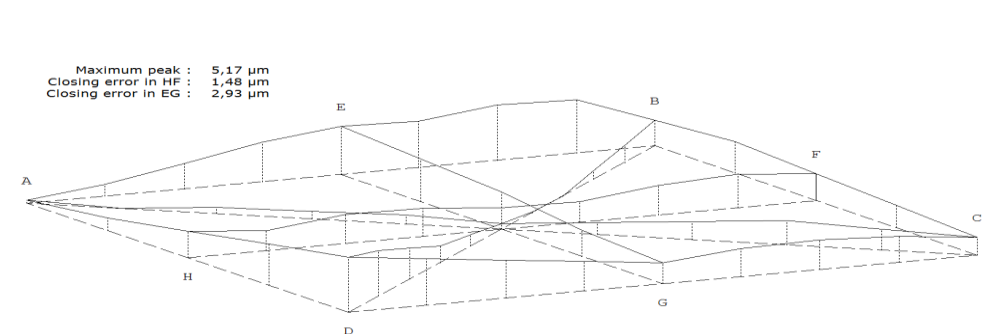


Figura 6.12 - Gráfico isométrico para o método Union Jack - Mesa 2.

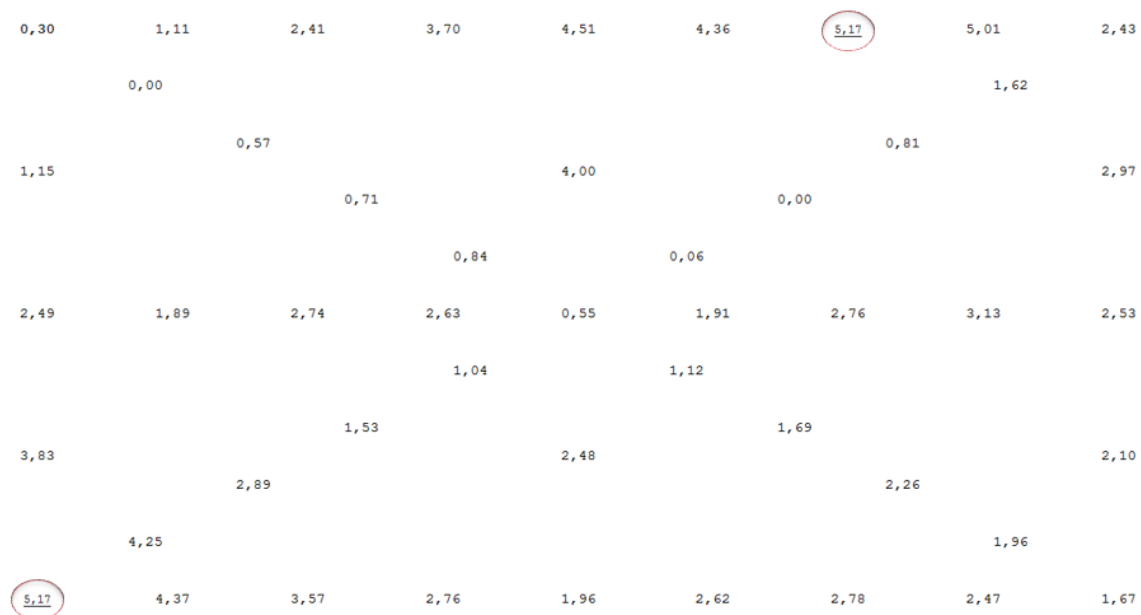


Figura 6.13 - Certificado para o método Union Jack - Mesa 2 (valores em μm).

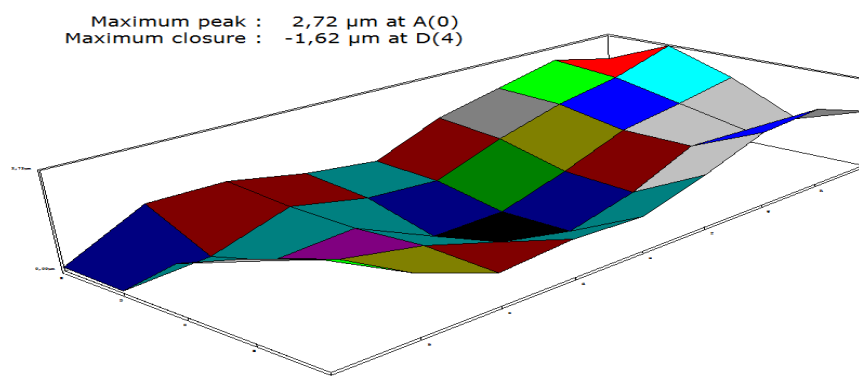


Figura 6.14 - Gráfico isométrico para o método de malha retangular - Mesa 2.

0,11	1,20	1,19	0,82	0,61	1,41	1,86	2,31	1,91
0,06	0,26	0,98	0,57	0,49	1,20	1,75	2,12	2,72
1,41	0,75	0,93	0,00	0,04	0,66	1,36	1,69	2,04
2,11	1,38	1,02	0,39	0,00	0,51	1,32	1,25	1,08
2,72	1,63	0,88	1,05	0,99	1,52	2,18	2,34	1,74

Figura 6.15 - Certificado para malha retangular - Mesa 2 (valores em μm).

A Tabela 6.1 exhibe os máximos desvios de planeza (valor do pico ao vale) a partir do OSA, para as mesas 1 e 2, utilizando os métodos de Moody e malha retangular, com o modo de visualização normal.

Tabela 6.1 – Resultados de planeza para as Mesas 1 e 2, utilizando o modo normal.

Mesa metrológica	Planeza (valor do pico ao vale) - Union Jack / μm	Planeza (valor do pico ao vale) – Malha retangular / μm
1	4,68	3,02
2	5,17	2,72

As Figuras 6.16 à 6.23 apresentam os resultados (gráficos e certificados) de planeza para as Mesas 1 e 2, utilizando os métodos de Moody e malha retangular, porém no modo de visualização nivelado (*levelled*), ou seja, sem compensação do erro de fechamento. Os valores circulados em vermelho nas Figuras 6.17, 6.19, 6.21 e 6.23 representam os máximos desvios de planeza positivo e negativo, ou, o máximo pico (*maximum peak*) e máximo vale (*maximum valley*) respectivamente. Como mostrado no capítulo III, a soma absoluta destes valores corresponde ao parâmetro do pico ao vale

(*peak-to-valley*) que é utilizado para determinar o grau de exatidão de desempenos segundo a ISO 8512 (1990).

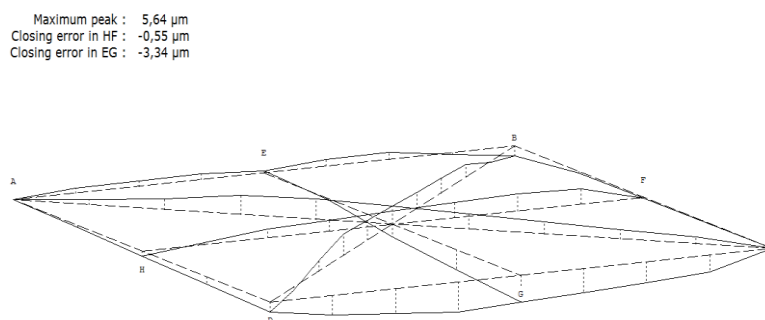


Figura 6.16 - Gráfico isométrico para o método Union Jack, modo nivelado - Mesa 1.

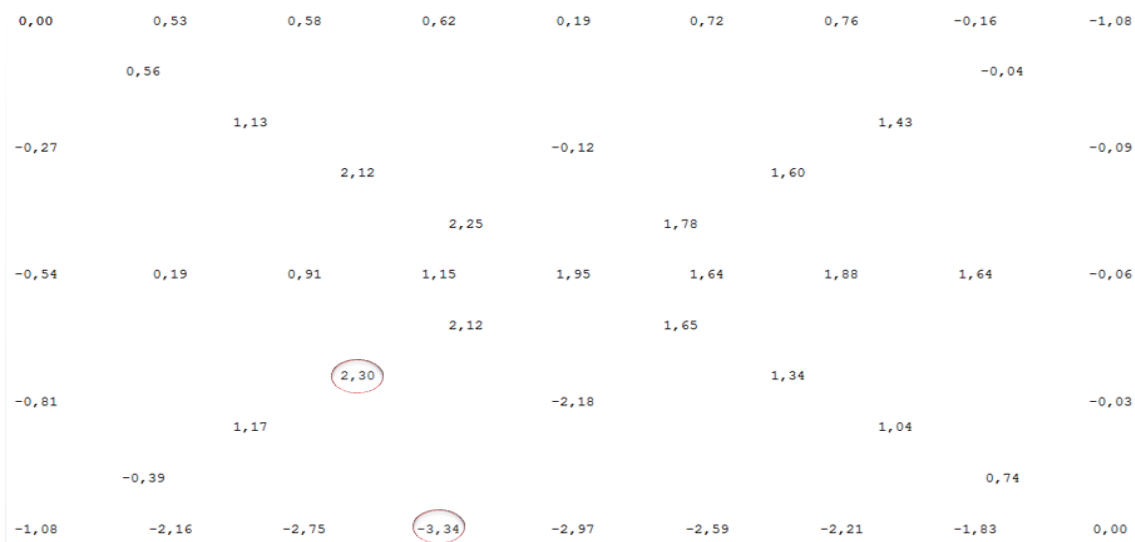


Figura 6.17 - Certificado para o método Union Jack, modo nivelado - Mesa 1 (valores em μm).

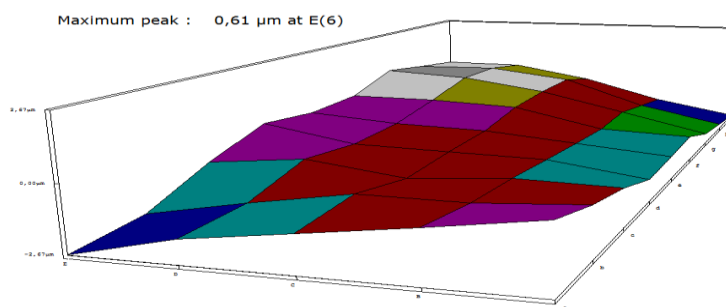


Figura 6.18 - Gráfico isométrico para o método de malha retangular, modo nivelado - Mesa 1.

-2,67	-2,26	-1,06	-0,16	-0,39	-0,20	0,61	0,29	0,00
-1,71	-1,49	-0,68	-0,88	-0,71	-0,24	0,36	0,35	-0,03
-1,16	-0,82	-1,23	-1,01	-0,84	-0,42	-0,24	-0,18	-0,75
-0,62	-0,87	-0,94	-1,10	-1,22	-1,33	-1,19	-1,54	-1,87
0,00	-0,61	-1,06	-1,71	-1,61	-1,51	-2,16	-2,42	-2,67

Figura 6.19 - Certificado para malha retangular, modo nivelado - Mesa 1 (valores em μm).

Maximum peak : 6,04 μm
 Closing error in HF : 1,48 μm
 Closing error in EG : 2,93 μm

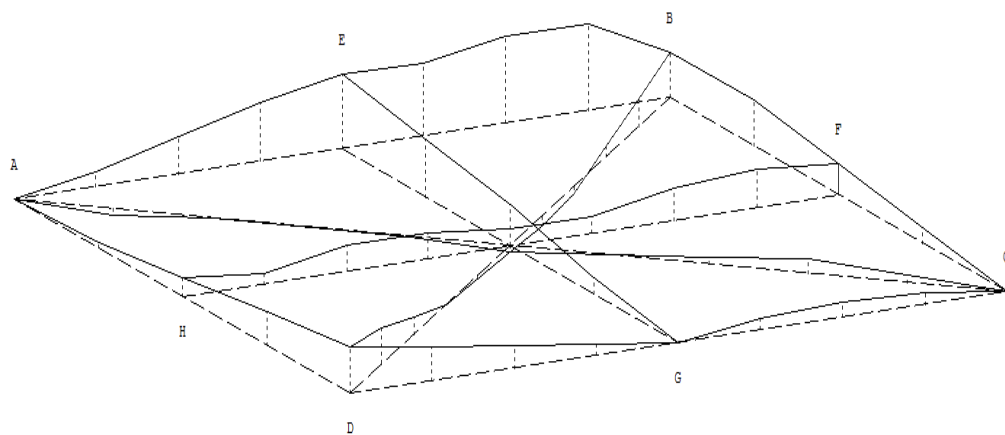


Figura 6.20 - Gráfico isométrico para o método Union Jack, modo nivelado - Mesa 2.

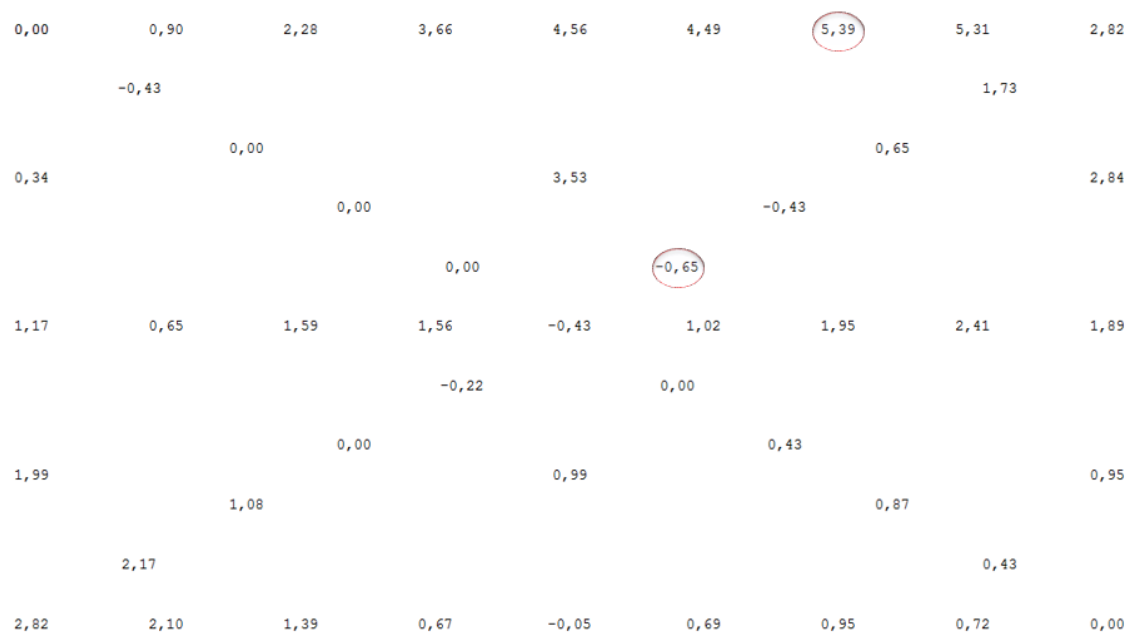


Figura 6.21 - Certificado para o método Union Jack, modo nivelado - Mesa 2 (valores em μm).

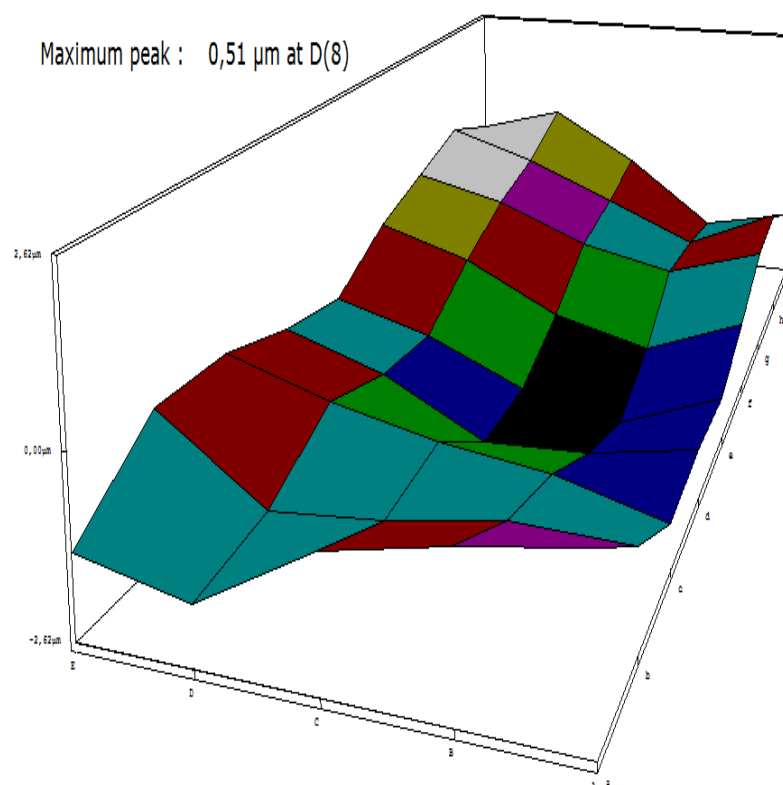


Figura 6.22 - Gráfico isométrico para o método de malha retangular, modo nivelado - Mesa 2.

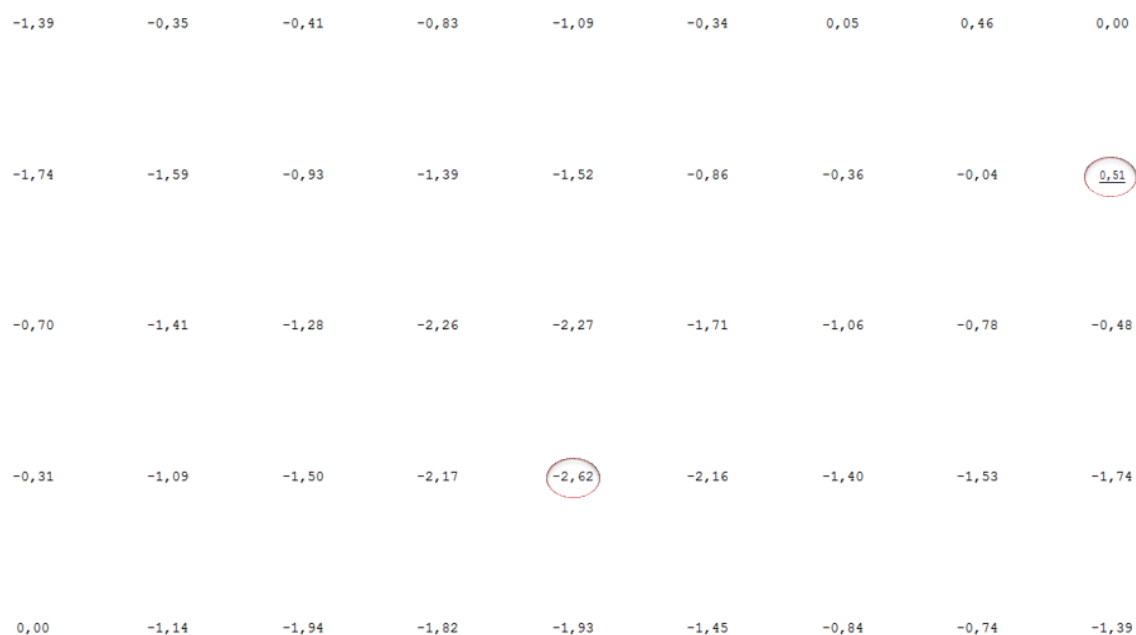


Figura 6.23 - Certificado para malha retangular, modo nivelado - Mesa 2
(valores em μm).

A Tabela 6.1 exibe os máximos desvios de planeza (valor do pico ao vale) a partir do OSA, para as mesas 1 e 2, utilizando os métodos de Moody e malha retangular, com o modo de visualização nivelado.

Tabela 6.2 – Resultados de planeza para as Mesas 1 e 2, utilizando o modo nivelado.

Mesa metrológica	Planeza (valor do pico ao vale) - Union Jack / μm	Planeza (valor do pico ao vale) – Malha retangular / μm
1	8,98	3,28
2	6,69	3,13

6.4.1.1 Análise e discussões dos resultados obtidos pelo OAS

Os erros de fechamento calculados utilizando o OAS mostram alta qualidade na aquisição de dados de medição, pois os valores apresentados em todos os testes satisfazem a recomendação da TAYLOR HOBSON PRECISION (2005), ou seja, os erros de

fechamento não excederam 90% do valor do pico ao vale (*peak-to-valley*). Portanto, os resultados de planeza obtidos estão validados do ponto de vista da qualidade metrológica.

Para determinar qual o grau de exatidão das mesas metrológicas estudadas, comparou-se os resultados de desvio de planeza obtidos com os valores que constam na Tabela 2.2, cujos dados de interesse, constam na Tabela 6.3, destacados em vermelho.

Tabela 6.3 – Excerto da Tabela 2.2 (Tolerâncias de acordo com o grau de exatidão de mesas metrológicas fabricadas com granito ou ferro fundido).

Dimensões da mesa / mm	Tolerâncias para o desvio de planeza para mesas metrológicas de granito e ferro fundido / μm			
	Grau 0	Grau 1	Grau 2	Grau 3
630 × 400	5	10	20	39
1000 × 630	6	12	24	49
1600 × 1000	8	16	33	66

Fonte: ISO 8512, 1990, p.3.

Constatou-se que todos os valores de desvio de planeza calculados pelo OAS, modo normal (Tabela 6.1), apontam que as mesas metrológicas 1 e 2 pertencem ao grau de exatidão “0” em conformidade com os padrões ISO 8512 (1990). Em outras palavras, a planeza ou valor do pico ao vale calculados pelo OAS não excederam 6 μm .

Este resultado mostra que, independentemente do método de traçagem de linhas de medição utilizado, seja ele o Union Jack ou malha retangular, os resultados convergiram, apontando para um mesmo grau de exatidão. Vale ressaltar que a principal vantagem do uso do método de Moody é a rapidez na coleta de dados e na obtenção dos resultados. Logo, quando a rapidez na calibração de mesas é fator primordial, recomenda-se utilizar este método ao de malha retangular, sobretudo em mesas de pequenas dimensões.

Em contrapartida, quando a mesa apresenta grandes dimensões, a configuração de malha retangular é preferida, uma vez que varre com maior densidade de pontos a área de medição, obtendo resultados de planeza com maior exatidão.

Se os resultados do OAS, modo nivelado (Tabela 6.2), fossem utilizados, as Mesas 1 e 2 seriam classificadas como de grau “0” quando se considerasse o método de malha

retangular (planezas de 3,28 μm e 3,13 μm para as Mesas 1 e 2 respectivamente), e de grau “1” pelos resultados usando a técnica de Moody (planezas de 8,98 μm e 6,69 μm para as Mesas 1 e 2 respectivamente). Isto ocorre devido ao fato de que o modo nivelado não faz a compensação do erro de fechamento, que é influenciado por diversos fatores que favorecem o aumento da incerteza de medições como mostrado no capítulo IV, impulsionando assim, a obtenção de resultados com maiores desvios de planeza. A mudança na classificação apenas para os resultados via técnica de Moody são consequência dos maiores erros de fechamento encontrados para esta técnica (-3,34 μm para a Mesa 1 e 2,93 μm para a Mesa 2).

As diferenças nos valores de planeza encontrados podem decorrer principalmente de erros aleatórios relacionados a variação da temperatura ambiente, vibração mecânica, mal posicionamento do nível eletrônico ao movê-lo, presença de minúsculas partículas sobre a mesa metrológica, dentre outros fatores que influenciam diretamente sobre a incerteza de medição.

6.4.2 Resultados a partir do sistema desenvolvido por Lima Jr. (2003)

A necessidade de um sistema computacional robusto e eficiente para o cálculo da planeza de superfícies é evidente, uma vez que a grande quantidade de dados e os métodos matemáticos empregados tornam impraticável a obtenção da planeza sem o auxílio de um programa computacional.

Existem no mercado diversos programas computacionais ou *softwares* disponíveis para a avaliação de tolerâncias de forma, sobretudo a planeza. Alguns acompanham o equipamento de medição e outros não. Neste caso, a aquisição do *software* requer um desembolso adicional.

Com o intuito de gerar economia para a indústria e laboratórios, pesquisadores têm buscado desenvolver programas de computador que satisfaçam suas demandas. Neste contexto, Lima Jr. (2003) desenvolveu um programa capaz de calcular a planeza de mesas metrológicas, mostrando os resultados de forma gráfica. O autor usou três métodos matemáticos distintos para avaliação da planeza: mínimos quadrados (MQ), zona mínima (ZM) e metodologia de superfície de resposta (RSM).

A fim de avaliar o desempenho do sistema computacional proposto por Lima Jr. (2003), os resultados de inclinação medidos, com o nível eletrônico *Talyvel* 5, sobre a Mesa 2, foram inseridos e processados pelo referido *software*.

Algumas observações devem ser consideradas antes da apresentação e análise dos resultados de planeza obtidos com o uso do sistema computacional desenvolvido por Lima Jr. (2003):

1. O *software* proposto por Lima Jr. (2003) foi desenvolvido para receber dados em μm . Portanto, os dados de inclinação (em *arcseg*) conseguidos com o nível eletrônico foram devidamente convertidos em alturas (μm), como mostrado no capítulo III.
2. Na programação, Lima Jr. (2003) considerou uma malha retangular como técnica de extração de pontos, porém, para cada coordenada (x, y) , admitiu-se apenas um valor de altura z , correspondente ao valor medido de inclinação para cada coordenada (x, y) ou ponto de medição.
3. Uma malha retangular com área de 800 mm x 400 mm foi desenhada sobre a Mesa 2 do Laboratório de Engenharia de Precisão (LEP) da UFPB. Utilizou-se um comprimento base de 100 mm, formando-se uma malha com 45 pontos de medição. Medidas de inclinação foram realizadas para cada ponto da malha sobre cada linha de medição, seguindo sempre a mesma direção ao movimentar o nível eletrônico.

Para interesse dos objetivos desta dissertação, o sistema computacional desenvolvido por Lima Jr. (2003) foi adaptado para receber dados de entrada em unidades de inclinação (arco de segundos) conseguidos a partir de um nível eletrônico de precisão. Outra adaptação foi realizada para que o referido programa exibisse todos os resultados de desvio de planeza, para cada ponto de medição, em toda a malha.

O maior valor do pico ao vale (*peak-to-valley*) calculado com os métodos MQ e ZM foi utilizado como parâmetro para classificar a mesa metrológica segundo a ISO 8512 (1990), seguindo as recomendações da ISO 12781 (2011). Todavia os desvios de planeza, caracterizado por picos e vales serão exibidos em forma de tabela de resultados para os métodos matemático MQ e ZM.

Em sua dissertação, Lima Jr. (2003) realizou uma análise da significância estatística dos métodos matemáticos dos MQ, ZM e *RSM* de primeira e segunda ordem. Quanto à técnica *RSM*, o mesmo constatou que o método *RSM* de segunda ordem mostrou-se superior comparado ao método *RSM* de primeira ordem quanto à significância estatística, obtendo-se assim melhores resultados para a curva de regressão. Por conta disto, nesta dissertação será utilizado o método *RSM* de segunda ordem para obtenção dos desvios de planeza de mesas metrológicas, além dos métodos MQ e ZM.

Cabe salientar que, ao contrário dos métodos da zona mínima e dos mínimos quadrados, não existe norma específica que trate acerca do método *RSM* aplicado à determinação da planeza de superfícies metrológicas. Todavia, as definições de picos e vales trazidas pelo padrão ISO 12781 (2011) não se aplicam a esta técnica. Adicionalmente, a equação matemática que rege a regressão obtida com o método *RSM* não denota um plano ideal, como ocorre nos métodos MQ e ZM, e sim, uma superfície tridimensional que melhor se adequa ao conjunto de pontos medidos sobre a superfície de trabalho de uma mesa metrológica. Em virtude disto, esta dissertação propõe adotar os valores coordenados *z* obtidos a partir da equação que rege a superfície de regressão utilizando *RSM* de segunda ordem (Equação 5.35 do capítulo V) como desvios de planeza. Desta forma, propõe-se adotar a diferença entre os valores máximo e mínimo da curva de regressão como parâmetro para classificar as mesas metrológicas quanto ao grau de exatidão a partir das especificações presentes na ISO 8512 (1990).

Todos as medições de inclinação, em arco de segundos, e suas alturas correspondentes, bem como as alturas tomadas como dados de entrada para o sistema desenvolvido por Lima Jr. (2003), para análise de planeza, se encontram na Tabela A.1 do Apêndice A.

As Figuras 6.24, 6.25 e 6.26 exibem os resultados gráficos encontrados ao se utilizar os dados medidos com nível eletrônico no programa proposto por Lima Jr. (2003), onde estão plotados os planos da zona mínima, plano dos mínimos quadrados, a curva ou superfície gerada através do método *RSM* de segunda ordem e o conjunto de pontos medidos.

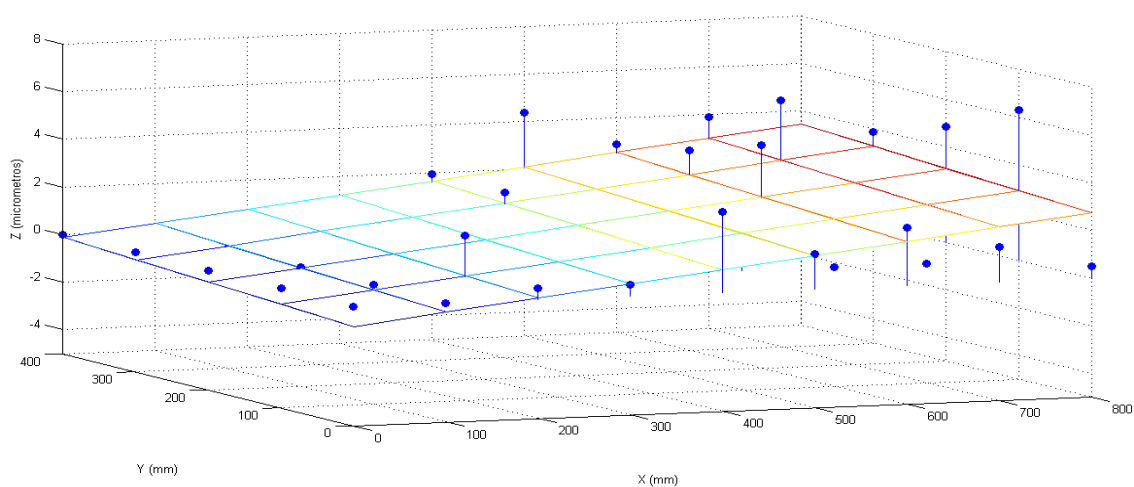


Figura 6.24 – Plano dos mínimos quadrados.

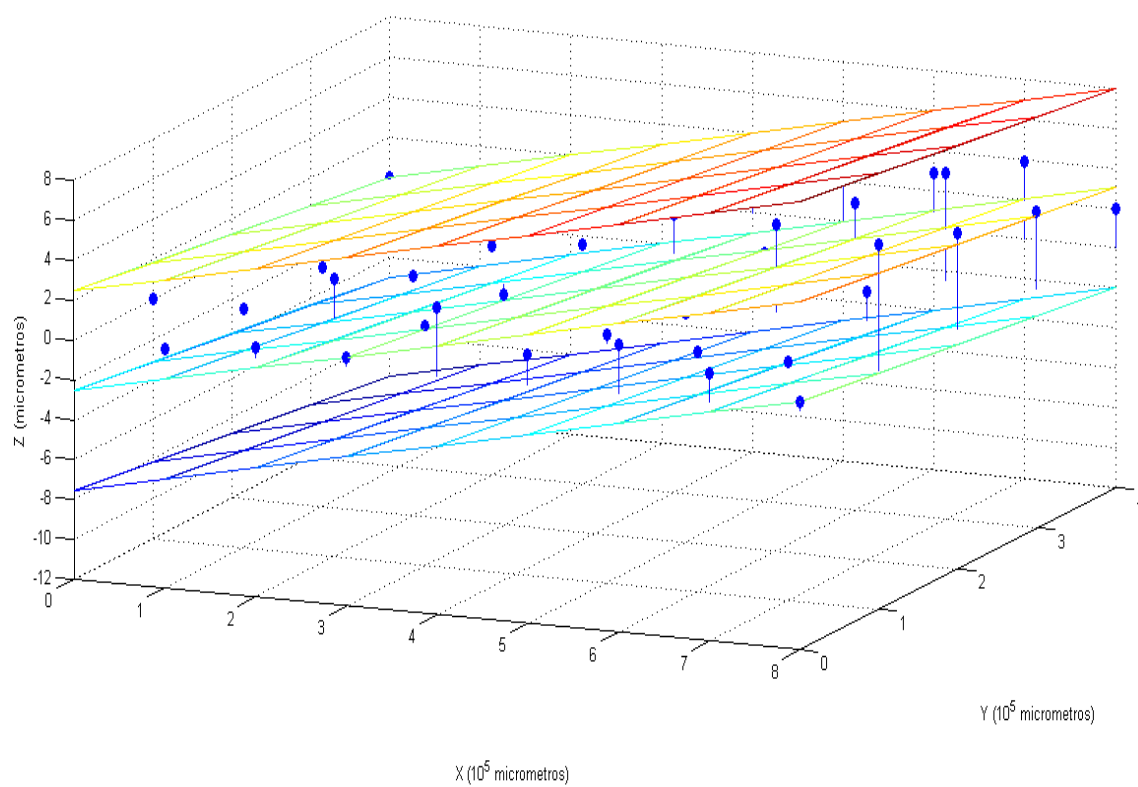


Figura 6.25 – Planos da zona mínima.

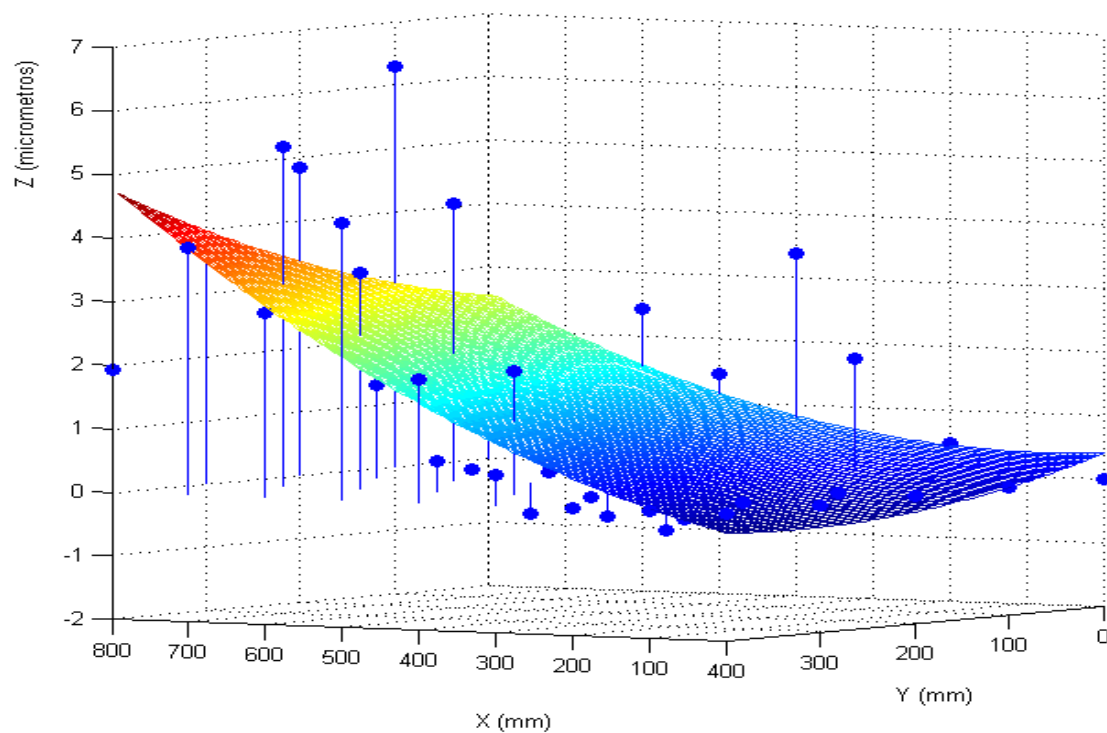


Figura 6.26 – Superfície obtida pelo método RSM de 2º ordem.

As Tabelas 6.4, 6.5 e 6.6 exibem os resultados dos desvios de planeza calculados pelo sistema proposto por Lima Jr. (2003) quando se utiliza os métodos dos mínimos quadrados, zona mínima e metodologia de superfície de resposta, respectivamente. Os valores destacados em vermelho são os desvios de planeza máximos ou pico e vale máximos. Por simplicidade adotou-se a nomenclatura para os pontos da malha de medição utilizada pelo OAS, desta forma as letras *a, b, c, d, e, f, g, h* e *i* representam as linhas de medição e os termos (0), (1), (2), (3) e (4) as estações ou pontos de medição. Analogamente, cada letra corresponde a coordenada *x*, variando de 0 mm (linha *a*) a 800 mm (linha *i*) em intervalos de 100 mm. E, cada termo entre parênteses corresponde à coordenada *y* variando de 0 mm [(0)] a 400 mm [(4)], também variando em intervalos de 100 mm.

Tabela 6.4 – Desvios de planeza para o método dos mínimos quadrados¹.

(4)	2,47	1,19	-2,51	-0,88	2,25	-3,39	-1,75	-0,61	1,51
(3)	2,24	1,44	-2,26	-0,58	2,02	-2,16	-1,02	-0,35	0,84
(2)	1,03	0,73	-2,45	0,64	1,79	-0,46	-0,28	-0,06	1,09
(1)	0,32	-0,43	-1,71	0,41	1,07	0,76	0,02	0,68	1,34
(0)	-0,84	-0,66	-0,49	-0,31	-0,13	-0,39	-0,22	-0,04	0,14
	a	b	c	d	e	f	g	h	i

¹ Valores em μm .

Tabela 6.5 – Desvios de planeza para o método da zona mínima^{1,2}.

(4)	-0,90	-0,42	0,63	0,43	-1,16	0,33	0,14	0,06	-0,25
(3)	-0,40	-0,03	1,01	-0,24	-0,66	0,49	0,41	0,44	-0,70
(2)	0,32	0,58	0,45	-0,09	-0,17	0,54	0,68	-0,24	-0,32
(1)	0,93	0,23	0,72	0,41	0,44	0,69	0,00	0,03	0,06
(0)	0,59	0,73	0,87	1,02	1,16	0,35	0,50	0,64	0,78
	a	b	c	d	e	f	g	h	i

¹ Desvios de planeza calculados tendo como referência o plano médio da zona mínima.

² Valores em μm .

Tabela 6.6 – Desvios de planeza para o método *RSM* de segunda ordem¹.

(4)	2,22	2,60	3,12	3,78	2,56	2,87	3,34	3,95	4,70
(3)	1,37	1,71	2,20	1,52	1,66	1,94	2,37	2,95	1,99
(2)	0,63	0,94	0,82	0,77	0,88	1,13	1,53	1,13	1,17
(1)	0,02	0,45	0,23	0,15	0,22	0,44	0,59	0,46	0,47
(0)	0,41	0,01	-0,24	-0,35	-0,31	0,39	0,08	-0,09	-0,11
	a	b	c	d	e	f	g	h	i

¹ Valores em μm .

A Tabela 6.7 exibi os resultados de planeza, mostrando os valores do pico ao vale (*peak-to-valley*) obtidos para os métodos da zona mínima e mínimos quadrados; o resultado da diferença entre os valores máximo e mínimo calculados ao se utilizar o método *RSM* de segunda ordem, valor este proposto nesta dissertação para caracterizar a planeza da superfície metrológica. A referida tabela mostra ainda as equações do plano dos MQ e do plano médio da ZM, e ainda, a expressão para a superfície de resposta de segunda ordem (*RSM*).

Tabela 6.7 – Resultados de planeza.

Método	Planeza⁽¹⁾	Equação
MQ	5,86	$Z_{MQ} = -0,84 + 4,5 \cdot 10^{-6}X + 1,78 \cdot 10^{-6}Y^{(*)}$
ZM	2,32	$-0,97X_C + 0,299Y_C + 0,24Z_{ZMx} - 0,059 = 0^{(**)(***)}$
<i>RSM</i> (2° ordem)	5,05 ⁽²⁾	$Z_{RSM} = 0,88 + 1,79X_C + 0,36Y_C + 0,67X_C^2 + 0,29Y_C^2 + 0,72X_CY_C^{(***)}$

¹ Valor do pico ao vale (*peak-to-valley*) em μm para MQ e ZM.

² Diferença entre os valores máximo e mínimo calculados a partir da curva *RSM* (valor em μm).

(*) Dados de entrada X e Y em μm .

(**) Plano médio da zona mínima.

(***) Coordenadas X e Y codificadas.

6.4.2.1 Análise e discussões dos resultados obtidos pelo sistema proposto por Lima Jr. (2003)

Os valores de planeza mostrados na Tabela 6.7 foram utilizados para classificar quanto ao grau de exatidão a mesa metrológica 2 em análise, através da ISO 8512 (1990). Observa-se que os valores de planeza calculados (5,86 μm para MQ; 2,32 μm para ZM e

5,05 μm para *RSM*) não excedem 6 μm , valor limite presente na ISO 8512 (1990) para a mesa em estudo com dimensões de 1000 mm x 630 mm ser classificada como de grau de exatidão “0” conforme indicado na Tabela 6.3. Portanto, os resultados de planeza obtidos através do sistema computacional desenvolvido por Lima Jr. (2003) apontam que a Mesa 2 pertence ao grau de exatidão “0”, independentemente do método matemático empregado. Todavia, os maiores desvios de planeza calculados foram obtidos com o uso do método dos mínimos quadrados, seguido pela metodologia de superfície de resposta e, em seguida, pelo método da zona mínima.

A classificação quanto ao grau de exatidão da Mesa 2 conseguida utilizando tanto os resultados através do sistema computacional proposto por Lima Jr. (2003) como pelo *software OAS* da *Taylor Hobson Precision* convergiram, apontando que a Mesa 2 pertence ao grau de exatidão “0” segundo o padrão ISO 8512. Isto significa que o programa proposto por Lima Jr. (2003) obteve resultados satisfatórios, podendo o mesmo servir como uma alternativa de sistema de aquisição, análise de dados e determinação da planeza quando o usuário dispuser apenas de um sistema de medição tipo nível eletrônico.

Os resultados gráficos apresentados nas Figuras 6.24, 6.25 e 6.26 ilustram bem os planos dos mínimos quadrados, da zona mínima e a curva da superfície *RSM* de segunda ordem. Através destes resultados é possível visualizar melhor os desvios de planeza da superfície metrológica em relação aos pontos medidos.

A superfície *RSM* gerada permite uma melhor visualização da topografia real da superfície metrológica, uma vez que tal processo de regressão gera uma superfície tridimensional que melhor se adequa ao conjunto de pontos medidos sobre a mesa desempenho, ao contrário das técnicas dos MQ e da ZM, com os quais os planos ideais são determinados. Outra vantagem da técnica *RSM* sobre as demais é que a mesma permite prever pontos de medição z para cada conjunto coordenado (x, y) , mesmo este sendo um ponto fora da malha de medição.

6.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo detalhou os principais materiais utilizados para o desenvolvimento desta dissertação. As mesas metrológicas em estudo, feitas em granito, foram devidamente calibradas através da determinação de suas planezas e categorizadas segundo a ISO 8512 (1990) quanto ao grau de exatidão. O sistema de medição utilizado foi um nível eletrônico de precisão com o qual se obteve uma série de medidas, de forma

rápida e prática, da inclinação da superfície de trabalho da mesa. Este capítulo detalhou ainda todo o procedimento de medição utilizado na determinação da característica planeza.

Os resultados foram gerados a partir de um software comercial (*Optical Analysis Software - OAS*), desenvolvido pela empresa *Taylor Hobson Precision*, também fabricante no nível eletrônico utilizado. Utilizou-se também o sistema de determinação da planeza desenvolvida por Lima Jr. (2003) a fim de avaliar sua capacidade como uma alternativa de sistema para análise de planeza quando o usuário ou pesquisador dispuser apenas de um equipamento de medição de inclinação, tipo nível eletrônico, e não possuir um software de aquisição, processamento e análise de dados como por exemplo, o software *OAS* da *Taylor Hobson*.

CAPÍTULO VII

CONCLUSÃO

7.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta dissertação de mestrado duas mesas metrológicas, utilizadas no Laboratório de Engenharia de Precisão (LEP) da UFPB, foram devidamente calibradas através da determinação de seus desvios de planeza, utilizando o nível eletrônico de precisão Talyvel 5 (*Taylor Hobson*) como sistema de medição. Com este equipamento foi possível determinar as medidas de planeza das mesas de forma rápida e eficaz.

Os já conhecidos e difundidos métodos de Moody e de malha retangular foram utilizados para a determinação da planeza das mesas de desempenho, enfatizando suas peculiaridades.

Para coleta e processamento dos dados de medição, utilizou-se o *Optical Analysis Software* desenvolvido pela empresa *Taylor Hobson* e o sistema computacional criado por Lima Jr. (2003) para obtenção dos parâmetros de planeza, sobretudo o valor de pico ao vale (*peak-to-valley*) como parâmetro especificador de planeza para os métodos dos mínimos quadrados e zona mínima. Para a metodologia de superfície de resposta, foi proposto utilizar como parâmetro de avaliação da planeza, a diferença entre os valores máximo e mínimo da superfície de regressão obtida.

As principais conclusões desta dissertação de mestrado, após a análise dos resultados experimentais obtidos, estão descritas a seguir:

- A utilização da técnica de extração de pontos de Moody fornece resultados mais rápidos comparado à técnica de malha retangular. Em contrapartida, a técnica de malha retangular cobre com maior densidade de pontos a superfície metrológica, caracterizando melhor a superfície analisada.
- Os resultados de planeza obtidos pelo *Optical Analysis Software (OAS)*, estabelecem que as duas mesas metrológicas em estudo pertencem ao grau de exatidão “0” segundo a norma ISO 8512 (1990). Esta classificação é muito importante na análise e determinação de incerteza e rastreabilidade uma vez que as mesas metrológicas servem de referência primária na obtenção das dimensões e análise de tolerâncias de peças manufaturadas.

- As medidas realizadas e processados pelo OAS mostram alta qualidade metrológica, enfatizada pelos erros de fechamento dentro dos limites estabelecidos pelo fabricante do sistema de medição.
- O programa de determinação da planeza desenvolvido por Lima Jr. (2003) mostrou resultados satisfatórios, podendo o mesmo ser utilizado para aquisição, análise de dados e determinação da planeza de forma confiável, nos casos em que o usuário dispõe apenas de um sistema de medição tipo nível eletrônico.
- A vantagem do programa desenvolvido por Lima Jr. (2003) sobre o OAS é a gama maior oferecida de técnicas matemáticas na determinação de planeza, podendo-se optar pelos métodos da zona mínima, mínimos quadrados e metodologia de superfície de resposta. Outra vantagem é a exibição dos resultados em forma gráfica, através do qual pôde-se melhor visualizar os pontos de medição, planos de referência da ZM e dos MQ e a superfície de regressão calculada através da técnica *RSM*, facilitando a análise da planeza e a observação de pontos medidos. Adicionalmente, o programa oferece as equações que regem os planos da ZM e dos MQ, além da curva de regressão gerada pela *RSM*.
- A principal desvantagem do uso do programa desenvolvido por Lima Jr. (2003) recai na não consideração simultânea das medidas em duas direções, fato que caracteriza o método de malha retangular e, conseqüentemente, o erro de fechamento não foi considerado.

7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Desenvolver um programa computacional para determinação da planeza de mesas metrológicas utilizando as técnicas de traçagem de Moody e/ou malha retangular, calculando e realizando a compensação do erro de fechamento.
- Empregar na programação um algoritmo que leva em consideração as medidas de inclinação em duas direções, de forma simultânea, caracterizando uma malha retangular.
- Utilizar técnicas numérico-matemáticas mais recentes para a determinação da zona mínima para um conjunto de pontos tridimensionais, como a *convex hull* por exemplo.
- Realizar um estudo comparativo na determinação da planeza via nível eletrônico, laser interferométrico e autocolimador.

- Desenvolver um sistema de medição de baixo custo e com exatidão aceitável para a determinação da planeza de mesas de desempenho.
- Calcular a planeza de mesas metrológicas através de medições relativas, ao invés de absolutas, utilizando dois níveis eletrônicos simultaneamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AČKO, B.; 2003, “*A universal model for evaluationg measuring uncertainty in calibration*”, Int. j. simul. model., vol. 4, pp. 121-129.

ADAMCZAK, S.; 2008, “*Medida da superfície geométrica - o contorno da forma, ondulação e rugosidade*”. Ed. I. Varsóvia: Editora da Ciência e Tecnologia Sp. Warsaw.

ANTHONY, G. T. *et al.*; 1996, “*Reference Software for Finding Chabysev Best-Fit Geometric Elements*”, Precision Engineering, v. 19, pp. 28-36.

BLUM , C.; SAMPELS, M.; 2004, “*An ant colony optimization algorithm for shop scheduling problems*”. J. Math. Model. Algor., vol. 3, n. 3, pp. 285-308.

CARR, K.; FERREIRA, P.; 1995, “*Verification of Form Tolerances Part I: Basic Issues, Flatness, and Straightness*”. Precision Engineering, vol. 17, pp. 131-156.

CHAPMAN *et al.*; 2013, “*Interferometric angle measurement and the hardware options available from Renishaw*”.

COLORNI, A. *et al.*; 1991, “*Distributed optimization by ant colonies*. Proceedings of the European Conference on Artificial Life, pp. 134-142.

CUI, C. C. *et al.*; 2007, “*Genetic algorithm-based form error evaluation*”. Meas. Sci. Technol., vol. 18, n. 7, pp. 1818-1822.

DANISH, P. D.; SHUNMUGAM, M.S.; 1991, “*An algorithm for form error evaluation-using the theory of discrete and linear Chebyshev approximation*”. Comput. Method. Appl. M., vol. 92, n. 3, pp. 309-324.

DORIGO, M. *et al.*; 1996, “*The ant system: optimization by a colony of cooperating agents*”. IEEE Trans. Syst. Man Cy. B, vol. 26, n. 1, pp. 29-41.

DORIGO, M.; GAMBARDILLA, L. M.; 1997, “*Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem*”. IEEE Trans. Evol. Comput., vol. 1, n.1, pp. 53-66.

DOVICA, M. *et al.*; 2006, “*Metrologia em Engenharia Mecânica*”. Košice: Emita literatura científica e técnica - Faculdade de Engenharia Mecânica em Kosice. 1ª ed. Impressão: Emilena al. s ro, Košice, 2006, 351 pp. 407-0.

DRESCHER, J.; 2003, “*Analytical estimation of measurement uncertainty in surface plate calibration by the Moody method using differential levels*”. Precis. Eng., vol. 27, pp. 323–332.

ENDRIAS, D. H.; FENG, H. Y.; 2003, “*Minimum-zone form tolerance evaluation using rigid-body coordinate Transformation*”. ASME J. Comput. Inf. Sci. Eng., vol. 3, n. 1, pp. 31-38.

GUM; 1995, “*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*”. ISO Guide, First Edition, Switzerland.

GUSEL, A. *et al.*; 2000, “*Assuring the traceability of electronic levels for Calibration of granite surface plates*”. Proceedings XVI IMEKO World Congress – IMEKO. Austrian Society for Measurement and Automation. Vienna, Austria.

GUSEL *et al.*; 2008, “*Measurement Uncertainty in Calibration of Measurement Surface Plates Flatness*”. Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering, vol. 55.

HAITJEMA, H.; MEIJER, J.; 1993, “*Evaluation of surface plate flatness measurements*”. European Journal Mech. Eng., vol. 38, n. 4, pp. 165-172.

HUANG, S.T. *et al.*; 1993. “*A new minimum zone method for evaluating flatness errors*”. Precision Engineering. vol. 15, pp. 25-32.

HUME, K. J.; 1963, “*Engineering Metrology*”, 2ª ed., Macdonald & Co., London.

ISO 1101; 2011, “*Geometrical product specifications (GPS) - Geometrical tolerancing -Tolerances of form, orientation, location and run-out*”.

ISO 12781; 2011. Geometrical product specifications (GPS) - Flatness – Parte 1: Vocabulary and parameters of flatness.

ISO 8512-1; 1990, *Surface plates, Part 1: Cast iron*.

ISO 8512-2; 1990, *Surface plates, Part 2: Granite*.

KAISER, M. J.; KRISHNAN, K. K.; 1998, “*Geometry of the Minimum Zone Flatness Functional: Planar and Spatial Case*”. Precision Engineering, vol. 22, pp. 174-183.

KANADA, T.; SUZUKI, S.; 1993, “*Evaluation of minimum zone flatness by means of nonlinear optimization techniques and its verification*”. Precision Engineering, vol. 15, pp. 93-99.

KAPLUNOV, J.D. *et al.*; 2005, “*Localized vibration in elastic structures with slowly varying thickness*”. Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, vol. 58, pp. 645-664.

KOVVUR, Y. *et al.*; 2008, “*Minimum-zone form tolerance evaluation using particle swarm optimisation*”. Int. J. Intell. Syst. Technol. Appl., vol. 4, n.1-2, pp. 79-96.

LAKOTA, S.; GÖRÖG, A.; 2011, “*Flatness measurement by multi-point methods and by scanning methods*”. Ad Alta: Journal of Interdisciplinary Research, vol. 1, p. 124-127.

LASER MENSUREMENT SYSTEM APPLICATION NOTE; 2015, “*Calibration of a surface plate*”. Hewlett Packard. Disponível em <<http://www.hudler.org/pub/HP/02-5952-0820%20-%20App%20Note%20156-2%20-%20Calibration%20of%20a%20Surface%20Plate.pdf>> (acessado em Maio, 2015).

LEE, M. K.; 1997, “*A New Convex-Hull-based Approach to Evaluating FlatnessTolerance*”. Computer Aided Design, vol. 29, pp.861-868.

LIANG, R. *et al.*; 1998, “*Accuracy and Time in Surface Measurement, Part 1: Mathematical Foundations*”. ASME J. Manuf. Sci. Eng., vol. 120, n. 1, pp. 141-149.

LIAO P.; YU, S. Y.; 1988, “*A method of calculating 3-D line error using genetic algorithms*”. J. Cent. South Univ.Technol., vol. 29, n. 6, pp. 586-588.

LIMA JÚNIOR, J. C.; 2003, “*Determinação da Planeza das Mesas Metrológicas das Máquinas de Medição por Coordenadas*”. Dissertação de Mestrado. UFPB (PPGEM), João Pessoa, PB, Brasil.

LIU, J. *et al.*; 2011, “*Minimum-zone Form Tolerance Evaluation for Cylindrical Surfaces Using Adaptive Ant Colony Optimization*”. Journal of Computational Information Systems, vol. 7, n. 12, pp. 4480-4490.

MAGALHÃES, R. C. A. de; 2006, “*Sistema para medição de erro de planicidade*”. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Paulo. USP, São Paulo, SP, Brasil.

MAO, J.; CAO, Y.L; 2006, “*Evaluation method for spatial straightness errors based on particle swarm optimization*”. J. Eng. Des., vol. 13, n. 5, pp. 291-294.

MASINA, P.P.; KRUGER, O.A.; 2014, “*Flatness Measurements on a Granite Surface Table by Interferometry and by Electronic Level Using the Moody Method*”. Test and measurement Conference. National Metrology Institute of South Africa, South Africa.

MOODY, J.C; 1955, “*How to calibrate surface plates in the plant*”. The Tool Engineer.

MOORE, W.R.; 1970. “*Foundations of Mechanical Accuracy, the Moore Special Tool Company*”. Congress Catalog No., vol. 73, pp. 127-307.

MURTHY, T. S. R.; ABDIN, S. Z.; 1980, “*Minimum zone evaluation of surfaces*”. Int. J. Mach. Tool Des. Res., vol. 20, n. 2, pp. 123-136.

PRÄZISIONSTECHNIK SCHLITT; 2015, “*Surface plates - squares - beams – stands v-blocks - straight edges special constructions of granite (Fine Black or Impala)*” Disponível em <<http://www.schlitt-werkzeuge.de/pdf/hartgestein-richtmittel-E.pdf>> (acessado em Maio, 2015).

REN, B. et al.; 2008, “*Mission planning system for aircraft based on adaptive ant colony optimization algorithm*”. J. Comput. Inf. Syst., vol. 4, n.2, pp. 617-622.

RENISHAW; 2001, “*Flatness measurement user guide*”. Disponível em <<http://resources.renishaw.com/en/details/white-paper-interferometric-angle-measurement-and-the-hardware-options-available-from-renishaw-56681>> (acessado em Março, 2015).

RUNJE, B. et al.; 2013, “*Integrated procedure for flatness measurements of technical surfaces*”. Tehnički vjesnik, vol. 20, pp. 113-116.

SAMUEL, G. L.; SHUNMUGAM, M. S.; 1999, “*Evaluation of Straightness and Flatness Error Using Computational Geometris Techniques*”. Computer Aided Design, vol. 31, pp. 829-843.

SILVA, J. B. A.; BURDEKIM, M.; 2002, *A modular space Frame for assessing the performance of co-ordinate measuring machines (CMMs)*. Precision Engineering, vol. 26, pp. 37-48.

SUEN, D. S; CHANG, C. N.; 1997, “*Application of Neural Network Interval Regression Methode for Minimum Zone Straightness and Flatness*”. Precision Engineering, vol. 20, pp. 196-207.

TAYLOR HOBSON; 2005, *Talyvel 5, Operator's Handbook*. Spectrum Metrology Ltd.

VERMONT PHOTONICS; 2008, “*Surface View Manual*”. Disponível em <http://www.vermontphotonics.com/SurfaceView_Manual.pdf> (acessado em Maio, 2015).

WEBER, T. *et al.*; 2002, “*A unified approach to form error evaluation*”. *Precis. Eng.*, vol. 26, n. 3, pp. 269-278.

WHITEHOUSE, D. J.; 1997, “*Surface metrology*”. *Meas. Sci. Technol.*, vol. 8, pp. 955–972.

WYLER; 2003, “*Details to the alignment method according to ISO1101 and to the closure error correction according to Philips when using the wyler flatness measurement software levelsoft pro*”. Disponível em <<http://www.wylerag.com>> (acessado em Março, 2015).

ZAHWI, S. Z. *et al.*; 2013, “*On the calibration of surface plates*”. *Measurement*, vol. 46, pp. 1019-1028.

ZEBRA OPTICAL; 2015, “*Surface Plate*”. Disponível em <<http://www.zebraoptical.com/SurfacePlate.html>> (acessado em Maio, 2015).

ZHANG, Q. *et al.*; 1999, “*Evaluation Methode for Spatial Straightness Errors Based on Minimum Zone Condition*”. *Precision Engineering*, vol. 23, pp. 264-272.

ZHU, X.; DING, H.; 2002, “*Flatness tolerance evaluation : an approximate minimum zone solution*”. *Computer Aided Design*, vol. 34, pp. 655-664.

APÊNDICE A

Tabela A.1 – Resultados de medição – Mesa 2.

Pontos	Medidas (seg)	Altura correspondente (μm)	Altura de entrada (μm)
a(0)	0	0	0
a(1)	0	0	0
a(2)	0	0	0
a(3)	-1	-0,484799383	-0,484799383
a(4)	1	0,484799383	0
b(0)	0	0	0
b(1)	1	0,484799383	0,484799383
b(2)	0	0	0,484799383
b(3)	0	0	0,484799383
b(4)	2	0,969598765	1,454398148
c(0)	0	0	0
c(1)	4	1,939197531	1,939197531
c(2)	3	1,454398148	3,393595679
c(3)	2	0,969598765	4,363194444
c(4)	2	0,969598765	5,33279321
d(0)	0	0	0
d(1)	0	0	0
d(2)	1	0,484799383	0,484799383
d(3)	4	1,939197531	2,423996913
d(4)	3	1,454398148	3,878395062
e(0)	0	0	0
e(1)	-1	-0,484799383	-0,484799383
e(2)	0	0	-0,484799383
e(3)	1	0,484799383	0
e(4)	1	0,484799383	0,484799383
f(0)	0	0	0
f(1)	0	0	0
f(2)	4	1,939197531	1,939197531
f(3)	5	2,423996913	4,363194444
f(4)	4	1,939197531	6,302391975
g(0)	0	0	0
g(1)	1	0,484799383	0,484799383
g(2)	3	1,454398148	1,939197531
g(3)	3	1,454398148	3,393595679
g(4)	3	1,454398148	4,847993827
h(0)	0	0	0

Continuação da Tabela A.1

Pontos	Medidas (seg)	Altura correspondente (μm)	Altura de entrada (μm)
h(1)	0	0	0
h(2)	3	1,454398148	1,454398148
h(3)	3	1,454398148	2,908796296
h(4)	2	0,969598765	3,878395062
i(0)	0	0	0
i(1)	-1	-0,484799383	-0,484799383
i(2)	2	0,969598765	0,484799383
i(3)	2	0,969598765	1,454398148
i(4)	1	0,484799383	1