

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial

**ANÁLISE DOS EFEITOS DA FILTRAGEM NA
MEDIÇÃO DE CIRCULARIDADE EM
MÁQUINAS DE MEDIR POR COORDENADAS
UTILIZANDO *SCANNING***

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

Ânderson Schmidt

Florianópolis, 08 de dezembro de 2005

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

ANÁLISE DOS EFEITOS DA FILTRAGEM NA MEDIÇÃO DE CIRCULARIDADE EM MÁQUINAS DE MEDIR POR COORDENADAS UTILIZANDO SCANNING

ÂNDERSON SCHMIDT

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de

“MESTRE EM METROLOGIA”

e aprovada na sua forma final pelo

Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial

Prof. Gustavo Daniel Donatelli, Dr. Eng.

ORIENTADOR

Prof. Marco Antônio Martins Cavaco, Ph. D.

COORDENADOR DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Carlos Alberto Flesch, Dr. Eng.

Prof. Rolf Bertrand Schroeter, Dr. Eng.

Prof. André Roberto de Sousa, Dr. Eng.

*Aos meus pais Maria Agnes e Rui Wilibaldo e meus irmãos Viviane e
Alexandre.*

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, por abrir as portas do mestrado, a todos os professores, Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Carlos Alberto Flesch, Carlos Alberto Schneider, alunos e colaboradores que sempre me ajudaram durante esta caminhada.

Ao professor Marco Antônio Cavaco pelo convite ao mestrado e a Günther Pfeiffer pelo convite ao projeto de cooperação Fundação CERTI/WZL.

Ao Prof. Gustavo Donatelli, que me orientou e agüentou firme os meus momentos de crise.

À admirável turma 2004, pelo excelente ambiente de trabalho e pelos momentos de descontração, em especial ao colega de projeto Daniel S. Hamburg-Piekar.

À Fundação CERTI, em especial ao CMI e aos colaboradores do laboratório que sempre me acompanharam desde os tempos de graduação e que de maneira especial confiaram no meu trabalho.

A minha família, em especial a minha esposa Fábía que sempre me apoiou e ajudou durante esses dois anos de caminhada.

À Andreas Napieralla e Maurício de Campos Porath, WZL, RWTH - Aachen, pelo apoio técnico.

À Sociedade Alemã de Pesquisa (DFG) – Bonn, pelo aporte financeiro ao projeto.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	8
LISTA DE TABELAS	12
LISTA DE ABREVIATURAS.....	13
LISTA DE SÍMBOLOS	15
RESUMO.....	18
ABSTRACT.....	19
1 INTRODUÇÃO	20
1.1 RELEVÂNCIA DA MEDIÇÃO DE CIRCULARIDADE NA INDÚSTRIA	20
1.2 MÉTODOS ALTERNATIVOS PARA MEDIÇÃO DA CIRCULARIDADE.....	24
1.3 A MEDIÇÃO DE CIRCULARIDADE USANDO A TECNOLOGIA DE <i>SCANNING</i> EM MMC.....	26
2 ESTADO-DA-ARTE	31
2.1 NORMAS E ESPECIFICAÇÕES GEOMÉTRICAS.....	31
2.1.1 NORMAS ESPECÍFICAS SOBRE CIRCULARIDADE.....	34
2.2 FUNDAMENTOS DE FILTRAGEM.....	38
2.2.1 A ORIGEM DO PROCESSO DE FILTRAGEM.....	38
2.2.2 FILTRO GAUSS	42
2.2.3 FREQUÊNCIAS DE CORTE NORMALIZADAS PARA PERFIL DE CIRCULARIDADE EM OPR	44
2.2.4 <i>ALIASING</i> E O CRITÉRIO DE NYQUIST	46
2.2.5 EFEITO DA FILTRAGEM MECÂNICA DEVIDO AO SENSOR	47
2.2.6 FILTRO MORFOLÓGICO.....	50
2.3 TECNOLOGIAS DE MEDIÇÃO DE DESVIOS DE CIRCULARIDADE	53
2.3.1 MÁQUINA DE MEDIR FORMA	54
2.3.2 MÁQUINA DE MEDIR POR COORDENADAS.....	55
2.3.2.1 ESTRUTURAS, GUIAS E ESCALAS.....	56
2.3.2.2 COMANDO NUMÉRICO E SISTEMAS DE SENSOREAMENTO E COMPENSAÇÃO ..	58

2.3.2.3 SOFTWARE DE MEDIÇÃO	59
2.3.2.4 AMBIENTE	61
2.3.2.5 CABEÇOTE DE MEDIÇÃO	61
2.4 SCANNING.....	66
3 MATERIAIS E MÉTODOS	70
3.1 O MODELO DE AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS.....	70
3.2 OS PADRÕES	72
3.2.1 CALIBRAÇÃO DOS PADRÕES	75
3.3 MMC UTILIZADAS	75
3.3.1 CABEÇOTES SCANNING.....	76
3.3.2 SOFTWARE	77
3.4 AVALIAÇÃO DOS DADOS.....	78
3.4.1 IMPORTAÇÃO DOS DADOS GERADOS PELA MMC.....	80
3.4.2 IMPLEMENTAÇÃO DO CÍRCULO DE REFERÊNCIA DE MÍNIMOS QUADRADOS - LSCI	81
3.4.3 IMPLEMENTAÇÃO DO CÍRCULO DE REFERÊNCIA DE MÍNIMA ZONA – MZCI.....	81
3.4.4 CONVERSÃO DE COORDENADAS CARTESIANAS PARA COORDENADAS POLARES.....	81
3.4.5 FILTRO GAUSS	82
3.4.6 ANÁLISE DO ESPAÇAMENTO ANGULAR E INTERPOLAÇÃO	83
3.5 OUTROS ALGORITMOS	84
3.5.1 SOBREPOSIÇÃO DOS PERFIS (COMPARAÇÃO GRÁFICA).....	84
3.5.2 SIMULAÇÃO DO PADRÃO DE MÚLTIPLAS ONDAS.....	85
3.5.3 FILTRO MORFOLÓGICO.....	85
3.5.4 VALIDAÇÃO DOS ALGORITMOS IMPLEMENTADOS.....	86
3.6 PLANEJAMENTO.....	87
3.6.1 MEDIÇÕES	91
3.6.2 ANÁLISES.....	92
3.6.3 Simulação.....	93

4 RESULTADOS	94
4.1 INFLUÊNCIA DO CÍRCULO DE REFERÊNCIA E QUANTIDADE DE PONTOS	94
4.2 INFLUÊNCIA DA FORÇA DE MEDIÇÃO E QUANTIDADE DE PONTOS	96
4.3 INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE MEDIÇÃO E DA QUANTIDADE DE PONTOS	98
4.4 ANÁLISE DA CAPACIDADE DA MMC DE OBTER DADOS IGUALMENTE ESPAÇADOS	100
4.5 INFLUÊNCIA DO ESPAÇAMENTO ANGULAR IRREGULAR.....	102
4.6 INTERPOLAÇÃO LINEAR.....	112
4.7 EFEITO DA INTERPOLAÇÃO NA AMPLITUDE TOTAL PICO-VALE.....	112
4.8 EFEITO DA INTERPOLAÇÃO NO CONTEÚDO DINÂMICO DO SINAL	115
4.9 INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO DO SENSOR.....	118
4.9.1 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO DO SENSOR NO CONTEÚDO DINÂMICO.....	118
4.9.2 INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO DO SENSOR NA QUANTIDADE DE PONTOS	120
4.9.3 INFLUÊNCIA DA FREQUÊNCIA DE CORTE DO FILTRO E O DIÂMETRO DO SENSOR NA AMPLITUDE TOTAL PICO-VALE.....	121
4.10 FILTRO MORFOLÓGICO.....	122
4.11 SIMULAÇÃO	124
4.12 SOBREPOSIÇÃO DE PERFIS.....	128
5 RECOMENDAÇÕES PARA PLANEJAR A MEDIÇÃO DE DESVIOS DE FORMA EM MMC	130
6 CONCLUSÕES	139
6.1 SOBRE A PESQUISA	139
6.2 O QUE FOI GERADO	139
6.3 OPORTUNIDADES FUTURAS.....	140
6.3.1 ELIMINAÇÃO DE PONTOS ATÍPICOS.....	140
6.3.2 DISTRIBUIÇÃO IRREGULAR DOS ÂNGULOS	140
6.3.3 CARACTERÍSTICAS TOLERADAS	141
6.3.4 FILTRAGEM	141

6.3.5 CABEÇOTE MEDIDOR PASSIVO	141
6.3.6 ALGORITMO DE <i>BEST-FIT</i>	141
6.3.7 PEÇAS REAIS.....	141
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	143
ANEXOS	149
ANEXO 1.....	150
ANEXO 2.....	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
ANEXO 3.....	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Representação simplificada do processo de desenvolvimento de produto, mostrando a geração e utilização dos desenhos de engenharia e especificações do produto.	20
Figura 2: O conflito no entendimento da especificação de diâmetro, ocasionado pelo pensamento baseado em geometrias perfeitas (adaptado de [1]).....	22
Figura 3: Classificação das especificações geométricas de produto, segundo norma ISO [2].	23
Figura 4: Ocorrência relativa dos diferentes tipos de tolerância geométrica e dimensionais em peças da indústria automobilística alemã (adaptado de [3]).	24
Figura 5: Da esquerda para direita, sistemas alternativos para avaliação de circularidade (MMC-acima e MMF-abaixo), perfis gerados e definição de circularidade segundo Anexo B da norma ISO 1101 [5].	25
Figura 6: Influências no resultado da medição de forma (adaptado de [6]).	27
Figura 7: Divisão das tarefas dentro do escopo do projeto (adaptado de [7]).	29
Figura 8: Classificação dos desvios de forma (adaptado de [12]).	33
Figura 9: Característica tolerada de circularidade (adaptado de [5]).	35
Figura 10: Desvio de forma local de uma característica de circularidade externa [17]. .	36
Figura 11: Definição de circularidade, ISO 1101 Anexo B (adaptado de [5]).....	37
Figura 12: Perfilômetro de Schmalz [18].	39
Figura 13: Curva da característica de transmissão de um filtro passa-baixas (adaptado de [3]).	40
Figura 14: Distorção de fase (adaptado de [21]).	41
Figura 15: Perfil da função peso do filtro (adaptado [24]).	43
Figura 16: Características de transmissão de um filtro Gauss passa-baixas com frequências de corte 15 OPR; 50 OPR; 150 OPR; 500 OPR; 1500 OPR (adaptado da [25]).	43
Figura 17: Características de transmissão de um filtro Gauss passa-baixas com frequências de corte 15 OPR; 50 OPR e 150 OPR (adaptado da [25]).	44
Figura 18: Efeito do número de ondulações por revolução para diferentes diâmetros. .	45
Figura 19: <i>Aliasing</i> , adaptado de [25].	46
Figura 20: Influência do diâmetro do sensor (adaptado de [27]).	49
Figura 21: “Viertastergerät” (aparelho de quatro apalpadores) [11].	51
Figura 22: Dilatação e erosão (adaptado [26]).	52

Figura 23: Filtro de abertura discreto (adaptado [26]).	52
Figura 24: Métodos antigos para avaliar o desvio de forma.	53
Figura 25: Princípios de funcionamento das máquinas de medir desvio de circularidade [4].	54
Figura 26: Subsistemas da MMC [34].	56
Figura 27: Cabeçote ligador [40].	62
Figura 28: Cabeçote medidor passivo [46].	64
Figura 29: Evolução dos cabeçotes medidores analógicos ativos (adaptado de [47] e [48]).	64
Figura 30: Estratégia de aproximação e afastamento em hélice [41].	65
Figura 31: Comparação entre a medição com poucos pontos e modo <i>scanning</i> [41], [49].	66
Figura 32: Comparação da medição por pontos e modo <i>scanning</i> .	67
Figura 33: Importância da força, velocidade de medição e do acabamento superficial (adaptado de [7]).	68
Figura 34: Modelo de aquisição e processamento de dados (adaptado de [7]).	71
Figura 35: Padrão de múltiplas ondas utilizado na pesquisa, seu perfil não filtrado e o gráfico de amplitudes versus frequências, obtido aplicando a Transformada Rápida de Fourier (adaptado de [7]).	73
Figura 36: KOMBI – MWN 1 (adaptado de [3]).	74
Figura 37: KOMBI – MWN 2 (adaptado de [3]).	74
Figura 38: Cabeçote medidor ativo (adaptado de [41]).	77
Figura 39: MZCI e LSCI.	78
Figura 40: Esquema simplificado do algoritmo de análise de dados.	79
Figura 41: Erro de fechamento [54].	80
Figura 42: Perfil simulado.	85
Figura 43: Filtro morfológico (adaptado de [3]).	86
Figura 44: Apalpadores utilizados na 2 ^a etapa.	90
Figura 45: Medição do padrão KOMBI – MWN 2 na MMC em Aachen.	92
Figura 46: Influência do círculo de referência e quantidade de pontos (casos 11 a 15 da tabela 10).	95
Figura 47: Influência da força de medição e quantidade de pontos (casos 1 a 5 e 11 a 15 da tabela 10).	96

Figura 48: Influência da força de medição e quantidade de pontos no “conteúdo dinâmico” (casos 1 a 5 e 11 a 15 da tabela 10).....	97
Figura 49: Influência da quantidade de pontos no desvio de forma, avaliado pela amplitude total pico-vale, para dados com diferentes velocidades de medição e diferentes frequências de corte do filtro (casos 11 a 20 da tabela 10).	98
Figura 50: Influência da velocidade de medição e quantidade de pontos na análise do conteúdo dinâmico do sinal, avaliado com aplicação da FFT (casos 11 a 30 da tabela 10).	99
Figura 51: Resultados da análise do ângulo compreendido entre dois pontos sucessivos (caso 11 da tabela 10).	101
Figura 52: Análise da distribuição angular e análise do conteúdo dinâmico do sinal, avaliado com aplicação da FFT (casos 11 e 16 da tabela 10).....	103
Figura 53: Análise da distribuição angular e análise do conteúdo dinâmico do sinal, avaliado com aplicação da FFT (casos 12 e 17 da tabela 10).....	104
Figura 54: Análise da distribuição angular e análise do conteúdo dinâmico do sinal, avaliado com aplicação da FFT (casos 13 e 18 da tabela 10).....	105
Figura 55: Análise da distribuição angular e análise do conteúdo dinâmico do sinal, avaliado com aplicação da FFT (casos 14 e 19 da tabela 10).....	105
Figura 56: Análise da distribuição angular e análise do conteúdo dinâmico do sinal, avaliado com aplicação da FFT (casos 20 e 15 da tabela 10).....	106
Figura 57: Linha circunferencial extraída com e sem espaçamento uniforme (caso 17 da tabela 10).....	110
Figura 58: Influência do espaçamento irregular dos pontos de medição sobre a amplitude total pico-vale, analisada com aplicação da FFT (caso 18 da tabela 10)....	111
Figura 59: Linha circunferencial extraída com e sem espaçamento uniforme e como a FFT interpreta o sinal de entrada (caso 17 da tabela 10).....	112
Figura 60: Efeito da quantidade de pontos no desvio de forma, avaliado pela amplitude total pico-vale, para dados interpolados e não interpolados e diferentes frequências de corte do filtro (casos 11 a 15 da tabela 10).	113
Figura 61: Efeito da quantidade de pontos no desvio de forma, avaliado pela amplitude total pico-vale, para dados interpolados e não interpolados e diferentes frequências de corte do filtro (casos 16 a 20 da tabela 10).	114
Figura 62: Efeito da interpolação linear dos dados brutos sobre o conteúdo dinâmico do sinal, avaliado com aplicação da FFT (caso 18 da tabela 10).	115
Figura 63: Comparação entre resultados obtidos aplicando FFT aos dados brutos e aos dados interpolados linearmente (casos 16 a 20 da tabela 10).	116
Figura 64: Influência do diâmetro de 1,5 mm no conteúdo dinâmico do sinal, avaliado com aplicação da FFT (caso 1 da tabela 12).....	119
Figura 65: Influência do diâmetro de 8,0 mm no conteúdo dinâmico do sinal, avaliado com aplicação da FFT (caso 4 da tabela 12).....	119

Figura 66: Repetitividade da quantidade de pontos para diferentes sensores (casos 1 a 6 da tabela 12).....	120
Figura 67: Figura ilustrativa do princípio de funcionamento do algoritmo de simulação.	125
Figura 68: Desvio de circularidade em função da quantidade de pontos.	126
Figura 69: Erro relativo em função da quantidade de pontos.	128
Figura 70: Perfis sobrepostos sem e com processamento usando algoritmo de <i>best-fit</i>	129
Figura 71: O desenvolvimento da medição no contexto do planejamento avançado da qualidade de produto e processo produtivo.....	130
Figura 72: Seqüência de atividades para planejamento e validação de medições de forma em MMC.....	132
Figura 73: Seqüência de atividades para verificação da capacidade de medição de circularidade usando um padrão (anel ou tampão).	137

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Símbolos das características toleradas (adaptado de [5]).	33
Tabela 2: Filtro passa-baixas com valores em OPR para a obtenção do perfil de circularidade.	45
Tabela 3: Valores limites para relação d:r e número mínimo de pontos.	49
Tabela 4: Características construtivas do KOMBI – MWN 1	73
Tabela 5: Características construtivas do KOMBI – MWN 2	74
Tabela 6: Características da MMC do WZL RWTH – Aachen.	76
Tabela 7: Características da MMC do CMI.	76
Tabela 8: Características construtivas do cabeçote de <i>scanning</i> .	77
Tabela 9: Validação dos algoritmos implementados.	87
Tabela 10: Condições de medição utilizadas para os experimentos da 1ª etapa.	89
Tabela 11: Apalpador T1.	89
Tabela 12: Condições de medição utilizadas para os experimentos da 2ª etapa	90
Tabela 13: Apalpador A1	91
Tabela 14: Apalpador A2	91
Tabela 15: Análise da capacidade de coleta de dados da MMC.	100
Tabela 16: Resumo das análise da influência do espaçamento angular.	106
Tabela 17: Relação entre ângulo médio, variação do ângulo e taxa de aquisição.	107
Tabela 18: Valores da amplitude pico-vale obtidos com sensores de diferentes diâmetros.	121
Tabela 19: Aplicação do algoritmo de reconstrução aos dados da linha circunferencial extraída dos casos 1 a 6 da tabela 12.	122
Tabela 20: Análise da influência do algoritmo de reconstrução para perfis de circularidade filtrados com frequência de corte de 500 OPR.	123
Tabela 21: Análise da influência do algoritmo de reconstrução em dados interpolados linearmente.	123
Tabela 22: Influência da quantidade de pontos e posição de início de medição do perfil.	127

LISTA DE ABREVIATURAS

2RC – PC	<i>Phase-correct 2RC</i>
CAA	<i>Computer Aided Accuracy</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CERTI	<i>Fundação Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras</i>
CFFT	<i>Complex Fast Fourier Transform</i>
CMI	<i>Centro de Metrologia e Instrumentação</i>
CMM	<i>Coordinate Measuring Machine</i>
CNC	<i>Controle Numérico Computadorizado</i>
DFG	<i>Deutsche Forschungsgemeinschaft</i>
D-CAA	<i>Dinamischen Biege Computer Aided Accuracy</i>
ER	<i>Erro Relativo</i>
fco	<i>Frequência de corte</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
GD&T	<i>Geometric Dimensioning and Tolerancing</i>
GPS	<i>Geometrical Product Specifications</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
Kombi – MWN	<i>Kombinations-Mehrwellennormale</i>
LABMETRO	<i>Laboratório de Metrologia e Automatização</i>
LSCI	<i>Least Squares Reference Circle</i>
LVDT	<i>Linear Variable Displacement Transducers</i>
MCCI	<i>Minimum Circumscribed Reference Circle</i>
MICI	<i>Maximum Inscribed Reference Circle</i>
MMC	<i>Máquina de Medir por Coordenadas</i>
MMF	<i>Máquina de Medir Forma</i>
MZCI	<i>Minimum Zone Reference Circle</i>

NPL	<i>National Physical Laboratory</i>
OPR	<i>Ondulações por Revolução</i>
RONt	<i>Desvio de Circularidade Pico-vale</i>
RC	<i>Resistor e Capacitor</i>
PTB	<i>Physikalisch-Technische Bundesanstalt</i>
VAST	<i>Variable Accuracy and Speed Probing Technology</i>
VVC	<i>Valor Verdadeiro Convencional</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Erro residual	<i>erro residual de segunda ordem</i>
E	<i>excentricidade</i>
R	<i>raio médio</i>
A₁	<i>dois círculos concêntricos de centro C₁</i>
A₂	<i>dois círculos concêntricos de centro C₂</i>
Δr₁	<i>diferença no raio da tolerância especificada</i>
Δr₂	<i>diferença no raio definida pelo método de ajuste</i>
C₁	<i>centro de A₁</i>
C₂	<i>centro de A₂</i>
f_{co}	<i>freqüência de corte</i>
val	<i>velocidade de alimentação</i>
λ_{co}	<i>comprimento de onda de corte</i>
T_{co}	<i>transmissão no comprimento de onda de corte</i>
PA(λ)	<i>passa-altas</i>
PB(λ)	<i>passa-baixas</i>
α	<i>comprimento de onda do perfil senoidal</i>
a₀	<i>amplitude do perfil de rugosidade senoidal antes da filtragem</i>
a₁	<i>amplitude do perfil de rugosidade senoidal na linha média</i>
λ	<i>comprimento de onda</i>
a₂	<i>amplitude do perfil de onda de alta freqüência</i>
OPR_{min}	<i>valor mínimo de ondulações por revolução</i>
d	<i>diâmetro do mensurando</i>
A	<i>sinal verdadeiro</i>
B	<i>sinal com Aliasing</i>
C	<i>intervalo de amostragem</i>

r	<i>raio do sensor</i>
Wt	<i>profundidade da onda</i>
n	<i>número de ondas</i>
R	<i>raio do mensurando</i>
D_k	<i>diâmetro do sensor</i>
u₁ 2617	<i>incerteza de medição para comprimento 1D segundo VDI/VDE</i>
u₃ 2617	<i>incerteza de medição para comprimento 3D segundo VDI/VDE</i>
V₂	<i>incerteza de apalpação</i>
N	<i>número de pontos medidos/coletados efetivamente adquiridos</i>
N_{co}	<i>número de pontos medidos de corte</i>
f	<i>freqüência</i>
i	<i>ondulações por revolução</i>
s(x)	<i>função peso</i>
f(x)	<i>dados de entrada</i>
g(x)	<i>dados de saída</i>
F	<i>transformada de Fourier</i>
θ	<i>espaçamento angular</i>
θ_m	<i>valor médio do ângulo entre dois pontos consecutivos</i>
Δθ <i>angulares</i>	<i>diferença entre as médias de dois agrupamentos de distâncias</i>
θ_p	<i>valor aproximado da moda mais próxima a θ_m</i>
δ	<i>variável adimensional</i>
V_{scan}	<i>velocidade de scanning</i>
Φ	<i>diâmetro do mensurando</i>
p	<i>distância entre dois pontos consecutivos</i>

w	<i>velocidade angular</i>
ER	<i>erro aleatório</i>
IN	<i>valor do desvio de circularidade total pico-vale</i>
M1	<i>transdutor linear de deslocamento 1</i>
M2	<i>transdutor linear de deslocamento 2</i>
f	<i>sapata</i>
T1	<i>sensor 1</i>
T2	<i>sensor 2</i>
h	<i>perfil da superfície extraído com o sensor 1</i>
i	<i>perfil da superfície extraído com o sensor 2</i>

RESUMO

A medição de desvios de forma em máquinas de medir por coordenadas apresenta vantagens metrológicas e operacionais que não podem ser menosprezadas. Nesta dissertação relatam-se os resultados de uma linha de pesquisa que procura caracterizar os efeitos da quantidade e distribuição dos pontos adquiridos e da frequência de corte do filtro nos resultados da medição de circularidade por scanning em máquinas de medir por coordenadas. Para fins da pesquisa utilizaram-se duas máquinas de alta exatidão, equipadas com cabeçotes analógicos ativos. Um padrão de múltiplas ondas foi medido num amplo leque de condições, pós-processando as coordenadas dos pontos obtidos pelas máquinas de medir por coordenadas em algoritmos de referência, externos ao software de medição das próprias máquinas. Estudou-se o comportamento de dois parâmetros de circularidade: a amplitude total pico-vale e o conteúdo dinâmico do perfil, avaliado com aplicação da transformada rápida de Fourier. A partir dos resultados obtidos na pesquisa, enunciaram-se recomendações para melhorar a prática de medição.

ABSTRACT

The measurement of form deviations in coordinate measuring machines presents metrological and operational advantages that cannot be negligent. This work shows the results of research that tries to characterize the effects of the cut-off frequency of the filter in the results of the roundness measurement when scanning with coordinate measuring machines. To verify the research two machines of high accuracy were used, equipped with active analogical probe head. A standard of multiple waves was measured in a wide range of conditions the coordinates of the points obtained by coordinate measuring machines are processed with reference algorithms, external to the *software* of measurement of the machines. The behaviour of two roundness parameters was studied: the width total peak-to-valley and the dynamic content of the profile, appraised with application of the Fast Fourier Transform. From the results obtained in the research, recommendations were suggested to improve the measurement practice.

1 INTRODUÇÃO

1.1 RELEVÂNCIA DA MEDIÇÃO DE CIRCULARIDADE NA INDÚSTRIA

Os desenhos de engenharia são documentos de caráter formal que estabelecem a base informacional usada no projeto, na fabricação e no controle da qualidade de peças e produtos (figura 1). Os desenhos contêm especificações geométricas e de material que descrevem o produto em questão de forma clara e não ambígua.

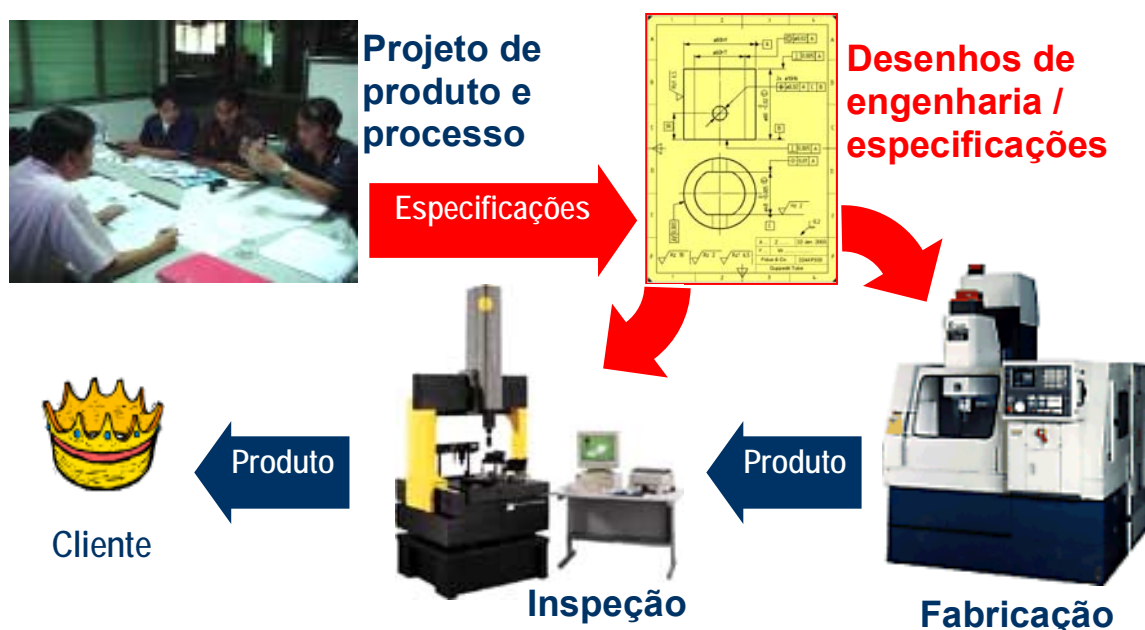


Figura 1: Representação simplificada do processo de desenvolvimento de produto, mostrando a geração e utilização dos desenhos de engenharia e especificações do produto.

A manufatura é um processo inerentemente não exato e produz peças e componentes que variam com referência aos valores que garantem o funcionamento ótimo do produto. Embora o ideal da manufatura atual seja produzir “no alvo com

variância mínima”, existe sempre um limite técnico e econômico que define valores aceitáveis para a variação com referência ao alvo. Esses limites precisam ser estudados e definidos durante a etapa de projeto, assim como comunicados nos desenhos mediante o uso de tolerâncias, para ser efetivamente utilizados na fabricação e na inspeção das peças.

No âmbito da produção metal-mecânica, são de importância central as denominadas “especificações geométricas de produto”. Nos primórdios da manufatura seriada existiam somente as tolerâncias dimensionais ou de tamanho. Assim, um cilindro era especificado pelo seu diâmetro nominal e uma tolerância de diâmetro. Essa forma de especificação pressupunha que a realidade da peça manufaturada não diferia significativamente dos modelos geométricos usados pelo projetista para concebê-la. Assim, o conceito de geometria perfeita percorria todo o processo desde a idéia até a inspeção. O decorrer do tempo, associado à evolução dos meios de fabricação e medição, mostrou que esse tipo de pensamento conduzia a situações de conflito. Quando observadas com suficiente detalhe, as peças não respondem aos modelos geométricos convencionais. Na realidade não existem cilindros, planos, esferas: existe uma complexa envolvente que separa a peça do meio ambiente, apresentando desvios locais diferentes com referência às geometrias perfeitas correspondentes.

Na figura 2 pode-se observar a conseqüência desta complexidade na própria definição de diâmetro de uma seção circular. Qual o diâmetro da seção “circular” mostrada com linha sólida na parte direita da figura? A especificação baseada em tolerâncias dimensionais é suficiente para aceitar ou rejeitar a peça? Existem seis respostas possíveis para a primeira pergunta: (1) diâmetro local entre dois pontos, (2) o diâmetro do máximo círculo inscrito, (3) o diâmetro de um círculo ajustado por mínimos quadrados, (4) o diâmetro do mínimo círculo circunscrito, (5) o comprimento da circunferência dividido por π , (6) duas vezes a raiz quadrada da área da seção dividida por π . Obviamente, na ausência de especificações mais completas, qualquer um desses diâmetros pode ser usado para julgar a qualidade da peça. Para um mesmo indivíduo de produto, cada um desses diâmetros terá associado um valor diferente, como resultado do processo de medição específico. Contudo, a realidade funcional do componente será a mesma.



Figura 2: O conflito no entendimento da especificação de diâmetro, ocasionado pelo pensamento baseado em geometrias perfeitas (adaptado de [1]).

A partir da constatação da existência de ambigüidades como as descritas, o pensamento baseado em geometrias perfeitas está sendo progressivamente substituído pelo mais poderoso e formal enfoque das “especificações geométricas de produto” [2]. Neste enfoque, propõem-se tolerâncias para distintos tipos de afastamentos com referência à geometria perfeita de componentes complexos, classificados como mostrado na figura 3. As tolerâncias dimensionais são ainda utilizadas para limitar desvios de tamanho, mas um variado conjunto de tolerâncias chamadas “geométricas” permite limitar desvios de orientação (e.g. desvio de paralelismo de um cilindro com referência a outro), de localização (e.g. desvio da posição de um furo cilíndrico com referência a um conjunto de três planos ortogonais) e de forma (e.g. desvio de uma superfície real com referência a um plano perfeito). As tolerâncias de movimento descrevem limites para a composição de desvios de forma, orientação e localização, que são relevantes para certos modos de funcionamento cinemático (e.g. batimento circular de uma superfície cilíndrica com referência a um eixo).

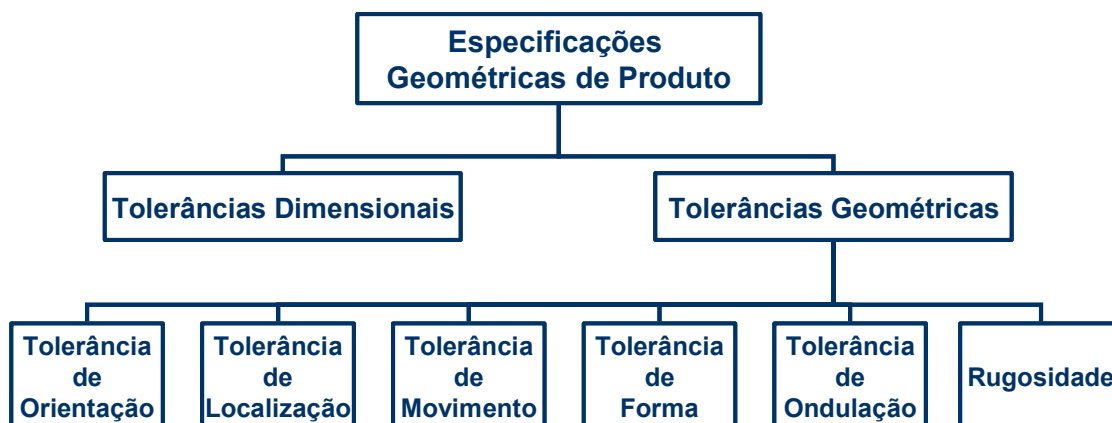


Figura 3: Classificação das especificações geométricas de produto, segundo norma ISO [2].

Em particular, as tolerâncias de forma podem ser:

- Tolerância de retitude;
- Tolerância de planeza;
- Tolerância de circularidade;
- Tolerância de cilindridade;
- Tolerância de forma de uma linha qualquer;
- Tolerância de forma de uma superfície qualquer.

Em um estudo realizado recentemente na Alemanha sobre os desenhos de dez peças de geometria complexa provenientes da indústria automobilística foram contadas as ocorrências dos diferentes tipos de especificações geométricas de produto [3]. Os resultados desse estudo podem ser observados no diagrama de Pareto da figura 4. Por ordem de importância aparecem em primeiro lugar as tolerâncias dimensionais ou de tamanho. Imediatamente após aparecem as tolerâncias de localização e orientação. A tolerância de circularidade, objeto deste trabalho, aparece no centro do diagrama, com uma ocorrência relativa de aproximadamente 2%, pequena frente ao total, mas ainda assim importante se comparada com outras tolerâncias de forma.

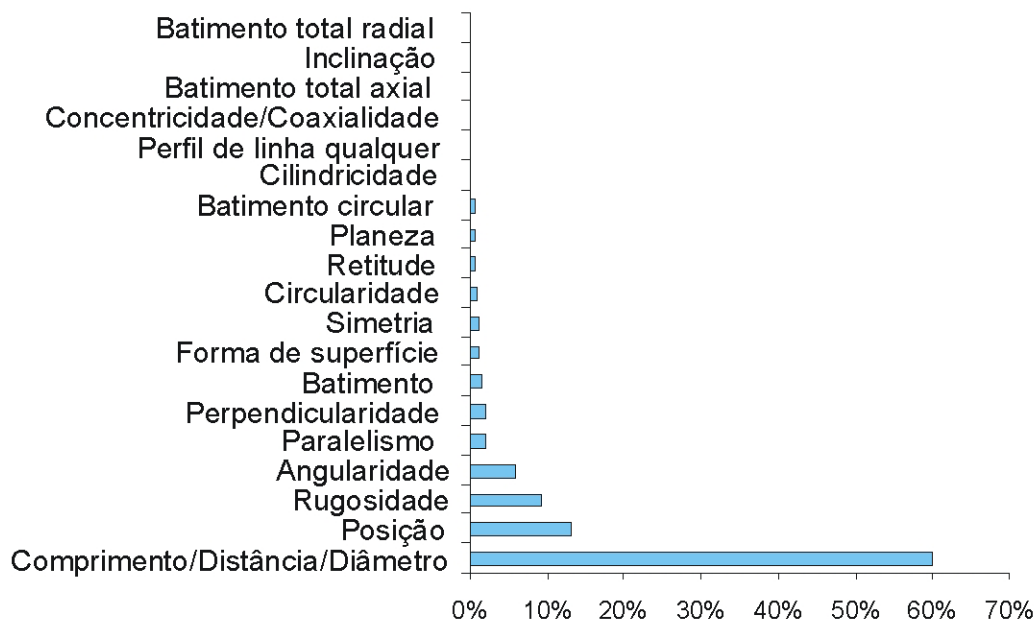


Figura 4: Ocorrência relativa dos diferentes tipos de tolerância geométrica e dimensionais em peças da indústria automobilística alemã (adaptado de [3]).

Assim, a estatística apresentada acima permite inferir que o estudo da medição de circularidade é metrologicamente relevante. Porém, sua importância não está dada exclusivamente pela aparição de tolerâncias de circularidade nos desenhos. A medição de circularidade está também envolvida como um elemento básico das medições de cilindridade, batimento circular e radial total e posição de uma característica circular. Ela possibilita um melhor controle dos desgastes excessivos em conjuntos dinâmicos, nos problemas de vedação e indica as possíveis causas de perda de rendimento.

Adicionalmente, a medição de desvios de circularidade não somente é cabível no caso de peças cujas funções são afetadas pelos desvios da forma circular perfeita (que é o caso da estatística anterior), senão também em peças e padrões, nos quais a medição dimensional (i.e. medição de diâmetro) é afetada pelos desvios da forma [4].

1.2 MÉTODOS ALTERNATIVOS PARA MEDIÇÃO DA CIRCULARIDADE

O conjunto das soluções existentes para medição de desvios de circularidade é amplo e sua descrição completa e exaustiva está muito além das possibilidades deste trabalho. Portanto, nessa dissertação estão apresentados e discutidos somente os sistemas táteis.

Entre os equipamentos táteis utilizados para a medição de circularidade, a máquina de medir forma (MMF) e a máquina de medir por coordenadas (MMC) são os mais usuais na indústria (figura 5).

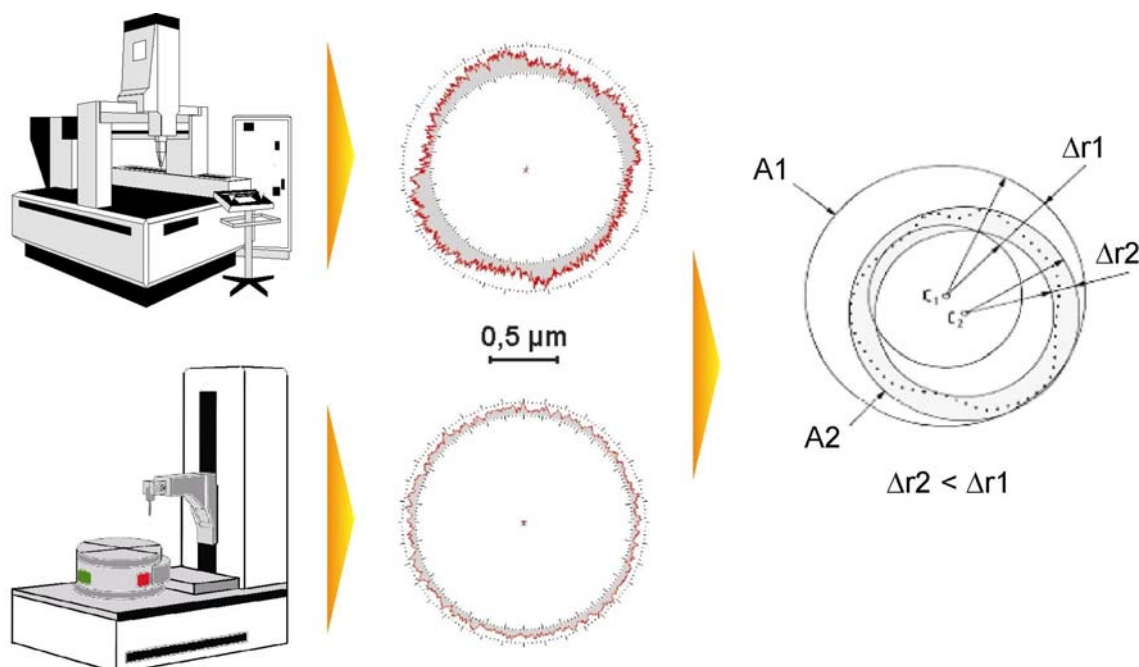


Figura 5: Da esquerda para direita, sistemas alternativos para avaliação de circularidade (MMC-acima e MMF-abaixo), perfis gerados e definição de circularidade segundo Anexo B da norma ISO 1101 [5].

Esses equipamentos estão baseados em princípios de funcionamento distintos e requerem cuidados diferentes quando utilizados. Todavia, é imprescindível que os resultados, mesmo efetuados com diferentes meios de medição, sejam harmonizados e passíveis de comparação [1].

Apesar da relativamente baixa quantidade de pontos que podem adquirir, as MMF são ainda o meio favorito para executar medições de circularidade com baixa incerteza, i.e. medições de referência (avaliar a circularidade de padrões tipo anel ou tampão). Porém, quando se lida com a avaliação de conformidade de produto ou o com o controle de processos industriais, as MMC apresentam vantagens metrológicas e operacionais que não podem ser menosprezadas. A realização de medições dimensionais, de forma, localização e orientação num único equipamento permite reduzir os tempos de fixação e posicionamento das peças e os tempos e custos decorrentes de seu transporte interno.

Na medição por coordenadas, a geometria da peça é definida através das coordenadas de pontos espaciais, adquiridos em áreas importantes para a função da peça e relacionados a um determinado sistema cartesiano de referência. Os pontos espaciais são adquiridos através de um sistema de apalpação eletromecânico ou eletromagnético e associados aos elementos geométricos escolhidos pelos operadores.

O conjunto da MMC com controle numérico computadorizado (CNC), dos dispositivos de troca de apalpador e da mesa rotativa como quarto eixo permitem a execução automatizada da medição e oferecem flexibilidade ao extenso espectro de peças.

Há alguns anos os fabricantes oferecem MMC com *hardware* que permitem a aquisição contínua de pontos medidos (tecnologia *scanning*), sendo essa uma característica interessante para o emprego das MMC no ambiente da produção industrial. A medição de desvios de circularidade usando a tecnologia de *scanning* é o tema desta dissertação.

1.3 A MEDIÇÃO DE CIRCULARIDADE USANDO A TECNOLOGIA DE SCANNING EM MMC

Na medição por *scanning* o resultado do processo de medição é um conjunto de dados brutos que constituem a denominada linha circunferencial extraída. Essa linha é definida de forma discreta e se afasta do perfil real da peça, determinado pela interseção entre a superfície da característica e o plano de *scanning* ou plano de circularidade. Esse sinal já alterado através da geometria do sensor, do sistema tribológico e do comportamento dinâmico da MMC será novamente alterado através do *software* de avaliação.

Embora sejam conhecidas basicamente as influências de algumas condições de contorno na execução da medição de forma (figura 6), até agora não foram investigados satisfatoriamente os seus impactos e inter-relacionamentos. Dessa forma, devem ser pesquisadas sistematicamente as grandezas já conhecidas e identificadas novas grandezas na medição de forma por *scanning* em MMC.



Figura 6: Influências no resultado da medição de forma (adaptado de [6]).

Na medição por *scanning* existem alguns parâmetros que podem ser escolhidos pelo operador da máquina, como por exemplo, a velocidade de *scanning* e a densidade de pontos, que afetam diretamente a incerteza de medição.

A elevada quantidade de pontos por revolução que podem ser adquiridos com uma MMC permite reduzir a distância entre pontos na avaliação de grandes características, contribuindo decisivamente para a redução da incerteza associada às limitações de amostragem. Porém, existe uma quantidade de dados a partir dos quais pontos adicionais não fornecerão mais ganho de informação sobre a característica adquirida. Essa quantidade de pontos depende de outros fatores, como, por exemplo, a forma real do contorno medido, o raio do sensor e a largura do campo de tolerância da característica encontrada. A prevenção da aquisição desses pontos desnecessários reduz os esforços de cálculo do elemento geométrico e influencia de forma positiva no tempo de processamento do programa de medição.

Um outro problema observado é a filtragem mecânica causada pela esfera do apalpador, situação em que o diâmetro do sensor deveria ser o menor possível dentro do contexto de medição por coordenadas. No entanto esse diâmetro está limitado pelo diâmetro da haste do apalpador, pois em alguns casos a redução da haste afeta negativamente a incerteza associada à qualificação do apalpador. Atualmente o

problema da filtragem mecânica pode ser amenizado através da aplicação de filtros morfológicos, implementados via *software*.

Atualmente não existe na literatura recomendações que auxiliem o operador de MMC na escolha do tipo de filtro, da frequência de corte, da quantidade de pontos, da velocidade de medição, da força de medição e do método de análise para medição de desvios de circularidade. Infelizmente, o conhecimento do complexo sistema de causas e relações que afetam a exatidão das medições de forma em MMC é ainda deficitário. A escolha desses parâmetros antes de iniciar uma medição é conhecida por definição da estratégia de medição e processamento dos resultados. Infelizmente não há sugestões confiáveis que permitam definir valores otimizados dos parâmetros que determinam a estratégia de medição nem procedimentos consensados para avaliar e informar a incerteza de medição em todos os casos da prática industrial. Essa situação cria insegurança nos usuários da tecnologia e gera problemas na hora de provar que as medições são rastreáveis. Outro problema é que a liberdade na definição da estratégia de medição acaba impossibilitando uma comparação entre resultados obtidos por MMF e MMC.

A melhoria das práticas de medição de desvios de forma por *scanning* em MMC é o objetivo de um projeto de pesquisa que está sendo executado em cooperação entre o Laboratório de Máquinas Ferramentas da Universidade Técnica de Aachen (Alemanha), a Fundação CERTI e o Laboratório de Metrologia e Automatização (LABMETRO) da Universidade Federal de Santa Catarina. O objetivo do projeto de pesquisa, financiado pela Sociedade Alemã de Pesquisa (DFG), consiste em estabelecer estratégias de medição específicas considerando o mensurando e a tarefa de medição. Essas estratégias, associadas a um processamento adequado dos dados de medição (filtros e eliminação de dados atípicos), deverão permitir a medição de forma em MMC de maneira otimizada do ponto de vista de tempo de medição e incerteza de medição.

A figura 7 ilustra bem a divisão das tarefas dentro do projeto, sendo que os módulos: condições locais e parâmetros de medição foram estudados pela equipe alemã, ficando para a equipe brasileira a estratégia de avaliação e apresentação de resultados.

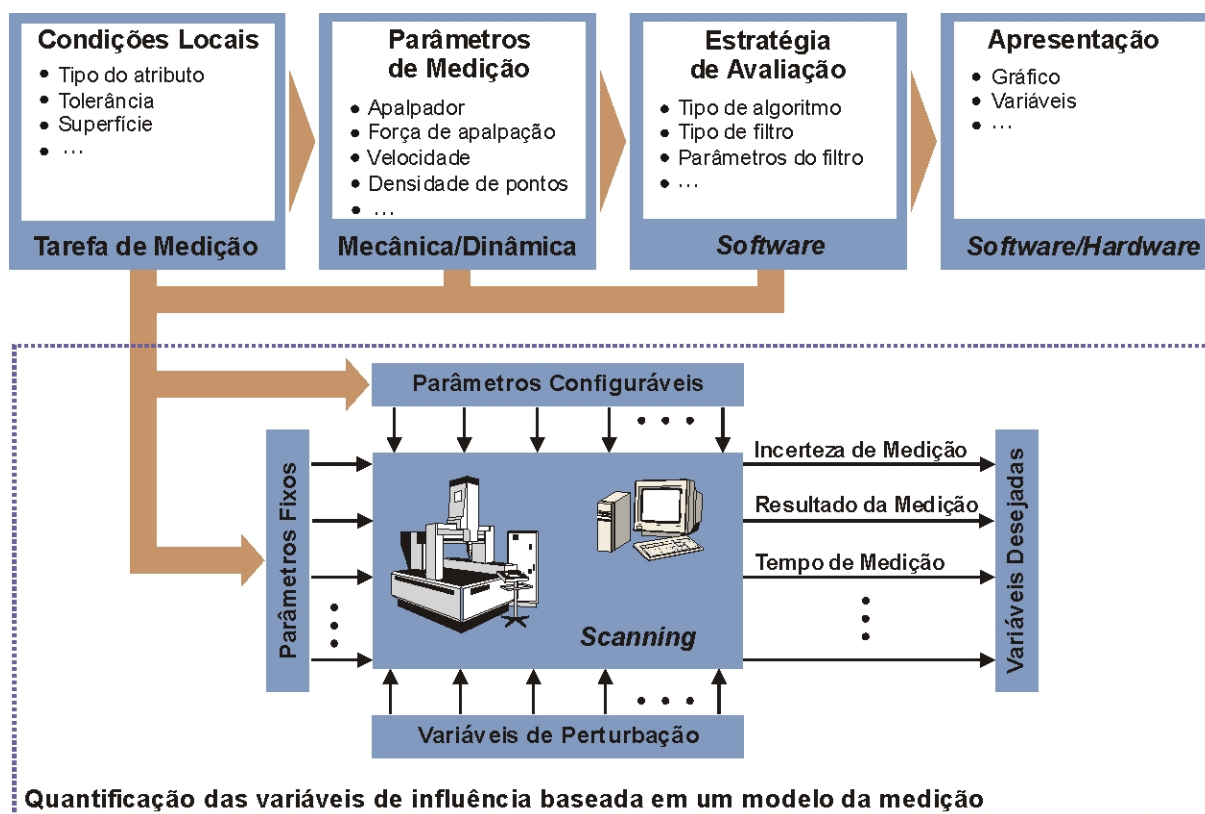


Figura 7: Divisão das tarefas dentro do escopo do projeto (adaptado de [7]).

Assim, dentro do escopo da parte brasileira desse projeto selecionou-se o estudo dos “Análise dos efeitos da filtragem na medição de circularidade em máquinas de medir por coordenadas utilizando *scanning*”. O objetivo geral desta dissertação é gerar evidência observacional que permita melhorar a prática da medição de desvios de forma por *scanning*.

Os objetivos específicos são:

- verificar a influência do processo de filtragem utilizando filtros normalizados e morfológicos;
- analisar a relevância da filtragem mecânica devida ao sensor;
- analisar a regularidade do espaçamento dos pontos coletados e, caso seja necessário, quantificar a influência do espaçamento irregular e propor um método para sua minimização;
- estudar a influência do algoritmo de ajuste e propor novas formas de análise dos resultados;
- desenvolver um conjunto de instruções que determinem os parâmetros ajustáveis em função do diâmetro da peça e da velocidade de medição.

No Capítulo 2 é abordada a evolução histórica dos processos de filtragem em medição de forma e da normalização nesta área até os dias atuais. Também é apresentado e discutido detalhadamente o processo de medição por *scanning* em MMC, bem como os *softwares* e *hardwares* utilizados.

No Capítulo 3 são apresentados a metodologia e os materiais utilizados nos experimentos. São relatados os procedimentos, métodos, equipamentos e padrões utilizados neste trabalho. Também são definidos os parâmetros de análise.

No Capítulo 4 são estudados os efeitos da filtragem mecânica e do filtro morfológico. São mostradas a influência do espaçamento não uniforme dos dados na medição e a influência do método de análise em função do elemento geométrico.

No Capítulo 5 são apresentadas as recomendações e procedimentos para planejamento e validação da medição de circularidade por *scanning*.

Finalmente, no Capítulo 6, são apresentadas as conclusões sobre o processo da pesquisa, sobre os resultados gerados e algumas propostas para continuidade da linha de pesquisa.

2 ESTADO-DA-ARTE

Este capítulo está estruturado na forma de dois blocos. No primeiro bloco são apresentadas as normas contendo as definições sobre medição de forma, com foco na medição de circularidade. São descritas as ferramentas, métodos e módulos matemáticos necessários para o estudo do problema.

No segundo bloco são apresentados os equipamentos utilizados para a medição de desvios de circularidade, peculiaridades, relatando as vantagens e desvantagens dos diferentes métodos. Por fim é estudado a problemática da medição de circularidade usando tecnologia de *scanning* em máquinas de medir por coordenadas.

Por motivos históricos foi necessário neste capítulo recorrer à medição de rugosidade. Considerou-se de grande importância a abordagem desse tema, pois muitas das técnicas e valores que são utilizados atualmente na medição de forma, possuem origem na medição de rugosidade.

2.1 NORMAS E ESPECIFICAÇÕES GEOMÉTRICAS

Na primeira metade do século XX era comum que os desenhos incluíssem notas descrevendo os processos com que a peça devia ser fabricada (e.g. “retificado”). Especificações desse tipo trazem, indiretamente, informações sobre os desvios de forma e a textura superficial que são aceitáveis para o correto funcionamento da peça, já que forma e rugosidade são, dentro de certos limites, próprias de cada processo. No entanto, essa prática criou muitos problemas durante a Segunda Guerra Mundial, ocasionando em seguida o surgimento das normas GD&T (*Geometric Dimensioning and Tolerancing*). Desde então se instalou o modo de especificação baseado no denominado “dogma de independência do processo”: o desenho devia definir o resultado esperado e não como consegui-lo. Esse princípio é formalmente declarado na seção 1.4(e), da norma ANSI Y14.5 [8]. De acordo com ele, o projetista deve

comunicar em forma não ambígua todos os requisitos sobre a geometria da peça através de símbolos normatizados. Cabe mencionar que o dogma de independência do processo está sendo atualmente questionado, pelo desenvolvimento simultâneo de produto e processo, no contexto da engenharia simultânea [9]. Porém, isso não significa a volta aos comentários indicando o processo de fabricação nos desenhos: na época da engenharia simultânea, mais do que nunca, a formalização da documentação de projeto é um pré-requisito para a qualidade.

Uma especificação completa deve descrever os requisitos de tamanho (i.e distância entre dois planos ou diâmetro de uma seção circular), mas também os requisitos sobre a forma, posição, orientação etc. Particularmente, a relação entre o tamanho de uma característica da qualidade e sua forma é objeto de dois tratamentos diferenciados, dependendo da vertente normativa.

A norma ANSI Y14.5 [8], usada pela indústria norte-americana, utiliza como *default* o princípio de envelope, conhecido também como princípio de Taylor, amplamente disseminado desde princípios do século XIX. Esse princípio especifica que os desvios de forma não podem ultrapassar o limite de máximo material, estabelecido pela tolerância de tamanho. O controle segundo o princípio de Taylor é tipicamente implementado pelos calibradores passa/não-passa.





A ISO adota como *default* o princípio de independência, definido em particular na ISO 8015 [10]. Segundo esse princípio, o tamanho de uma característica não limita seus desvios de forma e, conseqüentemente, ambos os atributos devem ser especificados e avaliados separadamente.

O engenheiro inglês R. E. Reason foi o primeiro a fazer uma distinção entre desvios de forma, ondulação e rugosidade, quando especificava a qualidade de pinos e furos. Desvios de forma e dimensão foram considerados por ele macro-geométricos, enquanto que os desvios de ondulação e rugosidade foram chamados de desvios micro-geométricos [11].

Segundo a norma VDI/VDE 2601 [2], os desvios de forma podem ser classificados segundo a relação existente entre a profundidade e o comprimento de onda. Os desvios de forma, ou de primeira ordem, apresentam uma relação entre comprimento da irregularidade e a amplitude da mesma maior que 1000. A ondulação, ou desvios de segunda ordem caracteriza-se por uma relação entre comprimento das ondas e a amplitude da mesma menor que 1000 e maior que 100. Na rugosidade, ou

desvios de terceira ordem, a relação entre comprimento dos sulcos e a amplitude dos mesmos é menor que 150 e maior que 5.

Na figura 8 pode ser observada uma classificação alternativa, extraída da norma DIN 4760, de 1982. Nesta norma a transição entre as ondas e o desvio de forma não está claramente definida e as condições sobre a relação entre o comprimento da onda e a profundidade da mesma (pico-a-pico) são apenas orientações.

Desvios de forma (representado numa seção de perfil)	Exemplo para os tipos de desvios	Exemplo para a causa da origem do desvio
1ª ordem: Desvio de forma 	Não plano Ovalado	Defeito em guias de máquinas-ferramentas, deformações por flexão da máquina ou da peça, fixação errada da peça, deformações devido a temperatura, desgaste
2ª ordem: Ondulação 	Ondas	Fixação excêntrica ou defeito de forma de uma fresa, vibrações da máquina-ferramenta, da ferramenta ou da peça
3ª ordem: Rugosidade 	Ranhuras	Forma do gume da ferramenta avanço ou profundidade de corte
4ª ordem: Rugosidade 	Estrias Escamas Ressaltos	Processo de deformação de cavaco (cavaco arrancado cavaco de cisalhamento gume postiço de corte), deformação do material por jato de areia, forma ressaltos por tratamento galvânico
5ª ordem: Rugosidade Não mais representável graficamente em forma simples	Estrutura	Processo de cristalização, modificação da superfície por ação química (Ex: decapagem), processo de corrosão
6ª ordem: Não mais representável graficamente em forma simples	Estrutura reticulada do material	Processos físicos e químicos da estrutura do material, tensões e deslizamentos na rede cristalina








 Posição dos desvios de forma de 1ª a 4ª ordem

Figura 8: Classificação dos desvios de forma (adaptado de [12]).

Dentre as normas do sistema ISO-GPS (*Geometric Product Specification*), merece destaque a ISO 1101 (2004) [5], que descreve a representação simbólica das especificações nos desenhos e as instruções para interpretação e controle, respectivamente. Os símbolos para característica tolerada segundo a ISO 1101 (2004) são apresentados na tabela 1.

Tabela 1: Símbolos das características toleradas (adaptado de [5]).

Tolerância	Característica tolerada	Símbolo
Forma	Retitude	
	Planeza	
	Circularidade	
	Cilindricidade	
	Perfil de linha qualquer	
	Perfil de superfície qualquer	

2.1.1 NORMAS ESPECÍFICAS SOBRE CIRCULARIDADE

Nos primeiros instrumentos utilizados para o controle geométrico da circularidade, a variação radial era plotada em coordenadas cartesianas por uma impressora de uma máquina de medir rugosidade. Entretanto, a dificuldade imediata foi a separação do erro de circularidade da peça do erro de excentricidade, devido à centragem imperfeita da peça no instrumento. O uso das coordenadas polares permitiu superar esse problema. Para o gráfico polar, uma ligeira excentricidade aparecia como erro residual de segunda ordem, que pode ser expresso pela Equação 1 [13]:

$$Erro_{residual} = \frac{E^2}{2 \cdot R} \quad \text{Equação 1}$$

Onde E é a excentricidade da peça e R a média do raio.

Junto com o surgimento das primeiras máquinas de medir forma veio o problema de definir como deveria ser calculado o desvio de circularidade. Pesquisadores alemães propuseram a utilização de alguns dos critérios de zona a seguir:

- para um furo, define-se o desvio de circularidade como o maior desvio radial com referência ao máximo círculo inscrito;
- para um pino, define-se o desvio de circularidade como o maior desvio radial com referência ao menor círculo circunscrito;
- alternativamente, o desvio de circularidade é definido como a diferença entre os raios de dois círculos concêntricos que se ajustam o perfil da peça.

Surgiram também outras propostas, tais como a diferença de diâmetros entre o máximo círculo inscrito e o mínimo círculo circunscrito. Alguns metrologistas norte-americanos eram favoráveis a definir o desvio de circularidade como o máximo desvio radial, essencialmente a mesma definição do método da zona.

R. E. Reason [14] mostrou que com o método da zona era preciso indicar o tipo de elemento, furo ou eixo, para que pudesse definir corretamente o centro e o valor do desvio de forma. Mostrou também que, sob certas circunstâncias, o método “radial” permitia que mais de uma posição central fosse identificada para um mesmo perfil. Talvez devido a essa discrepância a Inglaterra tenha adotado oficialmente a definição matemática do “círculo médio”, ou seja: “um círculo em que a soma da área abaixo e

acima da linha média são idênticas“, como foi originalmente proposto por Reason em 1960. A desvantagem deste método é que o resultado não está diretamente relacionado com a função. Todavia, é importante lembrar que antigamente as outras aproximações para o círculo médio eram feitas através de papel transparente com escalas polares (gabaritos) ou compasso [15].

Atualmente as normas estão sendo revisadas com o objetivo de chegar a um consenso sobre a definição de circularidade. Segundo a ISO 1101 (2004), o campo de tolerância de circularidade é limitado na seção de medição por dois círculos concêntricos, afastados de uma distância “t” (figura 9). Essa definição é a mesma que consta na norma NBR 6409 (1997) [16].

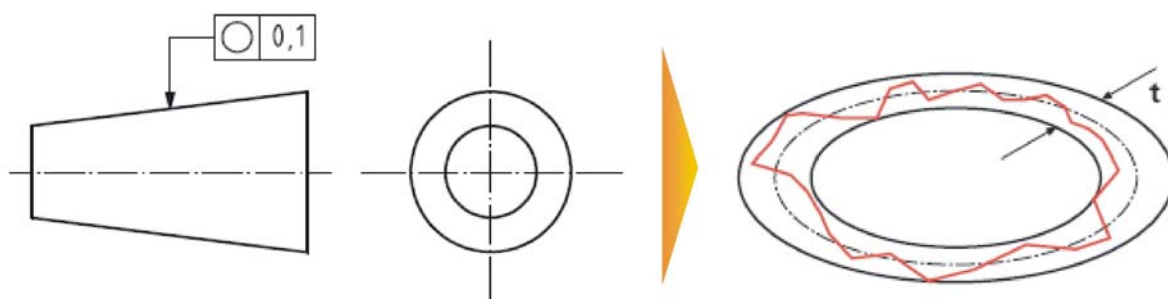
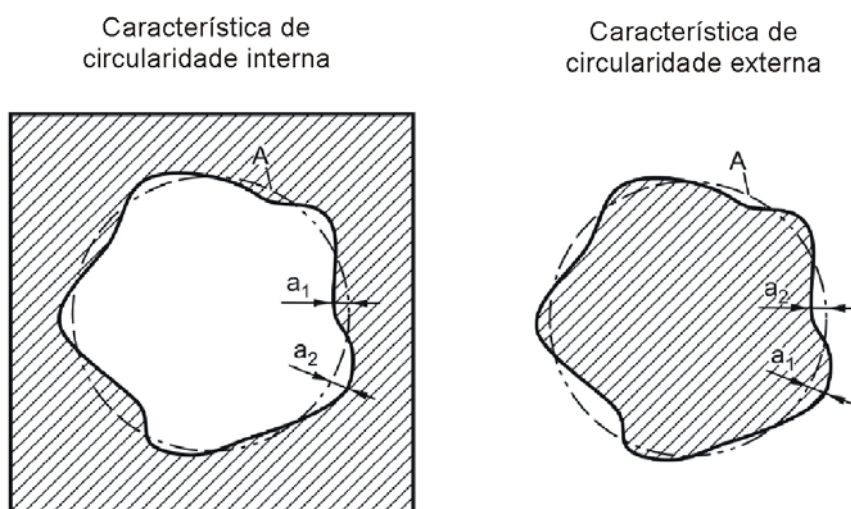


Figura 9: Característica tolerada de circularidade (adaptado de [5]).

A norma ISO 1101 (2004) menciona a ISO/FDIS 12181-1:2001(E) [17], a qual apresenta algumas definições sobre circularidade, métodos de análise e parâmetros de análise que são de interesse para esta dissertação (figura 10):

- *Circularidade*: é uma propriedade do círculo;
- *Eixo de Circularidade*: eixo da característica associada a uma característica integral;
- *Plano de circularidade*: plano perpendicular ao eixo de circularidade contendo toda a extensão da característica;
- *Superfície real da peça*: superfície que limita o corpo e o separa do meio ambiente;
- *Linha circunferencial extraída*: representação digital da intersecção da superfície real da peça e o plano de circularidade;

- *Perfil de circularidade (circularidade)*: corresponde à linha circunferencial extraída intencionalmente modificada por um filtro.
- *Desvio de circularidade local*: é determinado através da mínima distância de um ponto qualquer no *perfil de circularidade* e o *círculo de referência*.



Legenda:

A - círculo de referência;

a_1 - desvio local positivo;

a_2 - desvio local negativo.

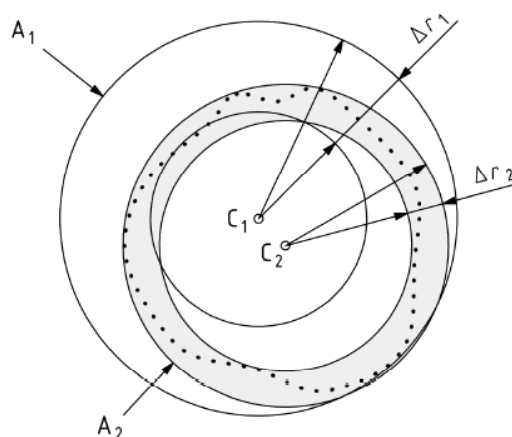
Figura 10: Desvio de forma local de uma característica de circularidade externa [17].

Como já foi introduzido na discussão sobre a evolução histórica do conceito de circularidade, para que o desvio de forma possa ser quantificado é necessária a utilização de círculos de referência. O círculo de referência é um círculo ajustado ao perfil de circularidade de acordo com as convenções especificadas, nas quais os desvios e os parâmetros de circularidade serão referenciados. O círculo de referência pode ser definido usando diferentes algoritmos de ajuste:

- Círculo de referência por mínima zona (MZCI - *minimum zone reference circle*): dois círculos concêntricos envolvendo o perfil de circularidade com o menor afastamento radial.

- Círculo de referência por mínimos quadrados (LSCI - *least squares reference circle*): círculo tal que a soma dos quadrados dos desvios locais de circularidade seja mínima.
- Mínimo círculo de referência circunscrito (MCCI - *minimum circumscribed reference circle*): o menor círculo possível que pode ser ajustado em torno do perfil de circularidade.
- Máximo círculo de referência inscrito (MICI - *maximum inscribed reference circle*): o maior círculo possível que pode ser ajustado dentro do perfil de circularidade.

Por não haver convenção sobre o método de análise estabelecido, a ISO 1101 (2004), para assegurar a compatibilidade com a norma precedente ISO 1101 (1983) acrescentou em seu anexo B um exemplo de como avaliar os desvios de forma extraídos e compará-los às zonas de tolerância (figura 11).



Legenda:

A₁ - círculo de referência;

A₂ - círculo de referência;

Δr₁ - distância radial entre dois círculos concêntricos;

Δr₂ - distância radial entre dois círculos concêntricos;

C₁ - centro do círculo de referência A₁;

C₂ - centro do círculo de referência A₂.

Figura 11: Definição de circularidade, ISO 1101 Anexo B (adaptado de [5]).

A circularidade de uma característica pode ser dita aceitável quando o seu perfil, intencionalmente modificado por um filtro, fica confinado entre dois círculos concêntricos, onde a diferença entre os seus raios (Δr₂) é menor ou igual ao valor da tolerância especificada (Δr₁). A localização dos centros desses círculos e o valor dos

seus raios devem ser determinados de maneira que a diferença de raios (Δr_2) seja a menor possível.

Para que os desvios de forma possam ser quantificados e comparados à característica tolerada, além do círculo de referência, é necessário definir parâmetros para quantificar os desvios locais. O parâmetro mais utilizado é o desvio de circularidade pico-vale ou RONt, que corresponde ao valor do maior desvio local positivo adicionado ao maior desvio local negativo. O desvio de circularidade pico-vale pode ser usado para os círculos da referência (MZCI, LSCI, MCCI e MICI).

A norma ISO/FDIS 12181-1:2001(E) ainda especifica outro parâmetro chamado de conteúdo dinâmico, que é avaliado aplicando a transformada de Fourier. Através da transformada de Fourier os componentes harmônicos (senoidais) que compõem a linha circunferencial extraída podem ser descritos como uma função das amplitudes das ondas pelas frequências em ondulações por revolução (OPR). Essa forma de análise possibilita uma melhor compreensão das influências provenientes do processo produtivo, bem como de outras fontes de perturbação do processo de medição, tais como vibração e interferências elétricas. O conteúdo dinâmico do sinal também pode ser usado para os círculos da referência (MZCI, LSCI, MCCI e MICI).

2.2 FUNDAMENTOS DE FILTRAGEM

2.2.1 A ORIGEM DO PROCESSO DE FILTRAGEM

Imperfeições na superfície causadas pelo processo de manufatura, classificadas como rugosidade, sempre despertaram as atenções de especialistas e era necessária uma forma de quantificar tais irregularidades que fosse menos subjetiva que o tato ou a própria unha. No início da década de 30 o engenheiro alemão Gustav Schmaltz obteve os primeiros gráficos de rugosidade utilizando um perfilômetro óptico com uma resolução vertical de 25 nm (figura 12).

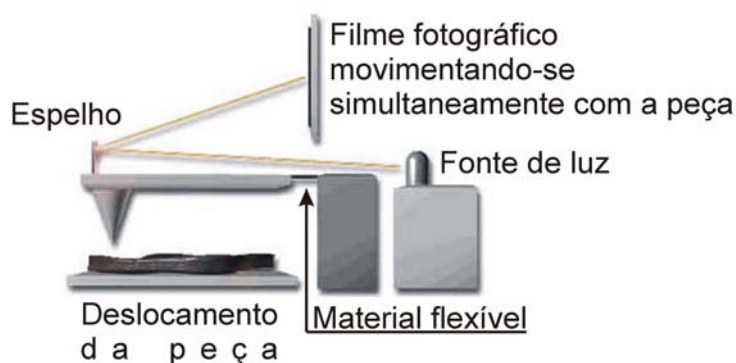


Figura 12: Perfilômetro de Schmalz [18].

A seleção da irregularidade a ser caracterizada como rugosidade está baseada no conceito original de considerar o comprimento do perfil, julgando-o grande o suficiente para representar a rugosidade, mas curto o bastante para ignorar a ondulação. As primeiras observações do limite entre rugosidade e ondulação, publicadas por Schmalz em 1936 no artigo “Die Oberflaeschenkunde” (O Conhecimento da Superfície), sugeriram uma área de 1 mm^2 [19].

A tecnologia utilizada para separar as diferentes ordens de desvio de forma é a filtragem. O filtro é o responsável pela divisão da superfície em forma, ondulação e rugosidade. Para obter os desvios de forma, por exemplo, é necessário um filtro com característica de passa-baixas. Para a separação da ondulação e rugosidade é utilizado um filtro com características passa-altas. O que os filtros fazem é atenuar (isto é, enfraquecer) os sinais indesejáveis e transmitir os outros sinais com um mínimo de atenuação.

O primeiro instrumento a utilizar um filtro simples RC (um resistor e um capacitor) passa-baixas para estudar as irregularidades da superfície foi o perfilômetro de Abbott, em 1936 [13]. Os circuitos que se comportam como filtros passa-baixas apresentam uma transição gradual da banda passante para a banda rejeitada (figura 13). Assim, ao plotar o módulo da função de transferência de um circuito real, cabe definir onde se encontra a frequência de corte.

A definição de frequência de corte, ou de meia potência, é aquela onde o módulo da função de transferência é igual ao valor máximo dividido por raiz de dois [20].

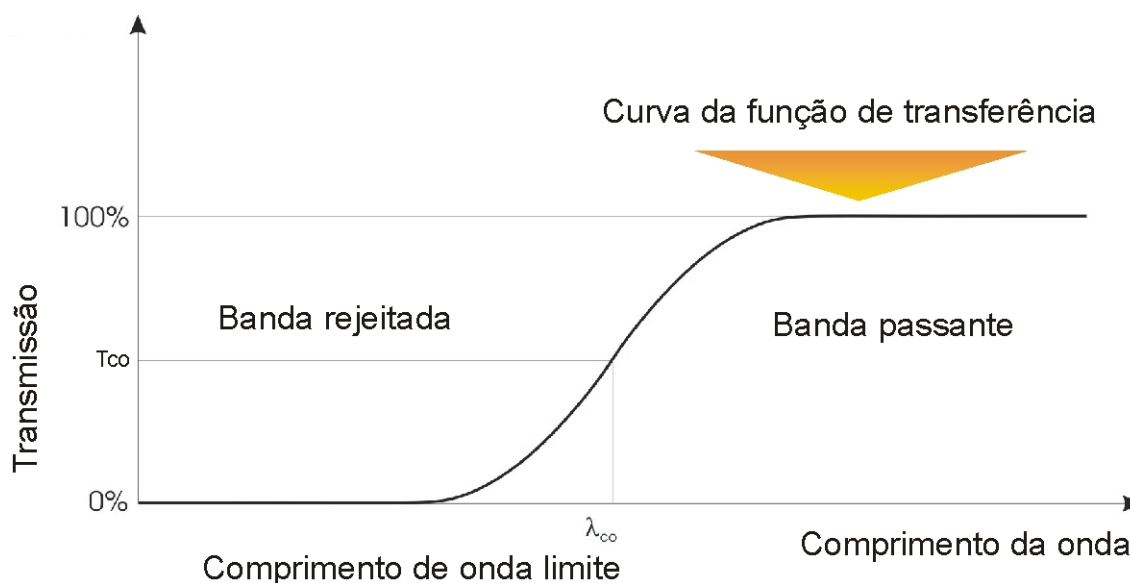


Figura 13: Curva da característica de transmissão de um filtro passa-baixas (adaptado de [3]).

O perfilômetro de Abbott (1936) separava a ondulação da rugosidade, por meio de um filtro passa-baixas com transmissão de 70,7% na frequência de corte. Esse filtro utilizava um comprimento em torno de 0,7 mm determinado em função da velocidade de avanço para representar a superfície (frequência limite = velocidade de alimentação/comprimento de onda limite).

$$f_{co} = \frac{V_{al}}{\lambda_{co}} \quad \text{Equação 2}$$

Para equipamentos destinados a superfícies muito bem acabadas, tais como lentes, um comprimento de 0,4 mm se mostrava mais apropriado. Entretanto, percebeu-se que uma faixa de valores de comprimento de onda seria necessária. Decidiu-se então introduzir uma série de raiz de dez no qual o valor 0,8 mm acabou se tornando o comprimento preferido [13].

Os primeiros filtros utilizados no tratamento de sinais de perfis geométricos foram os simples RC passa-baixas e/ou RC passa-altas, utilizando uma característica de transmissão de 70,7% no comprimento de onda limite e uma atenuação de 6 dB por oitava. Posteriormente, um filtro com função transferência mais íngreme foi obtido através da associação de dois resistores e capacitores em série (por isso conhecido como filtro 2RC), conseguindo uma atenuação de 12 dB por oitava. Em termos de transmissão para a frequência de corte, ocorreu uma diferença entre o valor escolhido nos Estados Unidos (80%) e na Inglaterra de (70%), de forma que se optou pelo valor médio de 75% [21].

Infelizmente, todos os filtros analógicos distorcem o perfil (figura 14). Para solucionar esse problema foram desenvolvidos, na década de 60, métodos que possibilitaram a implementação de filtros digitais. Em 1963/64, J. Pekenik introduziu o método da convolução [11]. Na mesma época Tukey e Cooley apresentaram a transformada rápida de Fourier (FFT – *Fast Fourier Transform*) que reduz o número de computações e conseqüentemente o tempo de processamento [22]. Finalmente, em 1965, D. J. Whitehouse desenvolveu o filtro digital 2RC com fase corrigida, conhecido como filtro 2RC-PC (*Phase Correct*). A utilização de filtros 2RC-PC digitais fez com que a distorção de fase fosse corrigida, de forma que a característica de transmissão de amplitude permanecesse igual a dos filtros analógicos 2RC (figura 14). Cabe destacar que esse período corresponde também ao surgimento de equipamentos eletrônicos capazes de discretizar os dados e armazená-los para serem pós-processados.

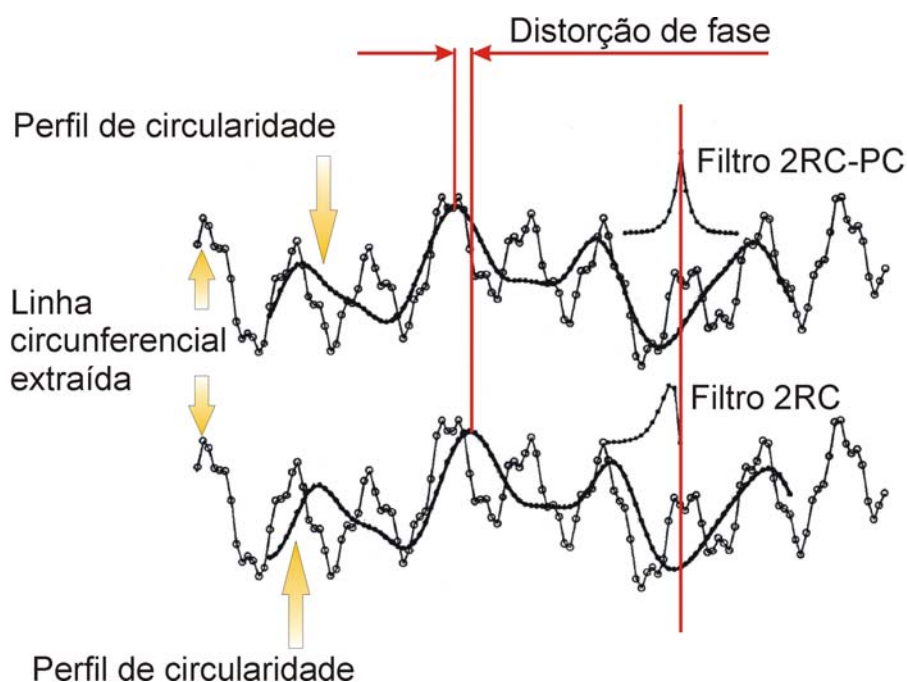


Figura 14: Distorção de fase (adaptado de [21]).

Em 1971 a seguinte afirmação foi realizada: “Os conceitos de medição de rugosidade devem ser estendidos para ondulação e erro de forma; estes termos devem ser trocados por designações numéricas, por exemplo, com base em bandas de ondas” [11].

2.2.2 FILTRO GAUSS

Como ficou evidenciado, o estabelecimento de uma característica de filtro especial para análise de perfil não se dá unicamente por aspectos físicos da tecnologia de medição, mas também por questões históricas, políticas e aspectos da técnica de cálculo [23]. Após a introdução do filtro 2RC-PC foram implementados outros tipos de filtros, tais como os filtros com função peso triangular e quadrada que possuíam a vantagem de utilizar técnicas de cálculo fáceis e rápidas de serem implementadas.

Para instrumentos digitais, o filtro mais apropriado para informações a respeito do perfil da superfície é o filtro gaussiano com fase corrigida. A escolha da função peso gaussiana, que é do mesmo contexto funcional da função transferência de amplitude para o filtro de fase corrigida, se deve ao fato da mesma poder ser utilizada com 50% de transmissão no comprimento de onda de corte. A importância disso é que as parcelas de onda curta e longa do perfil podem ser separadas e posteriormente recombinadas sem alterar o resultado final.

Nesse filtro, a transmissão de 50% opera uma complementação do passa-altas (PA) e passa-baixas (PB), onde o coeficiente do filtro fornece uma fórmula fácil, ou seja, o componente de perfil de onda curto é a diferença entre o perfil da superfície e componente de perfil de onda longo:

$$PB(\lambda) = 1 - PA(\lambda)$$

Além disso, o filtro gaussiano tem uma característica de transmissão relativamente íngreme na frequência de corte em comparação com o filtro 2RC [21] [24].

Segundo a norma ISO 11562 (1996) [24], a função peso para o filtro de perfil de fase correta corresponde à função densidade gaussiana com comprimento de onda de corte λ_{co} (figura 15):

$$s(x) = \frac{1}{\alpha \cdot \lambda_{co}} \cdot e^{-\pi \left(\frac{x}{\alpha \cdot \lambda_{co}} \right)^2} \quad \text{Equação 3}$$

Onde x é a posição em relação ao centro da função peso, λ_{co} é o comprimento de onda de corte do filtro de perfil e,

$$\alpha = \sqrt{\frac{\ln(2)}{\pi}} = 0,4697$$

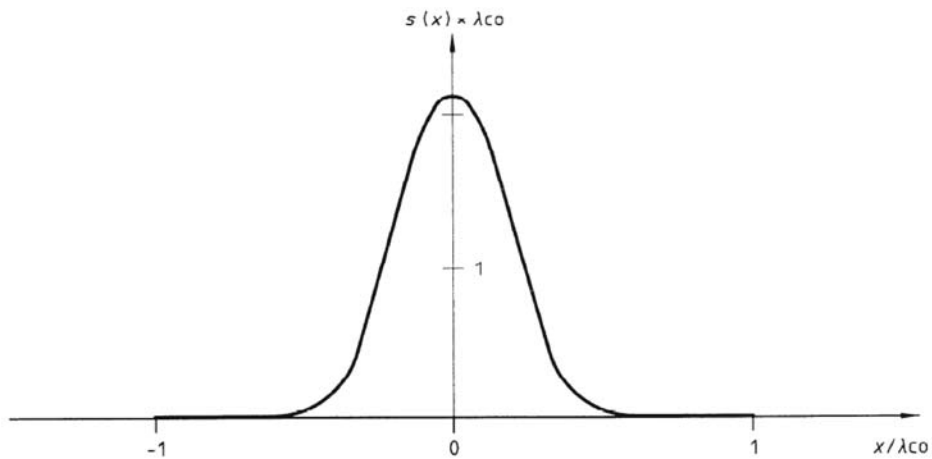


Figura 15: Perfil da função peso do filtro (adaptado [24]).

A característica do filtro passa-baixas (figura 16) é determinada pela equação 4:

$$\frac{a_1}{a_0} = e^{-\pi \cdot \left(\frac{\alpha \cdot \lambda_{co}}{\lambda}\right)^2} \quad \text{Equação 4}$$

onde:

- a_0 é a amplitude do perfil de rugosidade senoidal antes da filtragem;
- a_1 é a amplitude do perfil senoidal na linha média;
- α é o comprimento de onda do perfil senoidal.

No caso específico da medição de circularidade, é usual expressar a frequência de corte do filtro em ondulações por revolução (OPR). De acordo com a norma ISO 11562, o filtro passa-baixas transmite frequências a partir de 1 OPR e atenua progressivamente o perfil de ondulações na região em torno da frequência de corte (figura 16).

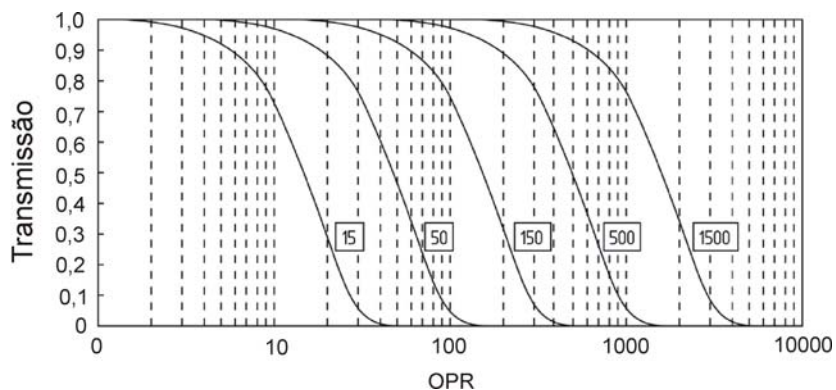


Figura 16: Características de transmissão de um filtro Gauss passa-baixas com frequências de corte 15 OPR; 50 OPR; 150 OPR; 500 OPR; 1500 OPR (adaptado da [25]).

A característica do filtro do componente de onda curto é complementar à característica de transmissão do componente do perfil de onda longo e o componente de perfil de onda curto é a diferença entre o perfil da superfície e o componente de perfil de onda longo:

$$\frac{a_2}{a_0} = 1 - e^{-\pi \cdot \left(\frac{\alpha \cdot \lambda c o}{\lambda}\right)^2} \quad \text{Equação 5}$$

Onde a_2 é a amplitude do perfil de onda de alta frequência.

O filtro passa-altas é um filtro de fase corrigida que atenua as ondas de 1 OPR até a frequência de corte e transmite as ondulações mais curtas do que a frequência de corte (figura 17).

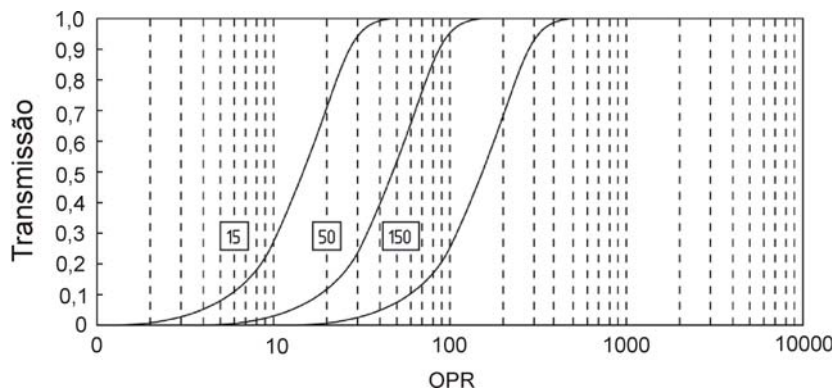


Figura 17: Características de transmissão de um filtro Gauss passa-baixas com frequências de corte 15 OPR; 50 OPR e 150 OPR (adaptado da [25]).

O filtro Gauss representa o estado da arte nas normas ISO, embora esteja ainda longe de produzir uma filtragem perfeita. De fato, para uma dada frequência de corte, ele pode transmitir alguns componentes de rugosidade distorcidos que deveriam ter sido eliminados, também alguns componentes de ondulação que se desejasse transmitir corretamente [17].

2.2.3 FREQUÊNCIAS DE CORTE NORMALIZADAS PARA PERFIL DE CIRCULARIDADE EM OPR

A norma ISO 11562 [25] sugere alguns valores de frequência de corte para os filtros passa-baixas e passa-altas, que também são encontrados na maioria dos equipamentos disponíveis na indústria. No entanto, equipamentos modernos permitem que outras frequências de corte diferentes das sugeridas pela norma possam ser

utilizadas. Nesses casos é importante ter em mente que esse tipo de escolha pode influenciar negativamente na comparabilidade de medições feitas em diferentes equipamentos.

Como se pode observar na figura 18, em perfis circulares, quanto maior o diâmetro maior será a distância entre duas ondas consecutivas. Assim, existe a necessidade de usar filtros que permitam mais ondulações por revolução, na medida em que o diâmetro aumenta para que o nível de detalhamento na análise da superfície seja mantido.

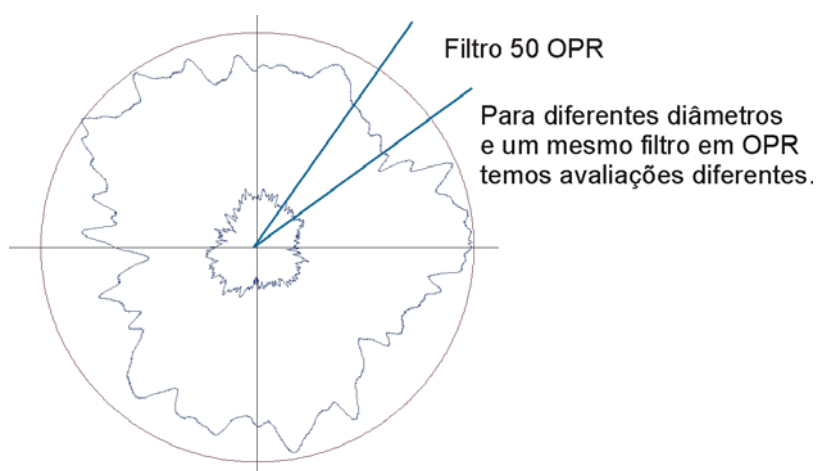


Figura 18: Efeito do número de ondulações por revolução para diferentes diâmetros.

A tabela 2 é uma primeira recomendação que auxilia os operadores na escolha da banda de transmissão correta em função do diâmetro da peça.

Tabela 2: Filtro passa-baixas com valores em OPR para a obtenção do perfil de circularidade.

Diâmetro do círculo de referência [mm]	Ondulações por revolução, OPR_{\min}
$d \leq 8$	15
$8 < d \leq 25$	50
$25 < d \leq 80$	150
$80 < d \leq 250$	500
$250 < d$	1500

Os valores na tabela 2 são obtidos através da equação 6, que aproxima um filtro linear com frequência de corte $\lambda_{co} = 0,8$ milímetros.

$$OPR_{\min} = \frac{\pi \cdot d}{\lambda_{co}}$$

Equação 6

A característica de transmissão de filtros analógicos e digitais depende somente do comprimento de onda, e é independente da amplitude, ao contrário do que ocorre com os processos mecânicos de filtragem e.g. diâmetro do sensor que são influenciados pelo comprimento e também pela amplitude da onda.

2.2.4 ALIASING E O CRITÉRIO DE NYQUIST

A percepção de um sinal pode ser distorcida pela amostragem. A separação dos pontos da amostragem (o intervalo de amostragem) deve ser escolhida de modo que o digitalizado seja representativo do original. Se o sinal original é limitado por uma largura de banda e comprimentos de ondas curtos (harmônicas de alta frequência), o teorema de Nyquist impõe uma limitação para o máximo intervalo de amostragem possível:

“Sabendo-se que um sinal infinitamente longo não contém nenhum comprimento de onda mais curto do que o comprimento de onda especificado, então o valor do sinal pode ser reconstruído em intervalos regularmente espaçados desde que o intervalo de amostragem seja menor do que a metade do comprimento de onda especificado” [25].

Estritamente, o teorema de Nyquist aplica-se somente aos sinais infinitamente longos. Porém, na prática o critério de Nyquist é ainda aplicável mesmo que os sinais sejam finitos no comprimento. Se um intervalo de amostragem mais longo do que o critério de Nyquist for especificado o sinal digitalizado sofrerá uma distorção denominada de *aliasing*. O *aliasing* faz que um senóide com um comprimento de onda curta parece ser uma onda com comprimento mais longo, devido ao intervalo de amostragem que é demasiado grande para definir a forma verdadeira do sinal (figura 19).

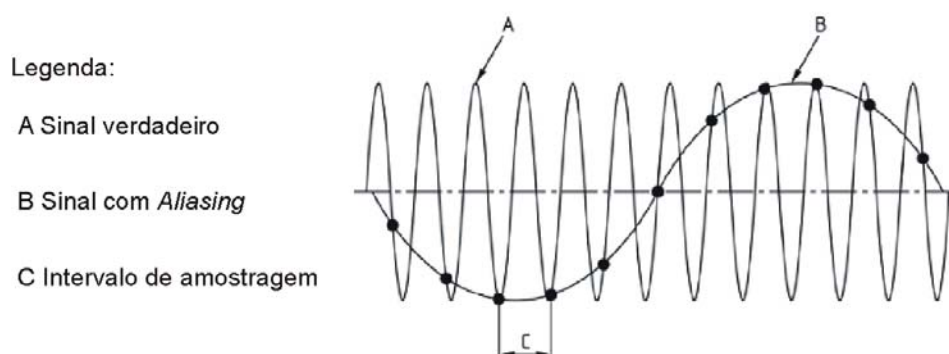


Figura 19: *Aliasing*, adaptado de [25].

Assim, se o intervalo de amostragem escolhido é considerado relativamente grande, as harmônicas mais elevadas irão parecer mais baixas e distorcerão toda a análise subsequente [26].

Na prática, muitos instrumentos de medição limitam artificialmente a banda de transmissão a fim de evitar o problema do *aliasing*. Há muitas maneiras de conseguir essa limitação artificial, sendo a mais comum através da escolha do diâmetro do sensor, uso de filtros analógicos, filtros digitais ou uma combinação desses. Uma vez que o sinal tem uma limitação de faixa, o critério de Nyquist pode ser usado e um intervalo de amostragem máximo pode ser obtido. No entanto, esse critério garante apenas que o sinal não estará afetado na frequência. Para que o sinal não esteja atenuado em sua amplitude outra condição deve ser atendida. Supondo que todos os comprimentos de onda menores do que 0,02% da curva gaussiana da transmissão do filtro podem ser ignorados, aplicando o teorema de Nyquist verifica-se que são necessários no mínimo 7 pontos por onda. Isso representa o número mínimo teórico de pontos da amostragem por revolução:

$$\text{Pontos por revolução} = \frac{\pi \cdot d}{0,114} \quad \text{Equação 7}$$

Onde d é o diâmetro do mensurando expresso em milímetros. A equação anterior corresponde a 7 pontos da amostra para um comprimento de amostragem $\lambda_{co} = 0,8$ milímetros, que é o número mínimo dos pontos a serem avaliados.

2.2.5 EFEITO DA FILTRAGEM MECÂNICA DEVIDO AO SENSOR

A geometria que toca a superfície a ser examinada, i.e. a geometria do sensor, tem grande influência na medição dos desvios de forma. O sensor funciona como um filtro passa-baixas não linear, com efeito dependente do comprimento e da amplitude da onda. Geralmente, pondera-se em utilizar o menor sensor possível para a obtenção da linha circunferencial extraída e eliminar os desvios de forma de alta frequência (rugosidade) por meio de filtros de perfil lineares.

Segundo o item 4.3.1 do projeto de norma ISO/FDIS 12181-2:2001(E) [25], a geometria do sensor deve ser escolhida pelo metrologista. O item 4.3.3 da mesma norma recomenda a utilização de um sensor com formato esférico teoricamente

perfeito. Pode-se estudar a influência do diâmetro do sensor, considerando que a superfície é uma curva seno com comprimentos e amplitudes de ondas bem definidas.

Para medições externas:

$$r = \left| \frac{\left(R - \frac{Wt}{2}\right)^2}{R - \frac{Wt}{2} \cdot (1 + n^2)} \right| \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

- r é o raio do sensor;
- Wt é a profundidade da onda;
- n é o número de ondas;
- R é o raio do objeto a ser medido (corpos cilíndricos).

No limite quando $R \gg Wt$,

$$r \rightarrow \left| \frac{2 \cdot R^2}{2 \cdot R - Wt \cdot n^2} \right| \quad \text{Equação 9}$$

Para medições internas:

$$r = \left| \frac{\left(R + \frac{Wt}{2}\right)^2}{R + \frac{Wt}{2} \cdot (1 + n^2)} \right| \quad \text{Equação 10}$$

No limite quando $R \gg Wt$,

$$r \rightarrow \left| \frac{2 \cdot R^2}{2 \cdot R + Wt \cdot n^2} \right| \quad \text{Equação 11}$$

Alternativamente o diâmetro do sensor pode ser encontrado através de gráficos como na figura 20 em que o diâmetro do sensor é escolhido em função do diâmetro interno do mensurando, frequência de corte e amplitude da onda, conforme VDI/VDE 2617-2.2 [27].

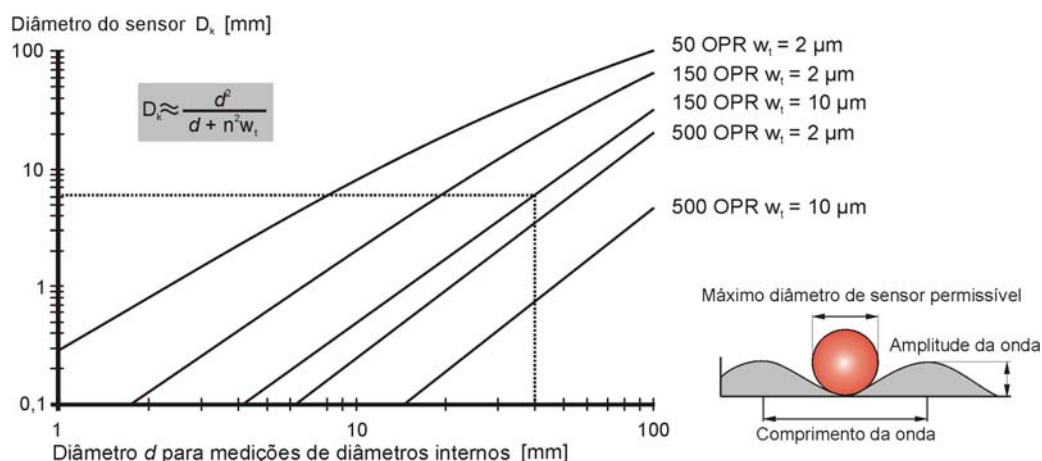


Figura 20: Influência do diâmetro do sensor (adaptado de [27]).

O projeto de norma ISO/FDIS 12181-2:2001(E) propõe utilizar um sensor com raio r de 0,5 mm para medição de círculos com diâmetro d até 4 mm, que corresponde ao máximo diâmetro que pode ser usado sem influenciar o filtro passa-baixas de 0,8 mm, [25]. Para diâmetros de peça menores, o raio do sensor é calculado segundo a equação 12.

$$r = \frac{\pi \cdot d}{24} \quad \text{Equação 12}$$

Cabe ressaltar que o valor de r ideal é o calculado com as equações detalhadas anteriormente. Contudo a determinação do valor de W/t não é trivial, de forma que segundo a ISO 12181-2, pode-se usar os valores informados na tabela 3 para obter medições sem efeito significativo de filtragem mecânica.

Tabela 3: Valores limites para relação $d:r$ e número mínimo de pontos.

Filtros Passa-Baixas		
Filtro transmitindo de 1 OPR até:	Número mínimo de pontos amostrados:	Mínima razão $d:r^{1)}$
15	105	5
50	350	15
150	1050	50
500	3500	150
1500	10500	500

1) A razão $d:r$ é a razão entre o diâmetro do círculo de referência e o raio r do sensor. Se a razão $d:r$ é menor que o valor apresentado, as altas frequências em OPR serão distorcidas pela influência do sensor.

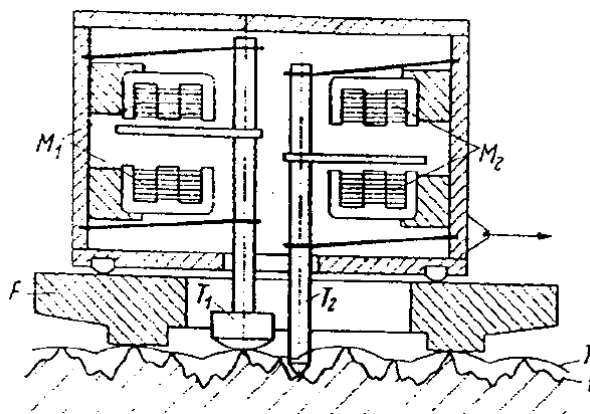
Assim, o filtro determina a faixa de sinais senoidais periódicos de OPR da característica incluída na avaliação da circularidade. A faixa é determinada pelos valores do exame da tabela 3 e também o número mínimo dos pontos da amostra a serem usados para extrair o perfil de circunferência e a relação mínima entre o diâmetro do mensurando e o raio do sensor ($d:r$) necessários para evitar a distorção excessiva do perfil de circularidade.

Porém, deve-se considerar que quando a MMC é usada para avaliar desvios de circularidade, usam-se geralmente sensores de diâmetros maiores que nas MMF. O motivo disso está no princípio de medição, que necessita de sensores de tamanho maior, bem como hastes maiores e mais rígidas. Por isso, deve-se escolher o máximo diâmetro possível do sensor, mas evitando a filtragem mecânica do perfil [28].

2.2.6 FILTRO MORFOLÓGICO

As linhas de referência possuem uma longa história e são de grande importância na medição de formas, porque os parâmetros e características do instrumento estão associados a elas. Schmalz considerou as linhas retas através dos vales mais profundos de forma que as irregularidades apareciam como picos, por isso se tornou usual falar em altura da irregularidade. Nicolau, um dos pioneiros no estudo da topografia, achou melhor usar uma linha sobre os picos, porque ele trabalhava com peças de acoplamento.

E. Von Weingraber idealizou e construiu um aparelho que simulava um raio percorrendo a superfície e o centro correspondia à linha média. Além disso, concentrou seus esforços no desenvolvimento do sistema de envelope (sistema E). A dificuldade era construir um equipamento onde dois elementos eram necessários: uma sapata esférica e um sensor movendo-se simultaneamente sobre a superfície. Um protótipo foi construído pelos assistentes de Weingraber, J. Häsing e G. Vogelpohl, para medir a rugosidade de rolamentos. Algumas empresas chegaram a comercializar esses instrumentos com algum sucesso. Esse equipamento era conhecido por "*Viertastergerät*" (aparelho de quatro apalpadores).



Legenda:

M_1 – transdutor linear de deslocamento 1;

M_2 – transdutor linear de deslocamento 2;

T_1 – sensor 1;

T_2 – sensor 2;

f – sapata;

h – perfil da superfície extraído com o sensor 1;

i – perfil da superfície extraído com o sensor 2.

Figura 21: “Viertastergerät” (aparelho de quatro apalpadores) [11].

O sistema E voltou a ser implementado recentemente em instrumentos e serviu de inspiração para o desenvolvimento dos “filtros morfológicos” por meio dos algoritmos de Minkowski [11].

O filtro morfológico é baseado no princípio de soma de Minkowski, que se refere à adição e subtração de Minkowski envolvendo objetos geométricos de qualquer dimensão, sendo os mesmos representados por um conjunto de dados. O filtro morfológico não se baseia no tratamento de um sinal elétrico senoidal (transformada de Fourier), mas sim na teoria de mistura.

Operações morfológicas são operações binárias que envolvem dois jogos de objetos geométricos (sensor e superfície real da peça), tendo por resultado um outro objeto geométrico, sendo a dilatação e erosão (linha circunferencial extraída) as primeiras operações morfológicas e o fechamento e a abertura as segundas operações morfológicas.

Dilatação – é a linha circunferencial extraída quando a superfície real é percorrida externamente pelo sensor. Caso o raio da esfera fosse zero, o perfil seria idêntico ao da superfície (figura 22, esquerda).

Erosão: é a linha circunferencial extraída quando a superfície real é percorrida internamente por um sensor (figura 22, direita).

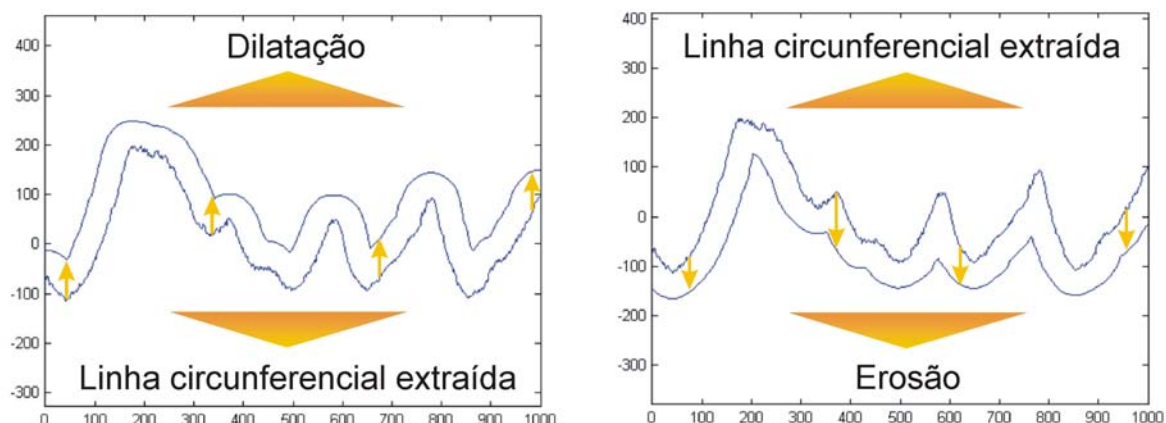


Figura 22: Dilatação e erosão (adaptado [26]).

Abertura: é obtida aplicando o filtro de erosão seguido pelo filtro de dilatação (figura 23, esquerda).

Fechamento: é obtido aplicando o filtro de dilatação seguido pelo filtro de erosão (figura 23, direita).

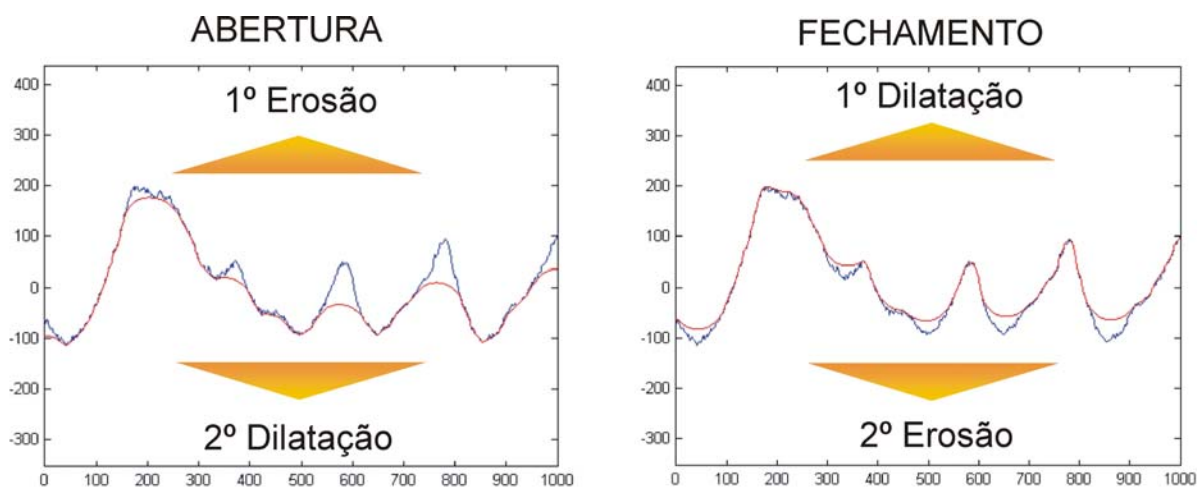


Figura 23: Filtro de abertura discreto (adaptado [26]).

Os filtros de dilatação e erosão somente funcionam sem perda de informação, se o raio da esfera for zero ou as curvaturas da superfície forem menores que a curvatura do sensor. Isto vale para todos os ângulos, caso contrário a reconstituição ficará distorcida. Os filtros morfológicos são de fácil implementação computacional [29].

Cabe destacar que não há nenhum teorema equivalente ao de Nyquist para operações morfológicas e filtros aplicados em dados amostrados. O que existe são teoremas para amostragem morfológica que limitam a quantidade de informações

perdidas. Isto é, para operações morfológicas e filtros, a amostragem precisa ser equidistante sob o risco de perda de informação e o intervalo de amostragem precisa ser menor que o raio do sensor. Para maiores detalhes sobre a amostragem e a reconstrução para operações morfológicas é necessário consultar o projeto de norma ISO/TS 16610-49 [30].

2.3 TECNOLOGIAS DE MEDIÇÃO DE DESVIOS DE CIRCULARIDADE

Antigamente o controle dos desvios de forma das peças era efetuado por métodos convencionais, como controle diametral, blocos em “V”, rotação entre centros, três pontos de contato, calibradores de confinamento diametral (um pino era confinado em um anel e girado com uma indicação de um relógio comparador). Porém, nenhum desses métodos conseguia realmente extrair o desvio de forma dos erros como o de batimento que se misturava ao resultado final da medição (figura 24).

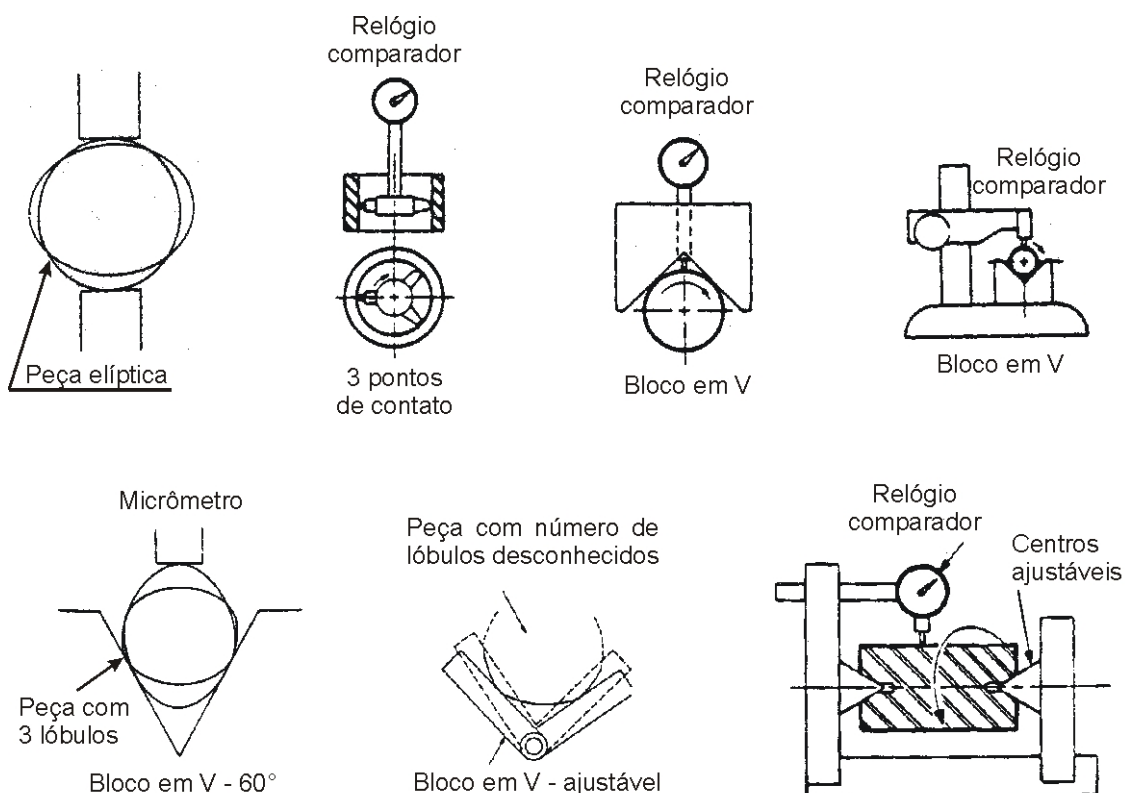


Figura 24: Métodos antigos para avaliar o desvio de forma.

Por volta de 1948 foi utilizada uma mesa divisora de precisão com um indicador de resolução $0,25 \mu\text{m}$, numa primeira tentativa de testar o conceito de medição de forma usado até hoje. A primeira solução dedicada para medição do desvio de circularidade foi baseada no conceito de um fuso contendo um eixo de rotação definido por uma linha passando através do centro de dois rolamentos esféricos trabalhados opticamente. Isso abriu caminho para construção de um instrumento mais prático, não tão sensível a mudanças de temperatura. Esse possuía um rolamento esférico em uma das extremidades e um cônico com ângulo bem pequeno na outra [13]. Com esse sistema, as primeiras máquinas de medir forma conseguiam medir circularidade, mas também planeza circular e concentricidade [15].

2.3.1 MÁQUINA DE MEDIR FORMA

Tradicionalmente, a circularidade é avaliada usando MMF, sistemas simples e robustos que consistem basicamente de um fuso de alta exatidão e um transdutor de deslocamento que controla a força de medição dentro de limites aceitáveis. As vantagens desta concepção são incontestáveis: elevada confiabilidade e boa exatidão. Dependendo do modelo, a MMF pode ser de transdutor estacionário e mesa giratória ou de mesa fixa e cabeçote giratório (figura 25), sendo este último modelo apropriado para peças maiores ou com projeções externas que dificultam sua rotação. Em todos os casos, o sensor é de pequeno diâmetro e faz contato com a peça em um único ponto da sua superfície. Os dados, na forma de coordenadas polares (r, θ) , são coletados seqüencialmente com intervalos angulares constantes. As MMF existentes permitem adquirir 3600 ou 7200 pontos por revolução.

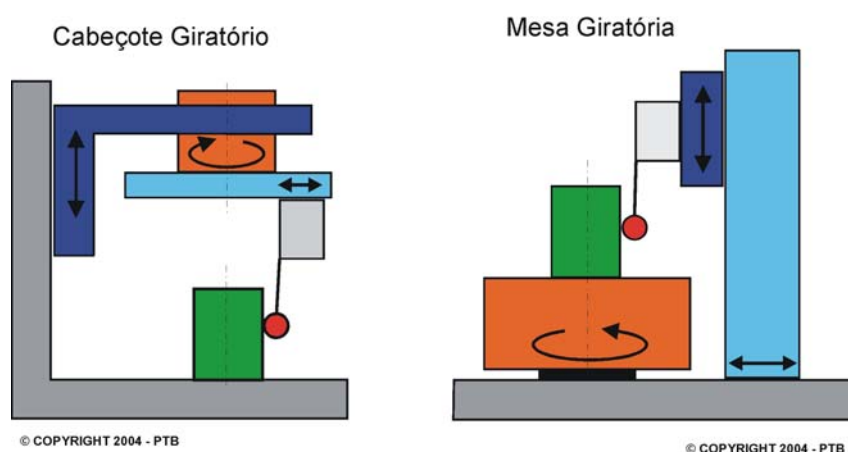


Figura 25: Princípios de funcionamento das máquinas de medir desvio de circularidade [4].

As principais desvantagens da medição de circularidade em MMF é a difícil integração ao processo produtivo, devido ao elevado tempo de *set up* (fixação e alinhamento da peça) e o elevado custo das MMF para controle de grandes geometrias.

2.3.2 MÁQUINA DE MEDIR POR COORDENADAS

As MMC são equipamentos de medição cujo funcionamento é baseado na medição ponto-a-ponto de uma peça através de apalpação de superfícies relevantes e a avaliação numérica das coordenadas medidas pelo equipamento de processamento de dados para formar uma geometria espacial completa da peça [31]. MMC são meios de medição utilizados no controle de qualidade de peças prismáticas, mas também de peças com geometrias de revolução e rodas dentadas. Devido a sua versatilidade, a MMC também pode ser utilizada para medições de forma e posição [32], [33]. As modernas MMC são capazes também de medir superfícies inclinadas no espaço – inacessíveis em máquinas de medir forma – podendo assim executar tarefas de medição de forma em peças com geometrias irregulares.

A primeira MMC foi desenvolvida pela empresa Ferranti, na Escócia, em meados de 1956. Essa máquina, de geometria cartesiana e acionamento manual, conseguia informar as posições (x, y, z) de características geométricas usando apalpadores cônicos para furos ou um microscópio óptico. Foi projetada para ter uma exatidão de 25 μm e possuía uma resolução de 12 μm [34].

Os principais subsistemas de uma MMC são (figura 26):

- estrutura mecânica: guias, mancais, eixos coordenados (cada um com sistema de medição de deslocamentos - escalas);
- unidade de controle: que controla os movimentos da MMC em seus comandos de posicionamento dentro de seu volume de trabalho, bem como o painel de operação, teclado de funções, manches (*joy-stick*) - para atuação direta do operador da MMC além dos sistemas de sensoreamento e compensação;
- computador e *software*: para calcular as dimensões da peça pelas coordenadas dos pontos apalpados bem como os equipamentos

periféricos como impressora, *ploter* - para representar os resultados de medição;

- sistema de apalpação: cabeçote apalpador e apalpadores para apalpar as peças em todas direções espaciais);
- ambiente: Local de instalação.

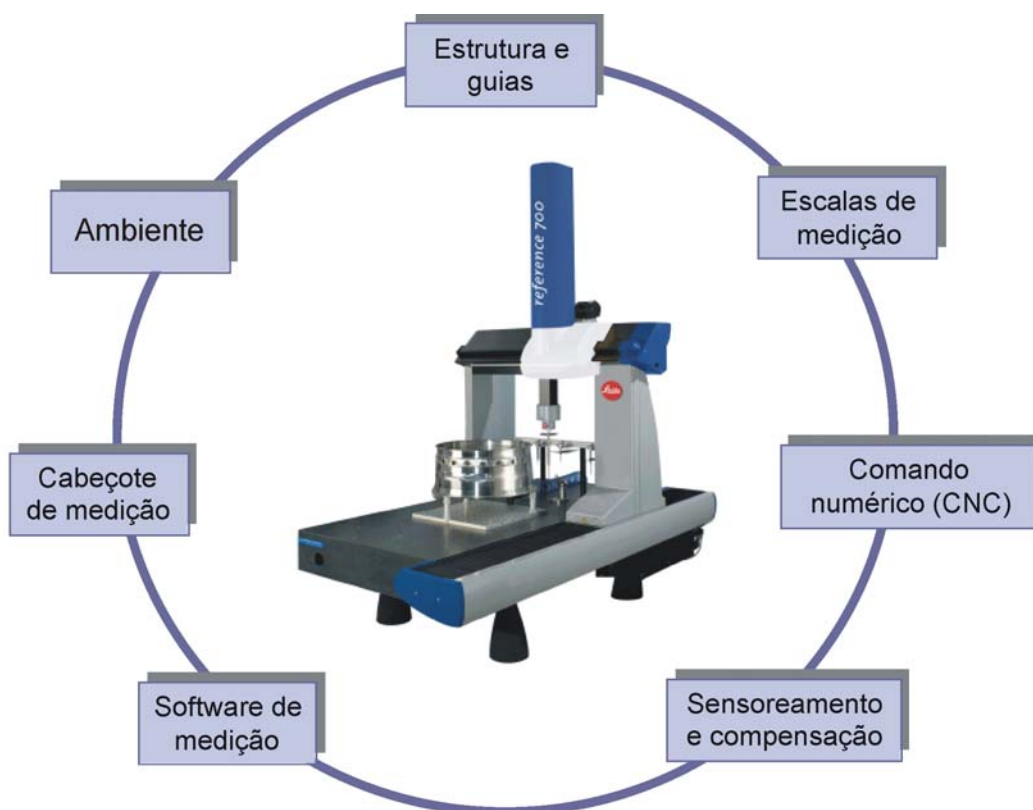


Figura 26: Subsistemas da MMC [34].

A seguir serão brevemente descritos os subsistemas que têm intervenção direta na medição de forma usando recursos de *scanning*.

2.3.2.1 ESTRUTURAS, GUIAS E ESCALAS

A estrutura mecânica consiste basicamente nas guias, colunas, mesa e sistemas de acionamento, transmissão e de deslocamento.

Os erros da estrutura da MMC, combinados aos erros das escalas, são classificados em três grupos: erros de rotação, translação e perpendicularidade. Os erros de rolamento (*roll*), guinamento (*pitch*) e tombamento (*yaw*). Os erros de translação, por sua vez, se dividem nos erros de posicionamento e retitude. São três os

erros de rotação e três os erros de translação por eixo da MMC, somando-se ao todo 18 erros para os três eixos da máquina. A esses, somam-se ainda os três erros de perpendicularidade entre os eixos, totalizando-se 21 componentes de erro [35], [37].

Esses erros podem ser minimizados por ajuste geométrico ou correção via *software*, a partir da verificação da geometria da MMC com um padrão de comprimento em algumas posições e orientações dentro do volume da máquina ou com padrões bidimensionais ou tridimensionais, usando procedimentos específicos. Entretanto, para a maioria das MMC apenas os erros de posicionamento e perpendicularidade são de fato periodicamente corrigidos. Os erros de rotação e retitude da máquina são minimizados geralmente ou pelo uso de guias de precisão ou pela correção via *software* em um ensaio mais refinado na instalação da máquina.

Mesmo após o ajuste de uma MMC, sempre existem erros residuais. O fabricante apenas garante que os erros para medição de comprimentos estão dentro dos limites especificados em contrato para determinadas condições ambientais e para um determinado cabeçote apalpador [36].

Contudo, deve-se compreender que os valores dos erros geométricos evidenciados na verificação geométrica de uma MMC são somente uma parcela dos erros geométricos que a mesma MMC apresentará quando usada para medir peças reais. O peso da peça pode produzir distorções na mesa, mudando as componentes de retitude e rotação da guia integrada à mesma. A aceleração da estrutura móvel durante a medição também causa deformações e movimentos de corpo rígido, devidas à elasticidade dos mancais e outras juntas na cadeia cinemática.

Os erros geométricos da MMC, qualquer seja sua origem, podem introduzir erros na medição de circularidade que não são fáceis de separar dos desvios próprios da geometria da peça, a menos que técnicas de inversão sejam usadas. A situação mais comum é que se produza um aumento do erro de circularidade informado, com referência ao valor do erro existente na peça. Porém, nem sempre a MMC fornecerá valores sobreestimados do valor do desvio de forma. De fato, poderia acontecer que um desvio de circularidade efetivamente existente no perfil da peça fosse parcialmente compensado por uma particular combinação dos erros geométricos das guias da MMC que intervêm na medição. Assim, é de crucial importância que os erros geométricos da MMC sejam convenientemente mapeados e corrigidos, ajustando fisicamente a posição

relativa das guias e usando os recursos de *software* disponíveis (conhecidos pela denominação genérica de CAA - *Computer Aided Accuracy*).

2.3.2.2 COMANDO NUMÉRICO E SISTEMAS DE SENSOREAMENTO E COMPENSAÇÃO

A posição do sensor dentro do volume da MMC pode ser controlada basicamente de três formas:

- manualmente: O operador posiciona e controla onde o sensor irá tocar a peça e é ele o responsável pelo controle da força de medição;
- *joystick*: O operador controla a posição do sensor por intermédio de manches;
- programa CNC: O operador elabora um programa de medição que é reproduzido pelos sistemas de monitoramento e controle mecaoptoeletrônicos da máquina.

A medição de desvios de forma usando recursos de *scanning* se insere principalmente no modo de medição CNC. Embora existam MMCs modernas que permitem a execução de *scanning* com controle manual da posição do sensor, os erros decorrentes da operação manual são relativamente altos e os resultados servem apenas como aproximações grosseiras se comparadas à medição em MMF.

O desenvolvimento de novos materiais com coeficientes de dilatação baixíssimos, novos sistemas de controle, a adoção de sistemas de sensoreamento e compensação de desvios por *software* cada vez mais apurados, visando à melhoria da exatidão e a sua manutenção em condições de operação variáveis, permitem que as MMC sejam inseridas diretamente nas células de manufatura.

Neste contexto, são de particular interesse os sistemas de compensação de erros de origem térmica. Sensores distribuídos nas escalas, na estrutura da máquina e também no objeto a medir permitem obter informações sobre as variações de temperatura em tempo real, viabilizando a utilização de modelos matemáticos cada vez mais complexos e efetivos. Isso tem ampliado consideravelmente a robustez das máquinas nas condições ambientais, diminuindo os custos de climatização e aumentando o conforto dos operadores. Assim, progressivamente, torna-se possível

realizar o ideal de “medir no local onde a peça é produzida”. Esses recursos permitiram elevar os níveis de exatidão, reduzindo paralelamente os requisitos sobre a geometria e os materiais constitutivos do *hardware* mecânico. Porém, deve-se compreender que esse relaxamento dos requisitos refere-se somente aos componentes sistemáticos de erro, originários de desvios das guias e escalas, não implicando permissividade alguma com relação ao erro de repetitividade, de comportamento randômico [34].

A medição de forma, por sua vez, forçou a existência de novas tecnologias de controle. Para que a MMC pudesse capturar os dados, controlar a força, velocidade de medição e o percurso, o controle recebeu potentes processadores. Por exemplo, durante a medição de um círculo com 4000 pontos aproximadamente iguais em uma MMF, os dados precisam ser armazenados sem interferir na medição, em seguida um potente transmissor de dados em paralelo envia os mesmos para os cálculos e finalmente disponibiliza-os. Um banco de dados rápido utiliza um tempo de medição menor que 60 s para mais de mil pontos [38].

O controle é também responsável pelo controle da velocidade de medição que no caso de medição de circularidade é determinada de forma que a velocidade resultante da combinação das velocidades dos eixos acionados durante a medição seja igual ao valor predefinido pelo operador.

2.3.2.3 SOFTWARE DE MEDIÇÃO

Dentre os subsistemas das MMC, merece especial destaque a evolução dos *softwares* de medição. A programação da tarefa de medição e a verificação da viabilidade geométrica do programa podem ser efetuadas “*off line*”, a partir do modelo sólido da peça gerado por um sistema CAD, poupando tempo de máquina e aumentando a confiabilidade e segurança na execução das medições. A preparação e programa podem hoje em dia ser feitos através da inserção do desenho em CAD da peça a ser controlada ou então o programa de medição pode ser feito em um segundo computador e depois exportado para a máquina. Para medições em séries, os *softwares* permitem que sejam feitos estudos estatísticos, tais como o controle estatístico de processos e os estudos de capacidade de processo [34].

Softwares modernos permitem realizar medições consistentes com a maioria das especificações geométricas de produto segundo norma ISO 1101 e ASME Y14.5. O *software* permite que os filtros, algoritmos de ajuste, gráficos possam ser escolhidos

de forma que os resultados obtidos com uma MMC sejam comparáveis com as MMF [34], [38]. O software de avaliação é composto por módulos que possibilitam a eliminação de pontos atípicos, a aplicação de um filtro para eliminar frequências que não são interessantes para uma determinada avaliação de circularidade e a aplicação de métodos de análise para o cálculo da posição do centro e do raio de um círculo de referência.

O primeiro módulo de tratamento dos dados é relativo à eliminação de pontos atípicos que são áreas do perfil que devem ser atribuídas, não à peça, mas sim às impurezas, vibrações e descolamento do sensor, que podem ser automaticamente identificados e excluídos da avaliação. Isso é feito através de janelas com alturas e larguras pré-definidas ou quando a distância entre o ponto atípico e o elemento médio ajustado exceder um valor limite estabelecido. Isso não será tratado nesta dissertação.

Um segundo módulo ajusta os pontos medidos a uma geometria ideal, para que os desvios de forma possam ser quantificados. Os elementos geométricos reais são imperfeitos e afastam-se da forma geométrica ideal, por isso são indispensáveis métodos de análise para cálculo do círculo de referência.

Além dos algoritmos de ajuste, são utilizados filtros para a eliminação de ruídos e separação das parcelas de forma, ondulação e rugosidade. Contudo, para uma dada frequência de corte, eles podem transmitir com distorção alguns componentes de rugosidade e ondulação que deveriam ter sido eliminados [25]. Para a filtragem de sinais digitais, a literatura fornece diferentes métodos que apesar de serem implementados de diversas formas, devem chegar ao mesmo resultado, desde que sejam aplicados corretamente [21].

As MMC utilizam como método de análise *default*, por razões de caráter operacional e histórico o círculo de referência por LSCI e RONT [39]. Apesar de o método não oferecer resultados de avaliação de circularidade que sejam consistentes com o Anexo B da norma ISO 1101, ele é computacionalmente mais rápido e fornece ajustes mais robustos à presença de dados atípicos que o método MZCI.

Para medição da circularidade são necessários alguns dados que devem ser informados ao *software*, como:

- posição do centro do círculo;
- diâmetro;

- ângulo inicial;
- ângulo total;
- velocidade de *scanning*;
- distância entre dois pontos consecutivos.

Também para o modo *scanning* novas possibilidades e funções do *software* de avaliação estão disponíveis. Assistentes de *software* para otimização da velocidade de *scanning* estão sendo implementados, ajudando na definição da melhor velocidade em função da tolerância, geometria do sensor, e do tipo de máquina [32].

2.3.2.4 AMBIENTE

Adicionalmente, as MMC usadas em tarefas de medição de forma deveriam estar em ambientes bem controlados no que diz respeito às vibrações e à temperatura. Em particular, gradientes de temperatura espaciais e temporais podem produzir dilatações diferenciais na MMC e mesmo no objeto medido, induzindo erros de difícil correção.

2.3.2.5 CABEÇOTE DE MEDIÇÃO

Durante muitos anos os cabeçotes das MMC eram fixos. O sensor tocava a peça e o registro dos dados era feito manualmente ou através de um gatilho ou pedal. A leitura era feita primeiramente direto nas escalas que possuíam nônio ou posteriormente em dispositivos mostradores. Um problema existente neste tipo de cabeçote era a variação da força de medição, controlada pelo operador. Esse problema foi amenizado com a mudança do apalpador convencional para o princípio do cabeçote de medir ligador.

O cabeçote de medir ligador (figura 27) é impróprio para o *scanning*, no sentido em que esse é tratado nesta dissertação. Ele não permite que dados sejam adquiridos continuamente sem separar o apalpador da peça e isso faz com que a MMC acelere e desacelere para adquirir cada ponto, aumentando assim a incerteza [38]. Esse princípio de medição se assemelha a uma máquina de costurar com aceleração e freagem. Além disso, no modo de medição ponto-a-ponto o tempo necessário para coletar uma

quantidade de dados similar à coletada pelas MMF é proibitivamente longo, devido ao complicado percurso do apalpador em cada toque.

Micro-chaves

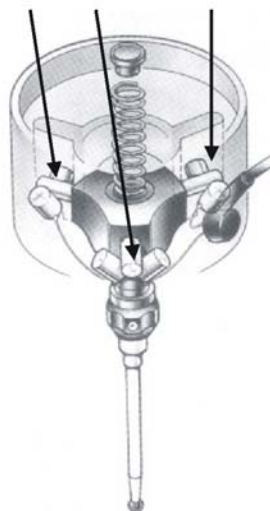


Figura 27: Cabeçote ligador [40].

Assim, esse princípio de medição somado ao fato do controle e o computador não serem projetados para uma grande quantidade de pontos, fazia com que o tempo de medição ainda fosse muito grande. Como a informação de poucos pontos de medição já não era suficiente para o controle de forma, posição e dimensão, novas tecnologias para cabeçotes de medição foram desenvolvidas [39].

Na década dos 70' surgiu o cabeçote medidor, que tornou possível adquirir um número maior de pontos de uma superfície. Nos primeiros cabeçotes, a força de medição não atuava perpendicularmente à superfície da peça, introduzindo erros cuja intensidade e direção dependia do ponto da trajetória. Isso levou ao surgimento de uma nova geração de cabeçotes de medição capazes de aplicar uma força constante e com direção normal à superfície a ser medida, independente da disposição do mensurando no volume da máquina, possibilitando uma medição por *scanning* mais apurada.

Existem basicamente dois princípios de funcionamento de cabeçotes medidores:

Os cabeçotes medidores analógicos passivos (figura 28) são os mais simples, pois não possuem motores no cabeçote, apenas transdutores indutivos que medem a deflexão das molas. Os 3 eixos da MMC controlam a posição do cabeçote de forma que mesmo em altas velocidades de medição, e.g. de 300 mm/s, as deflexões das

molares sejam pequenas (dentro de 0,1 mm). Um cabeçote de medição passivo produz forças controladas unicamente pela ação de molas [41]. A correção de flexão do apalpador é obtida durante o processo de qualificação. Os dados da calibração são compensados através de um polinômio de 3º grau [42].

Como já foi antecipado no item 2.3.2.1, os erros dinâmicos são devidos ao projeto da MMC, à sua condição, bem como à tarefa de medição e são difíceis de serem identificados e eliminados [43]. Alguns sistemas passivos aplicam um método de compensação que consiste em medir cada característica duas vezes, primeiramente com baixa velocidade de medição e segundo com alta velocidade. Após as medições, são realizadas correções através de um mapa de erros dinâmicos. O controlador VCC, como foi patenteado, foi criado para medições com altas velocidades com a exatidão de velocidades baixas [44]. Com esse método o erro de medição para uma velocidade de 100 mm/s é reduzido de 8 µm para aproximadamente 2,5 µm, muito próximo a performance de 10 mm/s [45].

Embora seja afirmado que esses tipos de cabeçotes não produzem calor, uma análise mais detalhada sobre a especificação dos mesmos prova o contrário. Por exemplo, um único cabeçote de medição passiva consome 500 mW de energia para a sua eletrônica interna. Isso altera a temperatura local em torno de 1°C e que resulta em 2 µm de expansão, afetando diretamente os resultados, desde que não haja compensação da temperatura [41].

MMC com cabeçotes de medição passivos requerem controladores de trajeto muito exatos e rápidos, para que as deflexões das molas fiquem em torno do valor nominal limite o que não é nada fácil em função do tamanho e massa das MMC. Essa é a única possibilidade de limitação da força de medição deste tipo de cabeçote de medição.

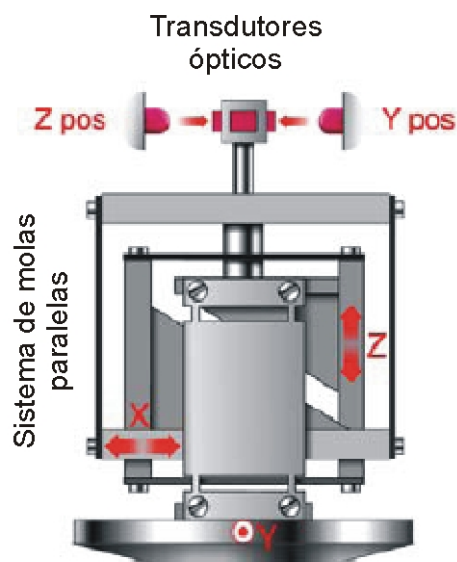


Figura 28: Cabeçote medidor passivo [46].

O cabeçote de medição ativo é uma mini MMC, com motores lineares de posicionamento para controle da posição do sensor. Esses motores controlam a deflexão do apalpador e modulam a força de medição aplicada em cada direção [42].

A empresa Carl Zeiss vem oferecendo desde 1975 um variado número de cabeçotes medidores ativos.



Figura 29: Evolução dos cabeçotes medidores analógicos ativos (adaptado de [47] e [48]).

Em 1994 foi apresentado o cabeçote VAST, que passou pelos processos evolutivos até o dia de hoje com o VAST XT. Apenas a Carl Zeiss possui a tecnologia de cabeçotes de medição ativos. Um cabeçote de medição ativo produz forças

constantes através de uma eletrônica associada. A força de medição é alterada diretamente através de atuadores eletromagnéticos no cabeçote. Também existe um controlador da força centrífuga. Esses sistemas estão patenteados pelo fabricante dos cabeçotes medidores ativos e são chamados comercialmente de Navigator. Segundo o fabricante, o sistema Navigator substitui o método da compensação, utilizado pelos fabricantes de cabeçotes medidores passivos, diminuindo consideravelmente o tempo de medição.

Todos os cabeçotes de medição possuem uma temperatura interna e fontes de calor que podem influenciar no resultado da medição. No entanto, nos cabeçotes medidores ativos a eletrônica está localizada no controle e não no cabeçote de medição. Contudo, há motores internos no cabeçote que são utilizados para o contrapeso, acionados apenas por dois segundos quando o apalpador é fixado e depois da aplicação. Os geradores de força de medição patenteados são bobinas móveis (lineares e não equipamentos convencionais). Eles produzem calor, mas qualquer expansão é compensada, já que a medição da temperatura é efetuada através de sensores internos.

As MMC com seu moderno conceito de movimentação podem hoje atingir velocidades de medição entre 0,01 mm/s e 300 mm/s. Em particular, o sistema Navigator da Zeiss permite definir um caminho de medição em hélice, de forma tal que o apalpador não precisa parar antes de entrar em contato com a peça, amenizando os efeitos da força dinâmica causadas pela alta velocidade (figura 30).

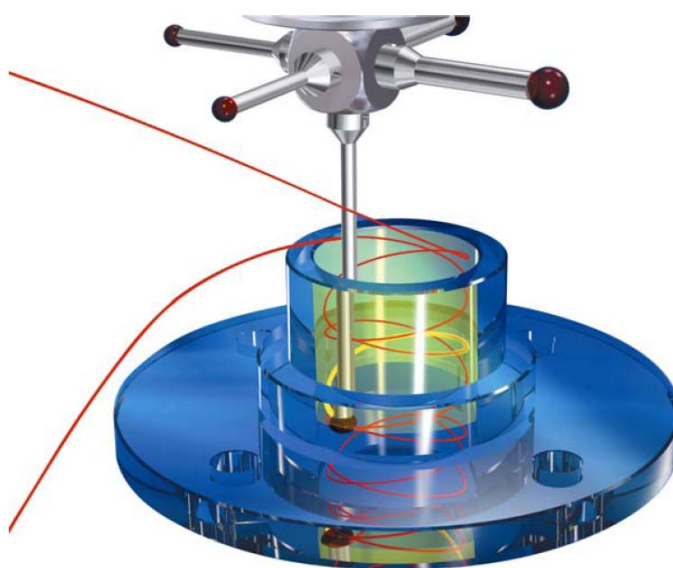


Figura 30: Estratégia de aproximação e afastamento em hélice [41].

As altas velocidades de medição e movimentação provocam uma deformação no apalpador e na geometria da MMC, ocasionando desvios de medição. O sistema Navigator permite, adicionalmente, compensar influências dinâmicas através de um sistema patenteado como D-CAA (Dinamischen Biege CAA), compensação dinâmica da flexão da MMC. A deformação da haste do apalpador pode ser compensada através da qualificação, onde é feito um mapa dinâmico da flexão do apalpador, utilizado durante o processo de medição para corrigir as medições [32].

Outro recurso que permite uma melhor inserção das MMC no ambiente fabril é que a troca do apalpador pode ser feita sem a necessidade de uma re-qualificação, o que minimiza consideravelmente o tempo de medição [32].

2.4 SCANNING

Na medição de circularidade por *scanning* o sensor permanece em contato com a superfície da peça enquanto se desloca ao longo de uma trajetória pré-definida. Durante esse percurso, dados que descrevem a geometria do objeto são seqüencialmente coletados na forma de coordenadas cartesianas (x, y, z). Como resultado desse modo de operação, é possível adquirir um número muito elevado de pontos em curto espaço de tempo. Medir com poucos pontos pode trazer sérios riscos, como pode ser visto na figura 31, onde a medição com 4 pontos em posições angulares diferentes poderia gerar distintos valores de erro de circularidade [38]. Pode-se notar ainda que a posição do centro é fortemente influenciada pelo algoritmo de ajuste utilizado para criar o círculo de referência.

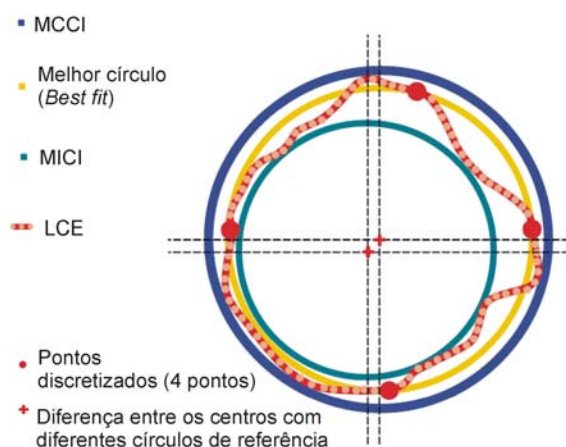


Figura 31: Comparação entre a medição com poucos pontos e modo *scanning* [41], [49].

Na modalidade *scanning*, as MMC modernas podem adquirir as coordenadas de um grande número de pontos ao longo de uma trajetória circular (e.g. 75000 em 360°). Deste modo, é possível alcançar um conhecimento mais apurado da superfície da peça, reduzindo a contribuição à incerteza decorrente das limitações de amostragem. Adicionalmente, a elevada quantidade de pontos por revolução que podem ser adquiridos com uma MMC permite reduzir a distância entre pontos na avaliação de grandes características.

Para uma incerteza de apalpação constante de um elemento geométrico, é vantajosa sob o ponto de vista estatístico, a captação de muitos pontos e o respectivo processamento. Partindo-se desta premissa, o processo de *scanning* deveria ser, em todos os casos, uma solução melhor que a apalpação discreta de pontos (figura 32).

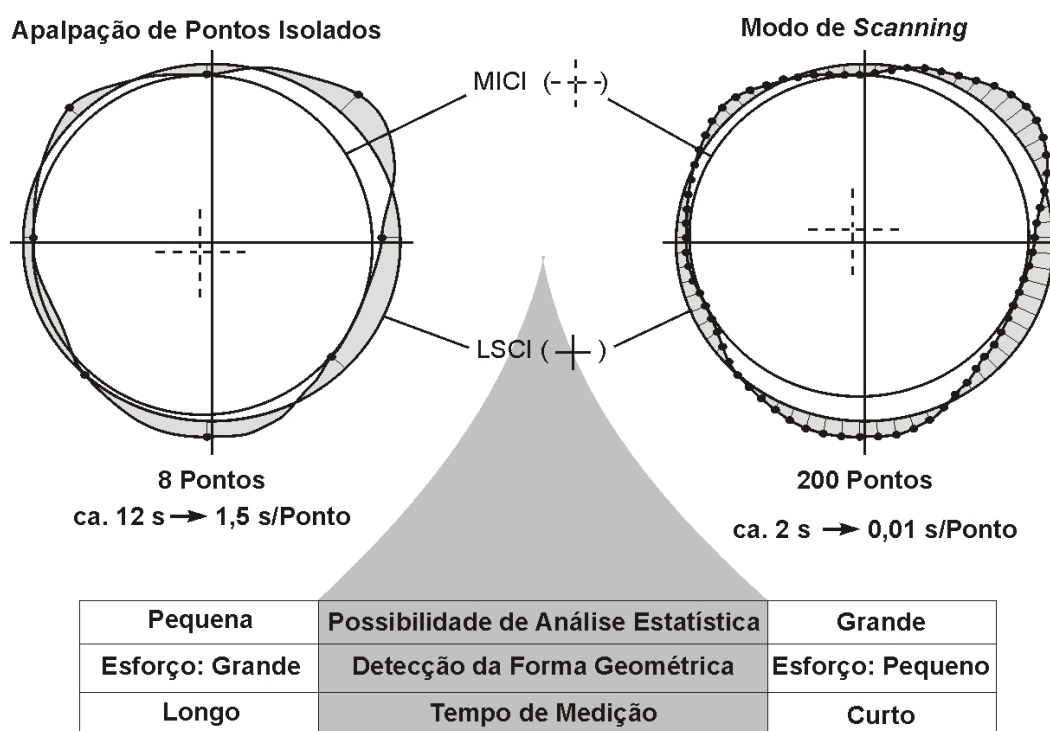


Figura 32: Comparação da medição por pontos e modo *scanning*.

Existem, no entanto uma série de fatores de influência, que podem gerar efeitos negativos na incerteza operante na aquisição de cada ponto na modalidade *scanning*. Estes fatores de influência, mormente relativos ao comportamento dinâmico da máquina e ao comportamento tribológico da interface sensor-peça, não aparecem com a mesma forma e intensidade na apalpação discreta de pontos. Em função da grande quantidade de pontos medidos no processo *scanning* torna-se também relevante a

forma adotada para o processamento dos dados (filtros, eliminação de dados atípicos etc.).

As incertezas que surgem adicionalmente, em relação à medição discreta de pontos, devem-se prioritariamente ao atrito tangencial superficial entre os elementos em contato, i.e. sensor e objeto a medir (figura 33, esquerda). Isso pode, entre outros, levar a forças de apalpação variáveis ou ainda produzir saltos micrométricos do sensor, afastando-o da superfície da peça em certas regiões do percurso de medição. Outros fatores, tais como o tipo de contorno (interno ou externo), a velocidade de *scanning*, a força de contato e a posição da peça no volume da MMC também são fontes de influência. No gráfico da direita da figura 33 pode se observar os resultados de medições comparativas de dois objetos de teste cilíndricos realizadas em uma MMC, mostrando uma visível dependência do desvio de forma detectado com a força de medição e a qualidade da superfície da peça [7].

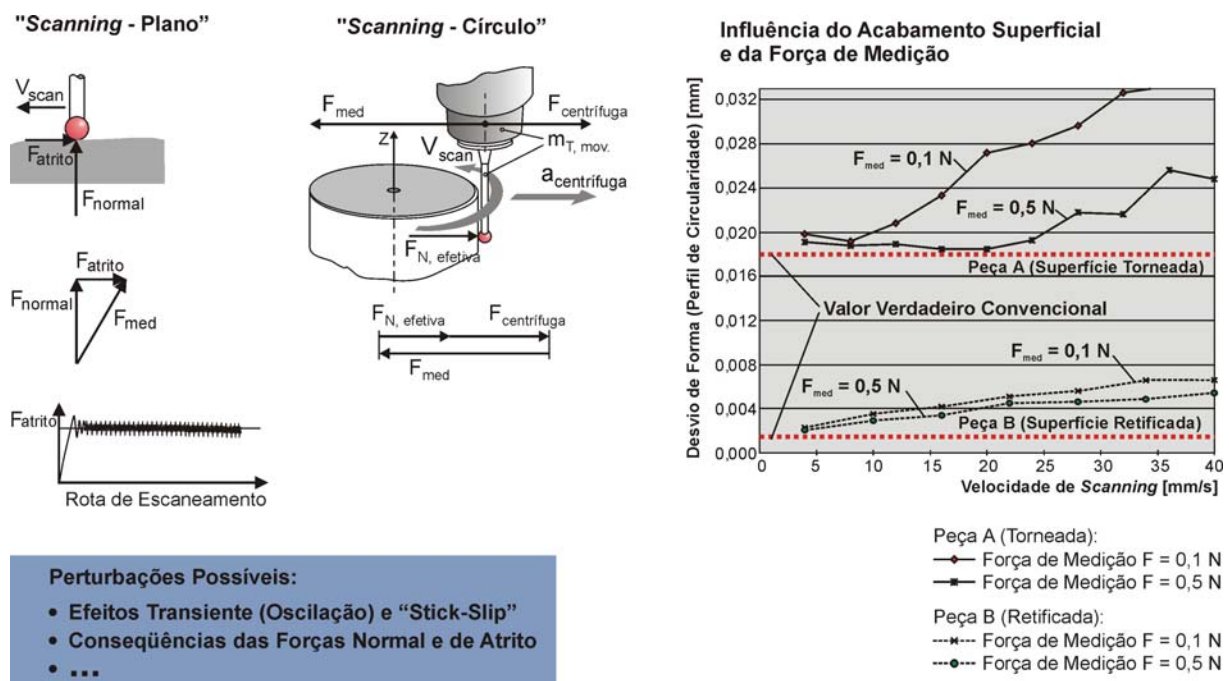


Figura 33: Importância da força, velocidade de medição e do acabamento superficial (adaptado de [7]).

Outro problema comum na técnica de *scanning* é a deposição do material da peça no sensor quando ambos são do mesmo material, ou seja, possuem afinidade química. Em particular, sensores de rubi não devem ser usados para medir por *scanning* em peças de alumínio, pois a afinidade química entre os dois materiais causa deposição de material da peça sobre o sensor. Para diminuir esse problema existem produtos químicos especiais que retiram a crosta do material da peça [35]. Também

existem produtos que diminuem o atrito entre o sensor e a peça, oferecidos pelos próprios fabricantes de sensores de medição. Recomenda-se que os sensores usados na medição de desvios de circularidade sejam analisados periodicamente com auxílio de uma lupa e limpados ou substituídos sempre que se considere imprescindível.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os equipamentos, acessórios e padrões utilizados na obtenção dos dados experimentais, bem como os algoritmos usados no seu processamento e o planejamento das medições executadas no WZL, RWTH – Aachen e na Fundação CERTI/Labmetro.

3.1 O MODELO DE AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS

Para fins da pesquisa, adotou-se o modelo de aquisição e processamento de dados mostrado na figura 34. A superfície real é discretizada em função da distância entre pontos selecionada no paralelogramo “Parâmetros”. Essa superfície gera uma primeira imagem do perfil, distorcida pela filtragem mecânica, em função do diâmetro do sensor escolhido. A seguir, essa primeira imagem do perfil é influenciada pelos erros da estrutura da máquina e os efeitos cinemáticos e dinâmicos, os quais podem amplificar, atenuar ou distorcer a fase do sinal de entrada segundo uma certa função de transferência. Por fim a esse perfil já distorcido é acrescentado um ruído genérico, proveniente de diversas causas de variação de difícil identificação e separação. O resultado final do bloco de aquisição é um conjunto de dados brutos que constituem a denominada linha circunferencial extraída, definida de forma discreta a partir da interseção entre a superfície da característica e o plano de *scanning* ou plano de circularidade.

Após sua aquisição, os dados que descrevem a linha circunferencial extraída precisam de um pós-processamento para a obtenção do perfil de circularidade, a partir do qual se calculam os diversos parâmetros de circularidade. Nessa transformação atuam três tipos básicos de operações matemáticas: a eliminação de dados atípicos ou *outliers*, o cálculo da posição do centro e do raio de um círculo de referência e a

aplicação de um filtro para eliminar frequências que não são interessantes para uma determinada avaliação de circularidade.

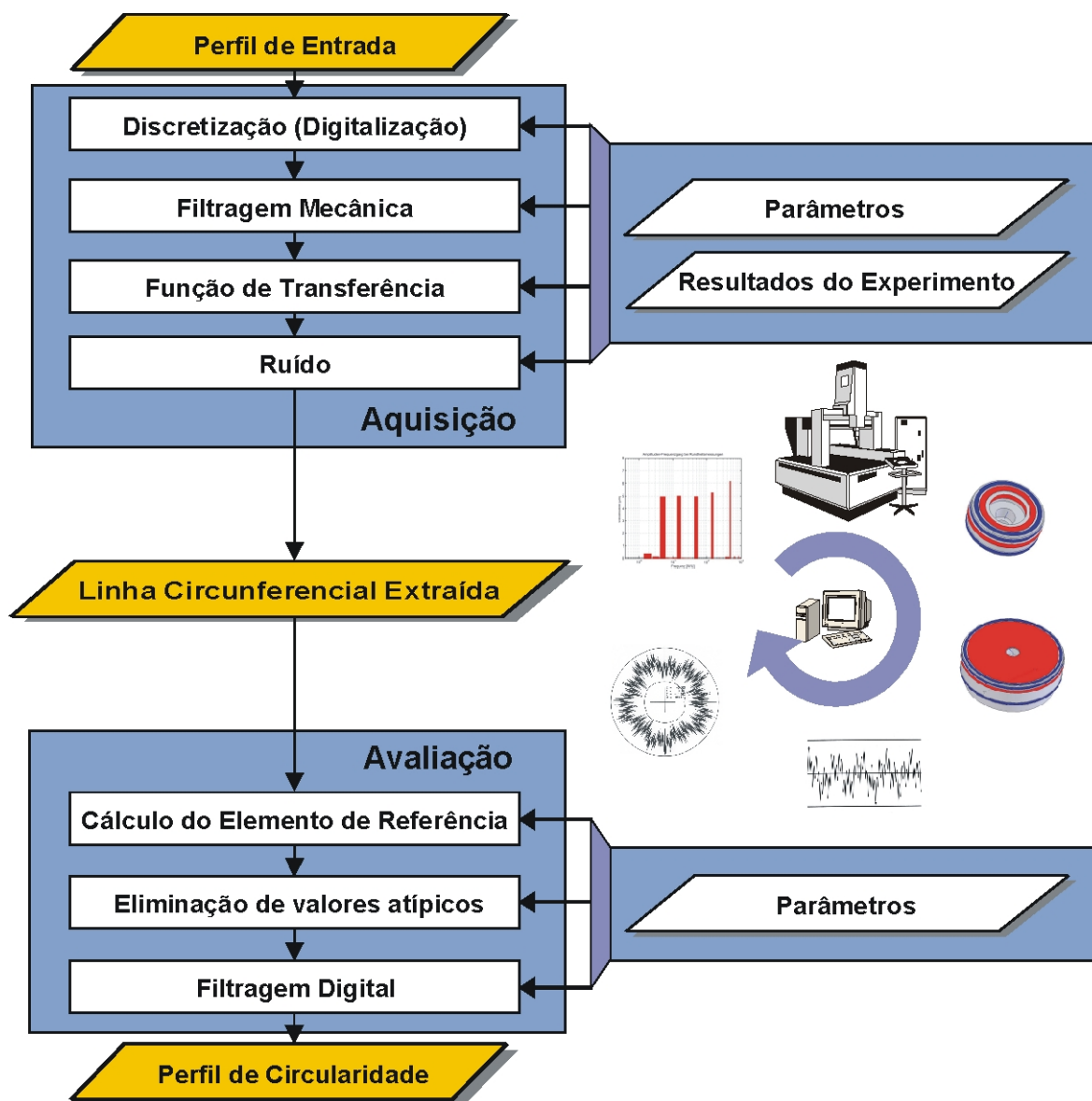


Figura 34: Modelo de aquisição e processamento de dados (adaptado de [7]).

Os algoritmos matemáticos que operam na etapa de avaliação também possuem parâmetros cujos valores devem ser definidos durante o planejamento da medição. Se esse planejamento não for realizado corretamente, pode acontecer que o perfil de circularidade obtido não descreva efetivamente os desvios de circularidade da peça.

3.2 OS PADRÕES

A norma VDI/VDE 2617 parte 2.2 [27] especifica alguns artefatos que podem ser utilizados para a verificação do erro de forma em MMC, tais como anéis lisos cilíndricos, cilindros e esferas padrão, *flick standard*, planos ópticos e padrões de múltiplas ondas. As suas características deveriam ser: fácil fixação, estabilidade dimensional, possibilidade de medição em todas as posições e direções num espaço 3D, aplicabilidade em medições internas e externas, facilidade de operação e montagem para testes rápidos, proteção contra o calor das mãos, estabilidade térmica a longo prazo e baixo custo de fabricação.

Originalmente esses padrões foram desenvolvidos para utilização em MMF e a sua utilização foi adaptada posteriormente para MMC. Para garantir a análise metrológica das características de transferência dos elementos da cadeia do processo de medição em MMC foi necessário desenvolver padrões de referência adequados, assim como estabelecer os respectivos conceitos de calibração.

Os artefatos usados nesta pesquisa aplicam o conceito do padrão de múltiplas ondas, originalmente desenvolvido no PTB (*Physikalisch-Technische Bundesanstalt*), laboratório nacional da Alemanha, com o intuito de melhorar a calibração de instrumentos de medição de forma [50]. Esses artefatos foram desenvolvidos no Laboratório de Máquinas-ferramentas da Universidade Técnica de Aachen, de acordo com a norma VDI 2221 [51] e fabricados no Instituto Fraunhofer de Tecnologia de Produção, na Alemanha. São denominados de “Kombi – MWN” (Padrão de múltiplas ondas combinado) e foram construídos em uma liga de Alumínio, ALMg4,5Mn, em um torno de ultraprecisão com *Fast-Tool-Servo-System* piezelétrico. As etapas do processo de fabricação foram as seguintes: torneamento, controle geométrico, revestimento químico, controle geométrico, usinagem de precisão, teste e calibração.

A escolha dos diâmetros e das profundidades de onda foram feitas através de um filtro morfológico com sinal simulado, de forma que o diâmetro de sensor a usar nas medições não produzisse distorções significativas. Os artefatos disponíveis permitem realizar medições de retitude, planeza circular, circularidade externa e interna (ver superfícies em vermelho na figura 35). Provêm também superfícies cilíndricas e planas destinadas unicamente para o alinhamento do mesmo na MMC (ver superfícies em azul na figura 35).

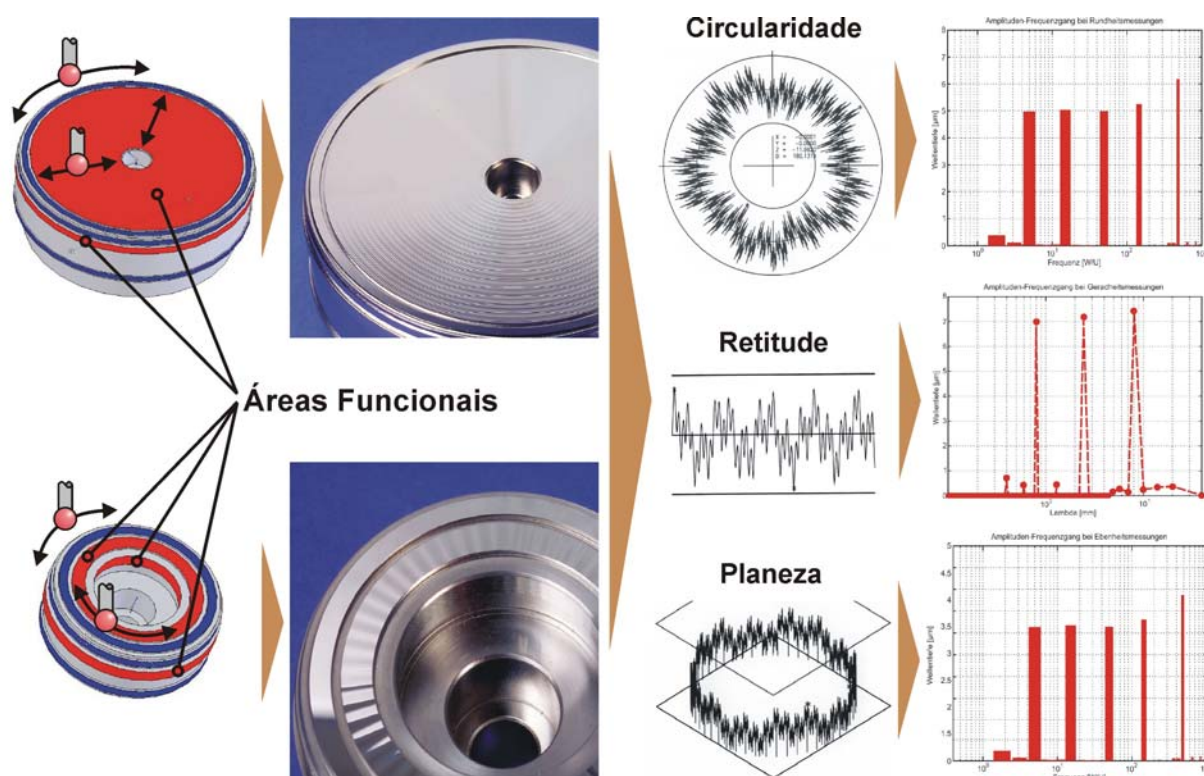


Figura 35: Padrão de múltiplas ondas utilizado na pesquisa, seu perfil não filtrado e o gráfico de amplitudes versus freqüências, obtido aplicando a Transformada Rápida de Fourier (adaptado de [7]).

Foram construídos ao todo dois artefatos com as características mostradas nas tabelas 4 e 5:

Tabela 4: Características construtivas do KOMBI – MWN 1

Kombi - MWN 1			
Funções da superfície	Cilindro externo	Cilindro interno	Plano
Diâmetro [mm]	80	40	-
Número máximo de ondas [OPR]	500	500	500
Máxima amplitude de onda [mm]	0,004	0,004	0,004
Máximo diâmetro do sensor (VDI) [mm]	7,0	1,5	2,9
Máximo diâmetro do sensor (filtragem morfológica) [mm]	-	1,5	2,5

Com o padrão Kombi – MWN 1 é possível o estudo do perfil de circularidade para contornos externo e interno e da planeza circular.

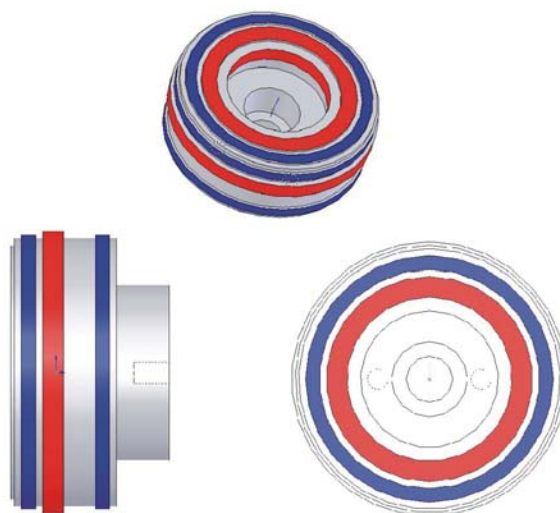


Figura 36: KOMBİ – MWN 1 (adaptado de [3]).

Tabela 5: Características construtivas do KOMBİ – MWN 2

Kombi- MWN 2		
Funções da superfície	Cilindro	Plano
Diâmetro [mm]	180	-
Máximo número de ondas [OPR]/ Comprimento de onda mínimo [mm]	500	0,8
Máxima profundidade de onda [mm]	0,006	0,006
Máximo diâmetro do sensor (VDI) [mm]	24,5	10,8
Máximo diâmetro do sensor (filtragem morfológica) [mm]	-	-

Com o padrão Kombi – MWN 2 é possível o estudo do perfil de circularidade para contorno externo e retitude na direção radial da face.

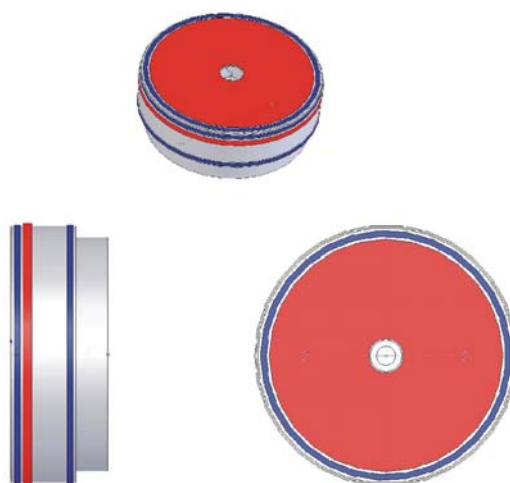


Figura 37: KOMBİ – MWN 2 (adaptado de [3]).

3.2.1 CALIBRAÇÃO DOS PADRÕES

Os padrões foram calibrados em uma máquina de medir forma MFU 7 da empresa Mahr, pertencente ao Laboratório de Máquinas-ferramentas da Universidade Técnica de Aachen. Os certificados de calibração dos padrões encontram-se no ANEXO 1 e ANEXO 2.

A seguir são informados os valores verdadeiros convencionais da amplitude total pico-vale para diferentes frequências de corte do filtro do padrão Kombi – MWN 1:

Frequência de corte do filtro (OPR)	15	50	150	500	1500
Amplitude total (μm)	3,5	6,4	8,8	11,7	13,5

Os valores verdadeiros convencionais das amplitudes de cada uma das componentes de onda existentes do padrão Kombi – MWN 1 são os seguintes:

Frequência da componente (OPR)	5	15	50	150	500
Amplitude (μm)	3,3	3,4	3,4	3,6	3,4

Da mesma forma são informados os valores verdadeiros convencionais da amplitude total pico-vale para diferentes frequências de corte do filtro do padrão Kombi – MWN 2:

Frequência de corte do filtro (OPR)	15	50	150	500	1500
Amplitude total (μm)	5,1	9,3	12,5	17,0	19,8

Os valores verdadeiros convencionais das amplitudes de cada uma das componentes de onda existentes do padrão Kombi – MWN 2 são os seguintes:

Frequência da componente (OPR)	5	15	50	150	500
Amplitude (μm)	4,9	4,9	4,8	5,0	5,4

3.3 MMC UTILIZADAS

As medições do WZL, RWTH – Aachen foram realizadas em uma MMC da marca ZEISS, modelo UPMC 850 CARAT, com as seguintes características:

Tabela 6: Características da MMC do WZL RWTH – Aachen.

Máxima variação de temperatura	0,5 K/h, 0,5 K/dia
Máximo gradiente de temperatura admissível	0,5 K/m
Faixas de medição (x, y, z)	850 mm, 1150 mm, 600 mm
Massa	4000 kg
Máxima massa da peça admissível	1500 kg
Incerteza de medição para comprimento segundo VDI/VDE 2617	$u1 = (0,5 + L/900) \mu\text{m}$ $u3 = (0,8 + L/600) \mu\text{m}$
Incerteza de apalpação	$V2 = 0,9 \mu\text{m}$ (com haste de 100 mm de comprimento, procedimento de <i>Scanning</i> segundo ISO 10360-4 [52])
Material das escalas, Resolução	Zerodur, 0,1 μm

As medições da Fundação CERTI foram realizadas no Laboratório de Metrologia do CMI – Centro de Metrologia e Instrumentação, em uma MMC por coordenadas da marca ZEISS, modelo ZMC 550 CAA, tipo portal com uma mesa rotativa inserida no desempenho, a qual não foi utilizada neste trabalho. A seguir as características dessa MMC:

Tabela 7: Características da MMC do CMI.

Máxima variação de temperatura	0,5 K/h, 1,0 K/dia
Máximo gradiente de temperatura admissível	0,5 K/m
Faixas de medição (x, y, z)	550 mm, 500 mm, 450 mm
Massa	1600 kg
Máxima massa da peça admissível	600 kg (mesa de granito), 150 kg (mesa rotativa)
Incerteza de medição para comprimento segundo VDI/VDE 2617	$u1 = (1,0 + 2,5.L/1000), \mu\text{m}$, L em mm $u3 = (1,4 + 3,5.L/1000) \mu\text{m}$, L em mm para comprimentos até 500 mm
Incerteza de apalpação	$V2 = 0,6 \mu\text{m}$ (com haste de 100 mm de comprimento, ensaio segundo VDI/VDE 2617)
Material das escalas, Resolução	Cristal, 0,1 μm

3.3.1 CABEÇOTES SCANNING

Ambas as MMC utilizam um cabeçote de medição medidor analógico ativo com a tecnologia de apalpação VAST (Variable Accuracy and Speed Probing Technology), figura 38, para medição pelo processo de *scanning*, com as características da tabela 8.

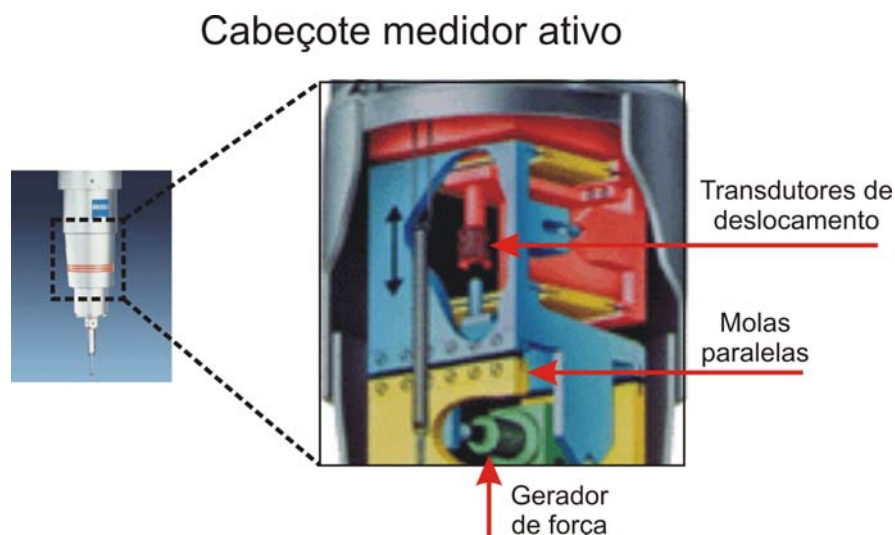


Figura 38: Cabeçote medidor ativo (adaptado de [41]).

Tabela 8: Características construtivas do cabeçote de *scanning*.

Tipo	Medidor analógico com molas (paralelograma) associadas a motores lineares para geração da força de medição e transdutores lineares de deslocamento LVDT com resolução de 0,0001 mm
Máxima massa do apalpador	600 g
Força de medição	Possível de ser escolhida entre (0,05 a 1) N
Faixa de trabalho do cabeçote	Máximo $\pm 5,0$ mm
Pratos para troca automática	Diâmetro dos pratos passivos 69 mm Repetitividade de troca < 0,0001 mm

3.3.2 SOFTWARE

Utilizou-se o *software* UMESS-UNIX e escolheu-se o procedimento de medição com contorno conhecido, onde é informado previamente à MMC o contorno a ser medido, para que maiores velocidades de medição pudessem ser utilizadas no ensaio. A fixação e definição do sistema coordenado do padrão foram efetuadas segundo orientações obtidas da referência [53].

3.4 AVALIAÇÃO DOS DADOS

Nesta dissertação foram utilizados somente os círculos de referência LSCI e MZCI (figura 39). Como já foi antecipado no item 2.1.1, o algoritmo MZCI produz resultados de avaliação consistentes com a definição de circularidade que consta no Anexo B da norma ISO 1101 [5]. O algoritmo LSCI foi incluído na análise por ser o mais utilizado na prática industrial da medição por coordenadas.

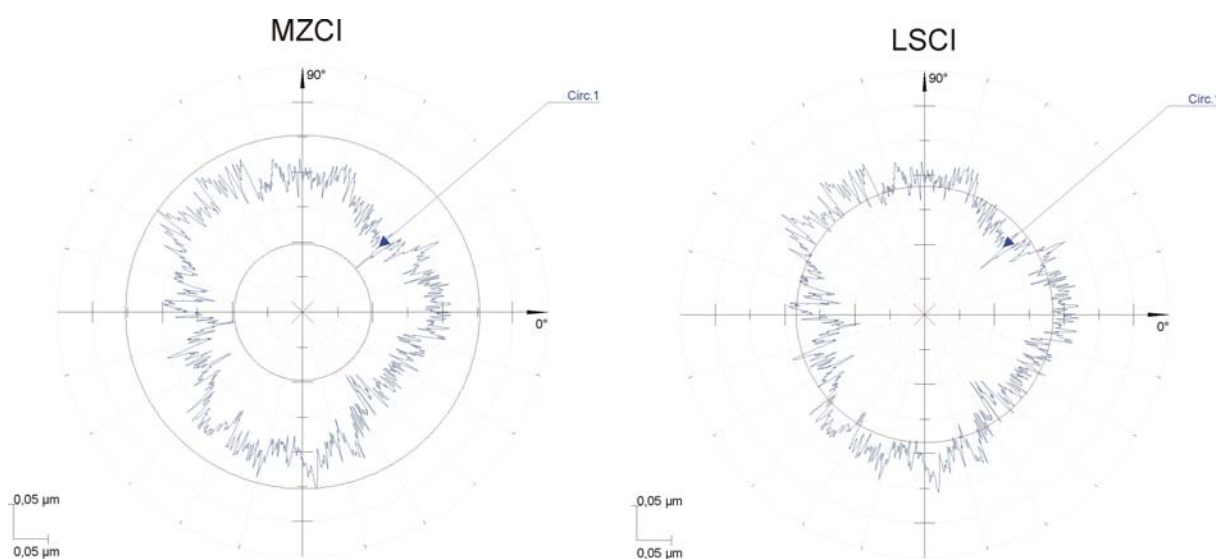


Figura 39: MZCI e LSCI.

Na pesquisa foi utilizado o filtro digital de fase corrigida gaussiano, segundo ISO 11562, [24], com frequências de corte 5, 15, 50, 150, 500 e 1500 OPR. Os parâmetros de circularidade analisados foram: a amplitude total pico-vale (RONt) e o conteúdo dinâmico, determinado através da aplicação da FFT à linha circunferencial extraída [25].

As MMC somente foram usadas para gerar os dados brutos, i.e., a linha circunferencial extraída. Esses dados foram exportados, na forma de coordenadas (x, y, z) e processados externamente em rotinas de cálculo implementadas num *software* independente. Uma análise mais detalhada da influência dos dados sobre o resultado final somente poderia ser testada eficientemente com o auxílio de um algoritmo independente que permitisse a manipulação dos dados brutos das medições.

Existem diversas formas de implementar algoritmos que dependem do nível de linguagem utilizado e da relação de dependência entre o tempo disponível para o processamento e a tolerância de erro admitido pelo algoritmo adotado.

Os filtros e métodos de análise podem ser aplicados por métodos analíticos e algébricos. Esses métodos não são disponibilizados pelos fabricantes de MMC nem são declarados em nenhum tipo de catálogo, pois são considerados *know-how* da empresa, o mesmo que as condições de contorno assumidas e as tolerâncias aceitas. Por esse motivo optou-se por usar algoritmos independentes do *software* da MMC. O *software* escolhido foi o MathCAD 2000 Professional, devido à facilidade de implementação das funções e pelo alto nível de programação. Além de fornecer uma maior liberdade para analisar os dados, um *software* independente permite ainda comparar resultados e verificar os erros introduzidos pelo *software* da MMC.

Para minimizar o tempo de processamento e facilitar a manipulação dos dados foram criados módulos independentes de análise, montando-os depois num único sistema segundo o fluxograma simplificado da figura 40. Um fluxograma mais detalhado contendo todas as informações encontra-se no ANEXO 3.

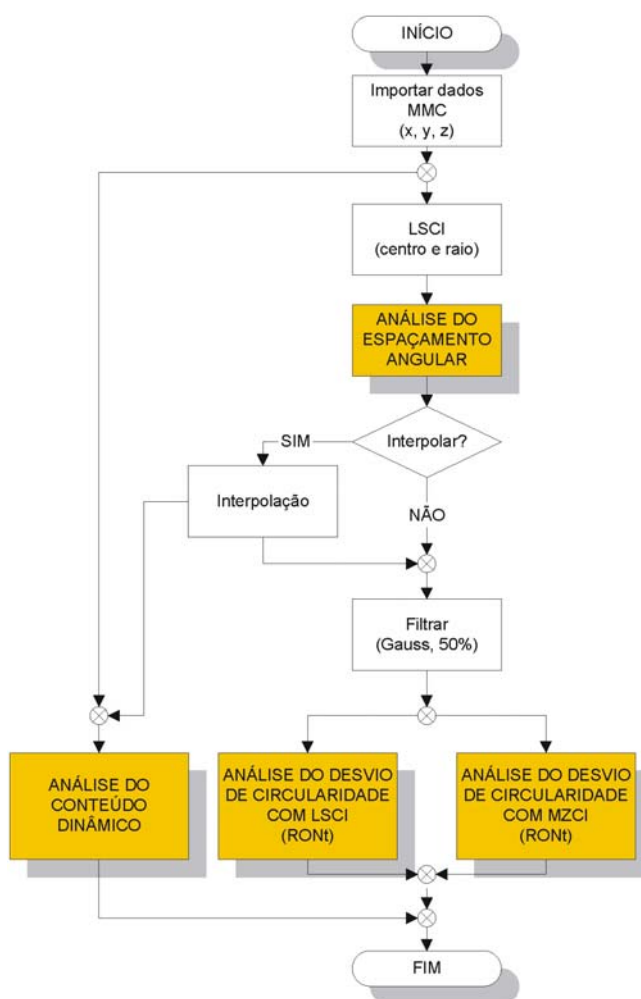


Figura 40: Esquema simplificado do algoritmo de análise de dados.

Os retângulos coloridos correspondem aos diversos estudos realizados no contexto desta pesquisa, cujos resultados são relatados no capítulo a seguir. A análise do espaçamento angular e a interpolação foram realizadas com o intuito de quantificar o efeito que o espaçamento não uniforme dos dados tem sobre os resultados da transformada de Fourier.

A seguir serão descritos mais detalhadamente cada um dos módulos de processamento mostrados na figura 40.

3.4.1 IMPORTAÇÃO DOS DADOS GERADOS PELA MMC

Os dados do *software* UMESS utilizado neste trabalho são exportados em formato VDA e facilmente transformados em arquivos em formato ASCII puro. Os dados brutos daquele *software* consistem em sete colunas, sendo somente as três primeiras de interesse para um pós-processamento. A primeira coluna corresponde aos valores obtidos na escala do eixo X da máquina, a segunda coluna diz respeito aos valores obtidos na escala Y e a terceira coluna aos valores obtidos na escala Z. Os valores (x, y, z) se referem às coordenadas do centro do sensor. Assim, a primeira tarefa consistiu em selecionar uma matriz de dados com três colunas e “n” linhas correspondentes ao número de pontos medidos e descartar o restante das informações. Como as medições eram efetuadas em um percurso maior que 360° , os pontos inicial e final foram escolhidos manualmente pelo usuário de forma que o primeiro fosse o ponto subsequente ao ponto final, evitando assim um erro de fechamento.

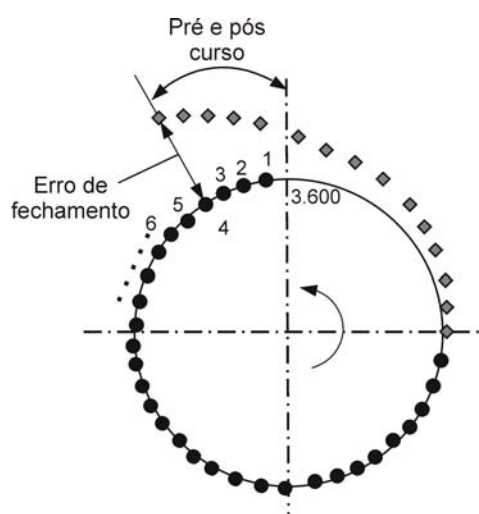


Figura 41: Erro de fechamento [54].

3.4.2 IMPLEMENTAÇÃO DO CÍRCULO DE REFERÊNCIA DE MÍNIMOS QUADRADOS - LSCI

O primeiro algoritmo de LSCI implementado utilizava o método de Levenberg-Marquardt, que é um método iterativo semelhante ao método de Newton-Raphson. Era de fácil aplicação, pois o Mathcad já possuía o algoritmo de ajuste internamente. Porém o tempo de processamento era elevado e para alguns conjuntos de dados o algoritmo calculava errado o centro do elemento [55], [56].

Em função dos problemas acima descritos optou-se por trabalhar com um algoritmo algébrico analítico, conhecido pela sigla AF1. Nesse método, em vez de minimizar a soma dos quadrados das distâncias geométricas, o que é minimizado é a soma dos quadrados de distâncias algébricas. Além disso, são calculados independentemente os valores do centro e do raio, ao contrário do método de Levenberg-Marquardt.

O algoritmo AF1 é muito mais rápido que o de Levenberg-Marquardt. Entretanto, ele oferece uma estimativa do centro e do raio que não é sempre estatisticamente ótima quando os dados coletados são de um arco circular [57], o que não foi o caso na pesquisa desta dissertação.

3.4.3 IMPLEMENTAÇÃO DO CÍRCULO DE REFERÊNCIA DE MÍNIMA ZONA – MZCI

A MZCI é um método intrinsecamente iterativo. O algoritmo utilizado é baseado em uma modificação do algoritmo geral proposto por Dhanish e Shunmugam [58], que não pode ser aplicado diretamente aos dados coordenados cartesianos, mas somente para dados em coordenadas polares. Foram aplicados conhecimentos de resolução de determinantes e equações simultâneas para a aplicação das equações envolvidas [59].

3.4.4 CONVERSÃO DE COORDENADAS CARTESIANAS PARA COORDENADAS POLARES

Os dados, antes de serem utilizados, foram convertidos de coordenadas cartesianas (x,y,z) para coordenadas polares (r,θ) . Isto foi feito calculando as coordenadas do centro do círculo utilizando o círculo de referência LSCI. Optou-se por essa referência em função do tempo de processamento, já que a diferença para o valor

do centro do círculo entre MZCI e LSCI é mínima. Também se procurou seguir a seqüência dos *softwares* disponíveis no mercado.

3.4.5 FILTRO GAUSS

Para a filtragem de sinais digitais a literatura fornece diferentes métodos que deveriam chegar ao mesmo resultado. Entre os métodos mais utilizados na medição de forma podem-se citar [21]:

- filtragem no espectro do espaço através de convolução com a função peso;
- filtragem no espectro de freqüência através de multiplicação com a função transferência.

Utilizou-se o último método, embora para perfis circulares (perfis fechados) ou periódicos, ambos os métodos podem ser aplicados. O método aplicado utiliza a FFT que necessita que os vetores tenham 2^m elementos ($m > 2$) e que os dados estejam no domínio de tempo real. Na medição de forma por *scanning* é difícil obter um conjunto de valores com 2^m elementos, pois nessa tecnologia não é possível escolher exatamente a quantidade de pontos amostrados. Devido a essa dificuldade, fez-se uso do algoritmo CFFT (CFFT- *Complex Fast Fourier Transform*) que permite trabalhar com conjuntos de vetores que não possuem 2^m elementos.

Para o algoritmo de filtragem de fase corrigida utilizou-se a função transferência recomendada pela ISO 11562 [24] e ASME B46 (1995), já expressada na Equação 3.

Sabendo-se que:

$$\frac{N}{N_{co}} = \frac{\lambda}{\lambda_{co}} \therefore N_{co} = \frac{1/f_{co}}{1/f} \cdot N \therefore N_{co} = \frac{f}{f_{co}} \cdot N \quad \text{Equação 13}$$

onde:

- N número de pontos medidos;
- N_{co} número de pontos medidos de corte;
- f freqüência em OPR;
- f_{co} freqüência de corte em OPR;

- λ comprimento de onda em OPR;
- λ_{co} comprimento de onda de corte em OPR.

como em um perfil fechado f é igual a 1 (um), tem-se:

$$N_{co} = \frac{N}{f_{co}} \quad \text{Equação 14}$$

Trocando N_{co} por λ_{co} na Equação 14 tem-se:

$$H(N_{co}, i) = \left[\frac{1}{\alpha \cdot N_{co}} \cdot e^{-\pi \left(\frac{i - N_{co}}{\alpha \cdot N_{co}} \right)^2} \right] \quad \text{Equação 15}$$

Onde $i - N_{co}$ corresponde ao espaço angular. A função CFFT foi aplicada nos dados da linha circunferencial extraída $\mathfrak{F}\{f(x)\}$ e na função peso $\mathfrak{F}\{s(x)\}$, onde \mathfrak{F} é a simbologia utilizada para Transformada de Fourier e $f(x)$ e $s(x)$ correspondem ao sinal de entrada e a função peso respectivamente. A filtragem ocorre pela multiplicação dos coeficientes complexos da transformada de Fourier da linha circunferencial extraída com os coeficientes da função transferência, como mostra a equação abaixo:

$$\mathfrak{F}\{f(x)\} \cdot \mathfrak{F}\{s(x)\} = \mathfrak{F}\{g(x)\} \quad \text{Equação 16}$$

Por fim é aplicada a inversa da transformada rápida de Fourier iCFFT para transformar o resultado do espectro de frequência em coordenadas polares novamente [60]. É importante ressaltar que a função CFFT também foi utilizada para a análise do conteúdo dinâmico.

3.4.6 ANÁLISE DO ESPAÇAMENTO ANGULAR E INTERPOLAÇÃO

A avaliação do conteúdo dinâmico do sinal aplicando à FFT somente fornece resultados confiáveis quando a distância entre os pontos que compõem a linha circunferencial extraída é constante. Assim, antes de investigar a influência da quantidade de pontos nos parâmetros de circularidade, tornou-se necessário verificar qual a real capacidade de uma MMC para coletar dados uniformemente espaçados ao longo de uma trajetória circular. Para isso, as coordenadas cartesianas dos pontos

medidos no sistema coordenado peça foram transformadas em coordenadas polares. Os valores do ângulo compreendido entre dois pontos sucessivos foram plotados numa seqüência do espaçamento angular e suas freqüências empíricas analisadas num histograma.

Verificou-se que em muitos casos o comando da MMC não é capaz de produzir uma amostra com espaçamento uniforme e igual ao espaçamento nominal, violando assim a condição de uniformidade da amostra exigida pela FFT. Este fenômeno repetiu-se para todos os casos estudados.

Para diminuir o impacto desta característica dos dados, desenvolveu-se um algoritmo de interpolação linear utilizando rotinas internas do próprio MathcadTM, que transforma a amostra obtida pela MMC numa outra amostra com espaçamento angular constante conforme equação 17:

$$\theta = \frac{360^\circ}{N} \quad \text{Equação 17}$$

Onde θ é o espaçamento angular e N é o número de pontos coletados.

Fica assim definida uma nova linha circunferencial extraída, que cumpre com os requisitos para aplicação da FFT. Porém, se deve compreender que esse é um recurso que modifica o sinal original com conseqüências não muito bem conhecidas. De fato, foi reportado que a interpolação pode resultar no surgimento de pontos espúrios adicionais ou mesmo em divisões nas linhas principais do espectro [61].

3.5 OUTROS ALGORITMOS

3.5.1 SOBREPOSIÇÃO DOS PERFIS (COMPARAÇÃO GRÁFICA)

O algoritmo de sobreposição de perfis foi desenvolvido para que perfis de circularidade obtidos em diferentes equipamentos pudessem ser sobrepostos e comparados visualmente. Usando uma rotina de *best-fit* [56] é possível sobrepor perfis extraídos tanto de uma MMF como de uma MMC, ou perfis extraídos de uma mesma máquina com diferentes parâmetros, como por exemplo, distinta velocidade de medição.

3.5.2 SIMULAÇÃO DO PADRÃO DE MÚLTIPLAS ONDAS

A fim de estudar isoladamente a influência da quantidade de pontos bem como da posição de início da medição, optou-se pela simulação computacional.

Usando a função matemática de geração do padrão de múltiplas ondas, foi simulada uma linha circunferencial extraída com a máxima quantidade de pontos que a tecnologia atual de medição por *scanning* permite obter (N igual a 75000 pontos).

Como já foi informado no item 3.2, o perfil do padrão caracteriza-se pela superposição de senóides de frequências 5, 15, 50, 150 e 500 OPR. A amplitude das senóides bem como o raio médio dependem do padrão a ser simulado. Neste caso foram usadas uma amplitude de $3,5 \mu\text{m}$ e um raio médio de 80 mm (figura 42).

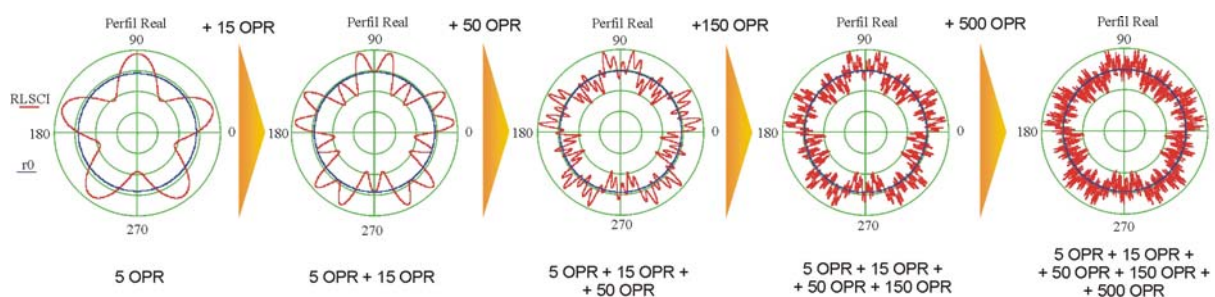


Figura 42: Perfil simulado.

3.5.3 FILTRO MORFOLÓGICO

A linha circunferencial extraída pela MMC já sofreu uma filtragem mecânica, o que é equivalente a realizar a operação de dilatação discreta sobre o perfil original, não conhecido pelo pesquisador. Assim, para obter um perfil próximo ao original foi necessário apenas aplicar o filtro de erosão discreto, o que é feito posicionando matematicamente o centro de um disco em cada ponto da linha circunferencial extraída, como pode ser visto na figura 43.

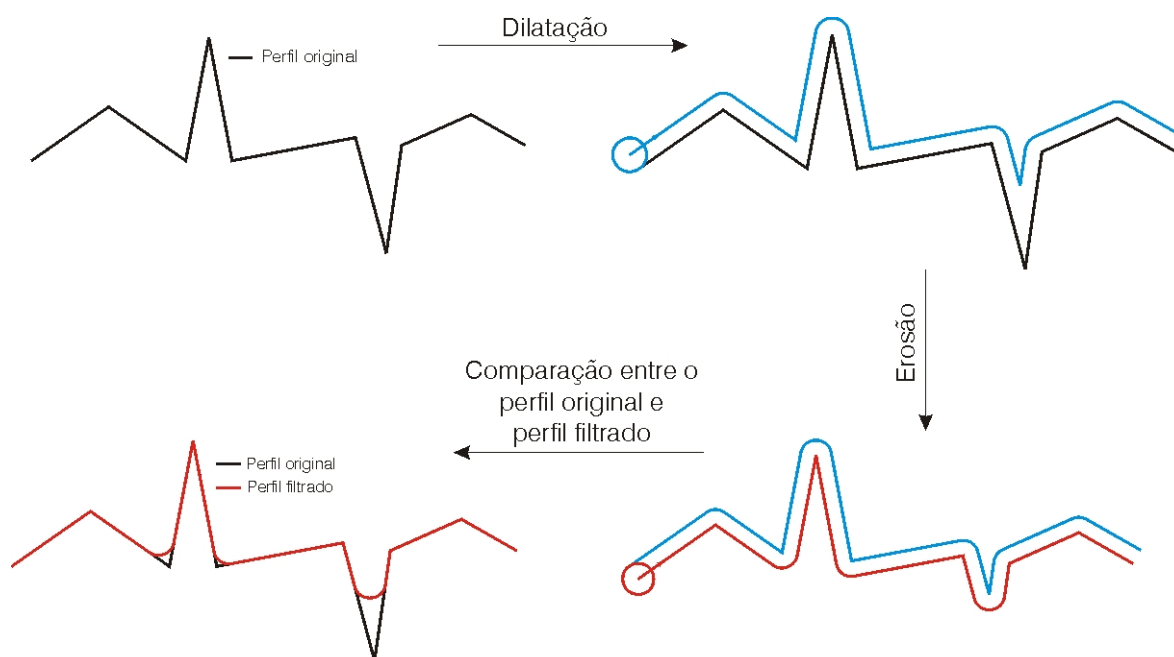


Figura 43: Filtro morfológico (adaptado de [3]).

3.5.4 VALIDAÇÃO DOS ALGORITMOS IMPLEMENTADOS

As rotinas foram validadas com conjuntos de dados padrão e por comparação com *softwares* de referência para análise de circularidade, antes de serem utilizadas no processamento dos dados do projeto. Cada algoritmo implementado foi validado independentemente e em conjunto conforme tabela 9.

Tabela 9: Validação dos algoritmos implementados.

Algoritmo	Método de Validação
LSCI	Foram obtidos do <i>site</i> da NPL, séries de dados de referência (x, y) de círculos com parâmetros perfeitamente conhecidos (x0, y0, r0) [62]. Esses conjuntos de (x, y) foram avaliados com o algoritmo próprio e comparados com os valores padrão.
MZCI	Foram obtidos do <i>site</i> da NPL, séries de dados de referência (x, y) de círculos com parâmetros perfeitamente conhecidos (x0, y0, r0) [63]. Esses conjuntos de (x, y) foram avaliados com o algoritmo próprio e comparados com os valores padrão. Comparou-se o resultado do algoritmo implementado com dados (x, y) e os respectivos resultados do artigo de referência [59].
Gauss, 50%	Foram comparados séries de valores Ri filtrados com o <i>software</i> SigmaRound proposto pelo grupo ISO/TC 213/WG 15 [64], [65]. TAMBÉM FORAM USADOS RESULTADOS OBTIDOS COM O <i>SOFTWARE</i> FORM-PC [66].
Conteúdo dinâmico	Foi testado contra algoritmo implementado em MatLab™ [67].
Reconstrução	Foi usado o procedimento introduzido em [3] e testado realizando uma análise visual do processo de filtragem num perfil conhecido.
Interpolação	Foram plotados os dados antes e depois da interpolação e comparados graficamente.
Sobreposição de perfis	Foram plotados os dados sobrepostos e testado realizando uma análise visual.

3.6 PLANEJAMENTO

Os experimentos foram divididos em duas etapas: Ensaios no Laboratório de Máquinas-ferramentas da Universidade Técnica de Aachen, WZL RWTH, Alemanha (1ª etapa) e Ensaios no Laboratório de Metrologia do CMI, Fundação CERTI (2ª etapa).

1ª Etapa

Na primeira etapa realizaram-se medições do contorno externo do padrão múltiplas ondas KOMBI - MWN 2 sob um amplo leque de condições. Cada medição foi programada para abranger um ângulo total de 400°, deixando assim 20° no início e no final do percurso circular para aceleração e desaceleração do sistema.

O objetivo dos experimentos era verificar o comportamento da MMC para os casos de taxa de aquisição máxima, de aquisição constante e de aquisição variável. A tabela abaixo mostra a relação entre a velocidade de medição e a menor distância entre dois pontos consecutivos permitida pelo sistema de controle e software da MMC utilizada.

Velocidade de <i>scanning</i> (mm/s)	Distância entre pontos (p) [mm] (nominal)
0,01 (menor velocidade permitida)	0,00015
0,04	0,0006
0,4	0,006
4,0	0,06
40 (maior velocidade permitida)	0,6

A tabela 10 informa sobre as condições de medição aplicadas para cada experimento. Os casos 1-5 apresentam diferentes quantidades de pontos, mas a velocidade e a força de medição foram mantidas constantes. Os casos 6-10 são similares aos anteriores, porém foi usada a máxima velocidade recomendada pelo fabricante da MMC para cada quantidade de pontos. Finalmente, os casos 11-20 são semelhantes aos casos 1-10, mas a força de medição foi incrementada para 0,2 N.

Tabela 10: Condições de medição utilizadas para os experimentos da 1ª etapa.

Caso	Velocidade de scanning (mm/s)	Distância entre pontos (p) [mm] (nominal)	Força de medição (N)
1	1	0,0203	0,1
2	1	0,034	0,1
3	1	0,0525	0,1
4	1	0,105	0,1
5	1	0,5	0,1
6	1	0,0203	0,1
7	2	0,034	0,1
8	3,5	0,0525	0,1
9	7	0,105	0,1
10	30	0,5	0,1
11	1	0,0203	0,2
12	1	0,034	0,2
13	1	0,0525	0,2
14	1	0,105	0,2
15	1	0,5	0,2
16	1	0,0203	0,2
17	2	0,034	0,2
18	3,5	0,0525	0,2
19	7	0,105	0,2
20	30	0,5	0,2

O diâmetro do sensor usado nas medições foi calculado pela equação 9 e comparado aos valores fornecidos na tabela 5, evitando assim a filtragem mecânica dos componentes de onda de mais alta frequência, conforme tabela 11.

Tabela 11: Apalpador T1.

Montagem / Material: Haste de metal-duro com sensor esférico de rubi e um prolongador de alumínio	
Geometria:	
Comprimento total da configuração:	(130,0 ± 0,1) mm
Comprimento do prolongador de alumínio:	(80,0 ± 0,1) mm
Diâmetro do prolongador:	(25,0 ± 0,1) mm
Comprimento da haste:	(50,0 ± 0,1) mm
Diâmetro da haste:	(1,8 ± 0,1) mm
Diâmetro do sensor:	(2,9996 ± 0,0002) mm
Massa total	(0,6478 ± 0,0005) kg

2ª Etapa

Na segunda etapa, os dados brutos das medições foram obtidos com MMC, no qual realizaram medições do contorno externo do padrão KOMBI – MWN 1. Também nesta etapa mediu-se um ângulo total de 400°. A tabela 12 informa sobre as condições de medição aplicadas para cada experimento. A condição de medição foi escolhida de tal forma que fosse equivalente aos casos 11 e 16 da tabela 10, uma vez que o diâmetro do padrão da etapa 2 era menor que o da etapa 1. Escolheu-se dois diâmetros a fim de verificar-se a influência da filtragem mecânica. Por último realizaram-se três repetições para analisar-se a repetitividade da MMC.

Tabela 12: Condições de medição utilizadas para os experimentos da 2ª etapa

Força de medição 0,2 N		
Velocidade de medição 0,6 mm/s (56 pontos por onda)		
Ciclo	Apalpador A1	Apalpador A2
	Ensaio	Ensaio
1	1	4
2	2	5
3	3	6

A velocidade de medição foi escolhida a fim de se obter 56 pontos por onda de mais alta frequência e minimizar a influência dos defeitos dinâmicos. Os diâmetros dos sensores usados nas medições foram escolhidos para que o menor não causasse nenhuma filtragem mecânica dos componentes de onda de mais alta frequência e o maior causasse uma atenuação, conforme tabela 5. As características dos apalpadores se encontram na tabela 13 e tabela 14 (ver figura 44).



Figura 44: Apalpadores utilizados na 2ª etapa.

Foram efetuadas três repetições para cada diâmetro do sensor com o objetivo de analisar a repetitividade da MMC em medições com *scanning*.

Tabela 13: Apalpador A1

Montagem / Material: Haste de metal-duro com sensor esférico de rubi	
Geometria:	
Comprimento total da configuração:	(25,0 ± 0,1) mm
Comprimento da haste:	(14,0 ± 0,1) mm
Diâmetro da haste:	(1,0 ± 0,1) mm
Diâmetro do sensor:	(1,4995 ± 0,0002) mm
Massa total	(0,1768 ± 0,0005) kg
Rigidez:	0,67 μm/N

Tabela 14: Apalpador A2

Montagem / Material: Haste de metal-duro com sensor esférico de rubi	
Geometria:	
Comprimento total da configuração:	(60,0 ± 0,1) mm
Comprimento da haste:	(38,0 ± 0,1) mm
Diâmetro da haste:	(6,0 ± 0,1) mm
Diâmetro do sensor:	(8,0003 ± 0,0002) mm
Massa total	(0,2181 ± 0,0005) kg
Rigidez:	0,30 μm/N

3.6.1 MEDIÇÕES

As medições foram realizadas em MMC de alta exatidão, instaladas em ambientes severamente controlados. Ambas as máquinas possuem cabeçotes medidores ativos. As medições foram realizadas por metrologistas treinados. O padrão foi fixado na máquina conforme figura 45.

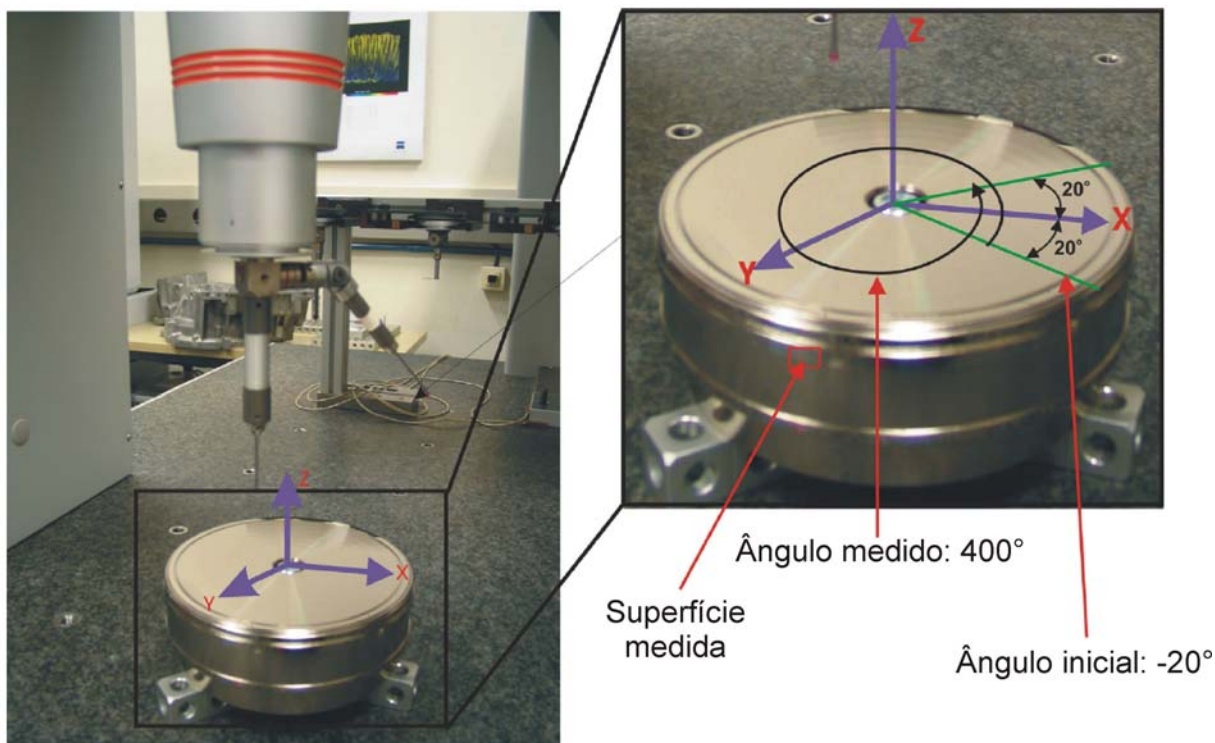


Figura 45: Medição do padrão KOMBI – MWN 2 na MMC em Aachen.

3.6.2 ANÁLISES

1ª Etapa

Na primeira etapa realizaram-se as seguintes análises:

- Influência do círculo de referência e do número de pontos, para diferentes freqüências de corte e com filtro gaussiano com transmissão de 50%;
- Influência da força de medição e do número de pontos, para diferentes freqüências de corte e com filtro gaussiano com transmissão de 50%;
- Influência do desvio da velocidade de *scanning* e do número de pontos, para diferentes freqüências de corte e com filtro gaussiano com transmissão de 50%;
- Capacidade da MMC em obter dados igualmente espaçados;
- Influência do espaçamento angular irregular;

- Efeito da interpolação linear dos dados para diferentes números de pontos e diferentes frequências de corte, utilizando filtro gaussiano de 50%.

2ª Etapa

Na segunda etapa realizaram-se as seguintes análises:

- Análise da influência do diâmetro do sensor no conteúdo dinâmico;
- Análise da influência do diâmetro do sensor na quantidade de pontos;
- Análise da influência da frequência de corte do filtro e o diâmetro do sensor na amplitude total pico-vale;
- Estudo do comportamento do filtro morfológico com e sem interpolação linear dos dados.

3.6.3 Simulação

Por fim simulou-se um perfil padrão com a máxima quantidade de pontos que a tecnologia atual permite obter e analisou-se as seguintes características:

- Variação do desvio de forma em função da quantidade de pontos;
- Variação do erro relativo em função da quantidade de pontos;
- Determinação da quantidade mínima de pontos para a frequência de corte de 500 OPR.

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados da avaliação experimental da circularidade utilizando diferentes círculos de referências, quantidade de pontos, velocidade de medição, força de medição e diâmetro de sensor. Será visto como cada fonte de influência afeta o parâmetro RONt e o Conteúdo Dinâmico.

A partir das análises feitas sobre os resultados obtidos por simulação, tornou-se possível verificar a influência da quantidade de pontos e estimar a quantidade mínima de pontos por revolução em função de um erro relativo.

4.1 INFLUÊNCIA DO CÍRCULO DE REFERÊNCIA E QUANTIDADE DE PONTOS

A parte superior da figura 46 corresponde à análise dos dados dos casos 11 a 15 coletados da tabela 10. Esses casos foram analisados usando dois círculos de referência diferentes, MCZI e LSCI, calculando o valor do parâmetro de análise RONt. A amplitude correspondente à frequência de corte 1500 OPR não foi informada para densidade 1000 pontos por revolução, pois essa combinação viola o requisito estabelecido pelo critério de Nyquist.

Na figura, pode-se observar que a quantidade de pontos e o círculo de referência têm menor influência sobre o valor do parâmetro de análise RONt que a frequência de corte do filtro selecionada. Como exemplo, apresenta-se na parte inferior uma vista ampliada do comportamento do parâmetro RONt para a frequência de corte de 150 OPR. Observa-se que a influência de escolher 1000 ou 25000 pontos ou então analisar com MZCI ou LSCI é da ordem de $0,2 \mu\text{m}$, valor significativamente menor que a amplitude total do padrão.

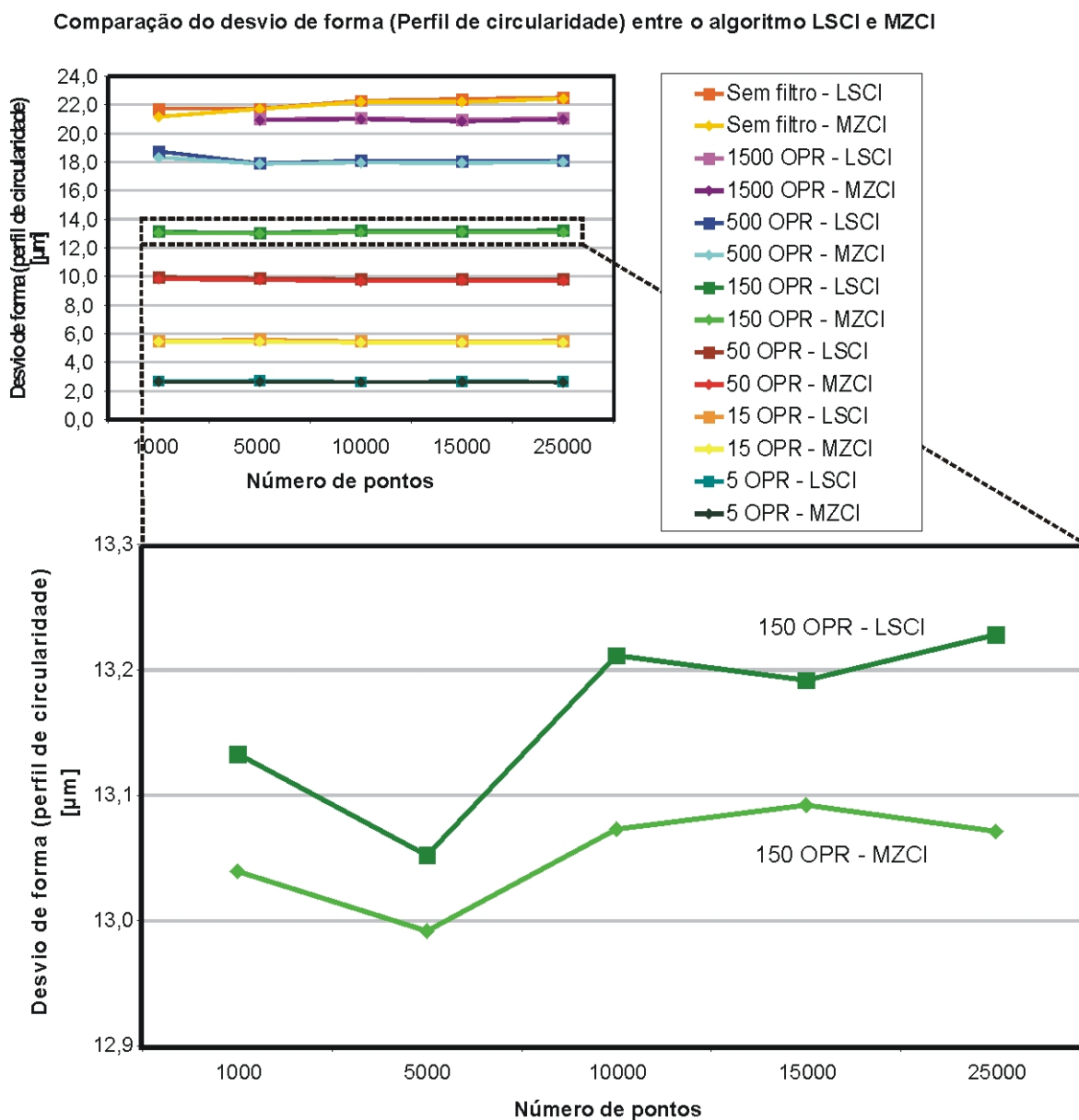


Figura 46: Influência do círculo de referência e quantidade de pontos (casos 11 a 15 da tabela 10).

É importante notar que, embora não apareçam diferenças significativas atribuíveis à quantidade de pontos ou ao círculo de referência, percebe-se um aumento dos valores informados pela MMC com relação aos valores verdadeiros convencionais obtidos por calibração na MMF. Essa diferença aumenta na medida em que a frequência de corte do filtro aumenta.

Os outros casos apresentaram o mesmo comportamento e não foram mostrados por questão de espaço. O mesmo aconteceu com o conteúdo dinâmico, pois a diferença entre os centros calculados por ambos os métodos de cálculo do círculo de referência é desprezível. Desta forma, a conversão dos valores de coordenadas polares não fica afetada pela escolha do LSCI.

Segundo J. Wanner [33], a diferença entre LSCI e MZCI torna-se mais evidente à medida que o perfil de circularidade apresenta erros de forma maiores ou pontos atípicos. Como o padrão utilizado na pesquisa é simétrico e perfeitamente conhecido, a diferença entre os métodos de análise é atenuada.

Contudo, os resultados apresentados nesta seção não devem ser estendidos para o âmbito da medição de peças reais, cuja linha circunferencial extraída pode apresentar assimetria de revolução. Nesses casos as diferenças entre LSCI e MZCI serão, sem dúvida, relevantes. A escolha do primeiro círculo de referência produzirá sempre ajustes mais robustos e usará menos tempo de processamento. A escolha do MZCI produzirá resultados consistentes com o anexo B da norma ISO 1101 (2004). De posse desta informação e pelas razões acima detalhadas, as análises desta pesquisa foram efetuadas somente com LSCI.

4.2 INFLUÊNCIA DA FORÇA DE MEDIÇÃO E QUANTIDADE DE PONTOS

Outro parâmetro que influencia nos resultados é a força de medição, principalmente para medições de contornos externos, como foi mostrado na figura 33 (capítulo 2).

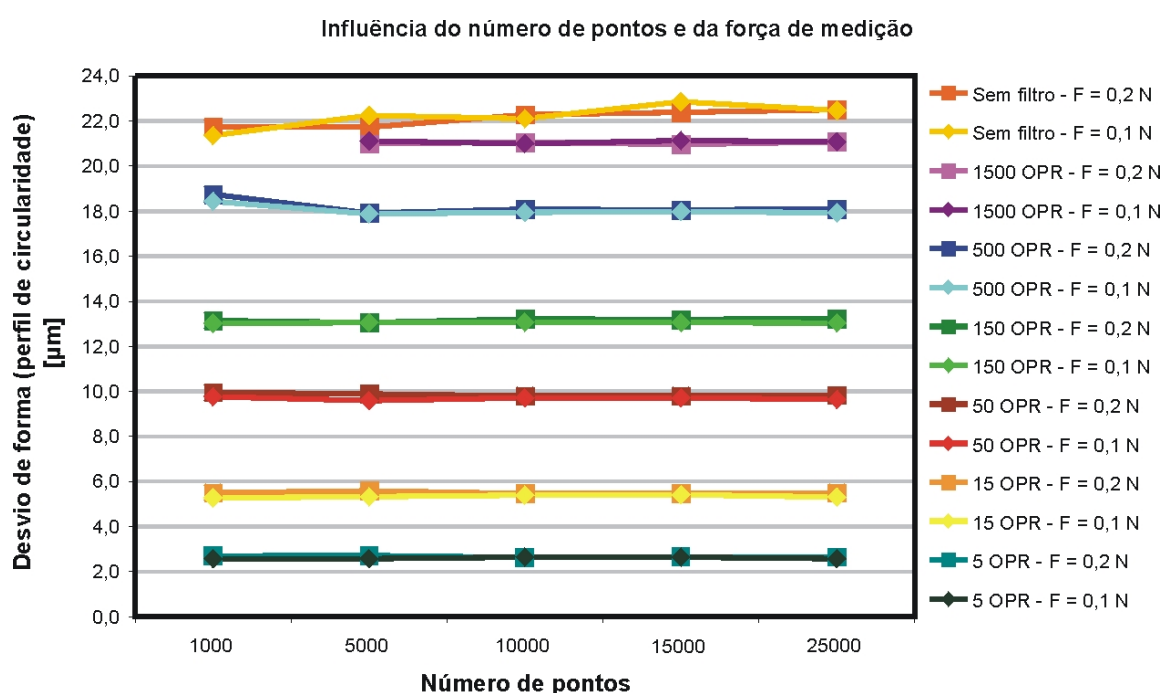


Figura 47: Influência da força de medição e quantidade de pontos (casos 1 a 5 e 11 a 15 da tabela 10).

Na figura 47 pode-se observar um gráfico no qual se comparam os resultados obtidos para o parâmetro RONT, com dois níveis de força de contato. Cada traço no diagrama indica a variação devida à quantidade de pontos, para certa força e frequência de corte do filtro. Novamente se observa que a amplitude pico-vale não é afetada de forma significativa pela mudança de força, dentro dos limites definidos para esta pesquisa. Isso significa que a força de medição não é a causa do aumento de amplitude indicada pela MMC com referência à MMF.

Ao analisar o parâmetro conteúdo dinâmico (figura 48) com o mesmo conjunto de dados acima se chega à mesma conclusão a respeito da influência da força medição. Por essa razão, as análises a seguir foram efetuadas usando apenas os casos obtidos com força de medição de 0,2 N.

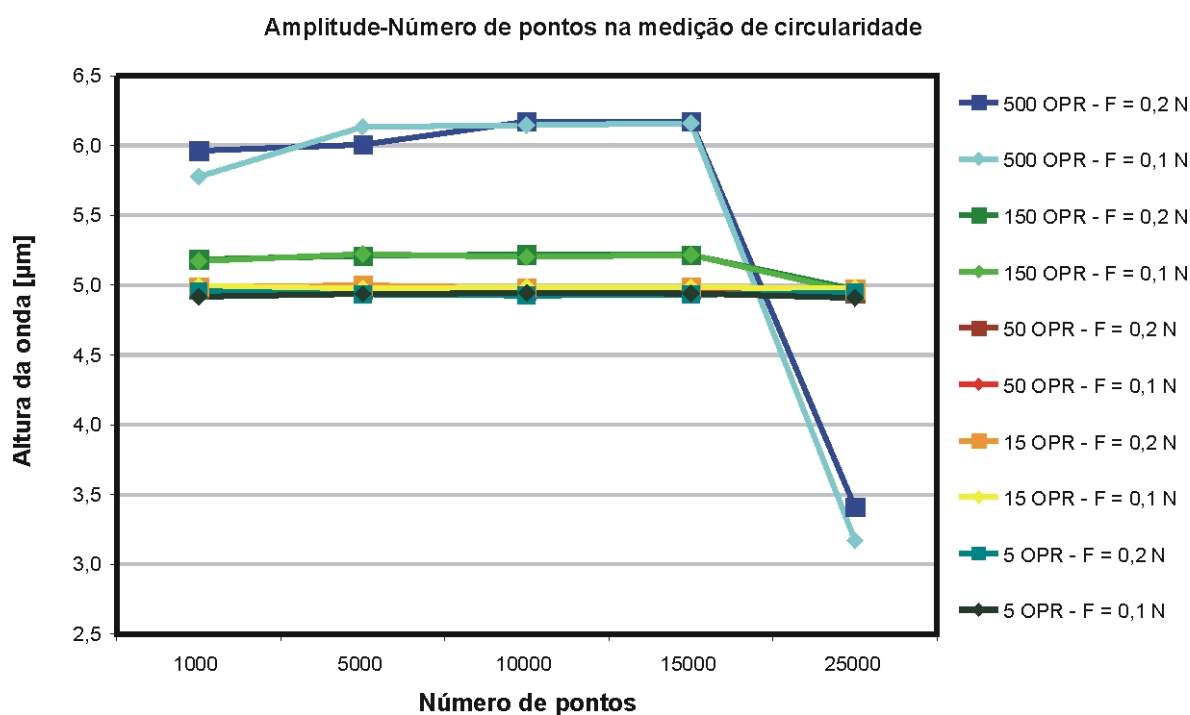


Figura 48: Influência da força de medição e quantidade de pontos no “conteúdo dinâmico” (casos 1 a 5 e 11 a 15 da tabela 10).

Na figura 48 podem ser observados alguns comportamentos peculiares na medição da componente de 500 OPR. Contrariamente ao esperado, essa componente não apresenta atenuação quando medida com 1000 pontos por revolução, apesar de violar o requisito de 7 pontos por onda, e apresenta uma forte atenuação quando medida com 25000 pontos por revolução. Esses comportamentos serão explicados mais adiante.

4.3 INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE MEDIÇÃO E DA QUANTIDADE DE PONTOS

A velocidade de medição e a quantidade de pontos são dois parâmetros de importância crucial para aplicação da técnica de *scanning*, pois juntos determinam a produtividade da MMC. Eles não são independentes, mas estão correlacionados em função da máxima taxa de aquisição da MMC e da máxima quantidade de pontos que o *software* pode processar.

Na figura 49 pode-se observar os resultados de um estudo comparando os casos 11 a 15 (obtidos com velocidade constante 1 mm/s) com os casos 16 a 20 (obtidos com a máxima velocidade recomendada para cada número de pontos). Percebe-se que, na medida em que a velocidade de medição aumenta, o desvio de circularidade indicado pela MMC também aumenta e que esta influência é tanto mais significativa quanto maior é a frequência de corte selecionada.

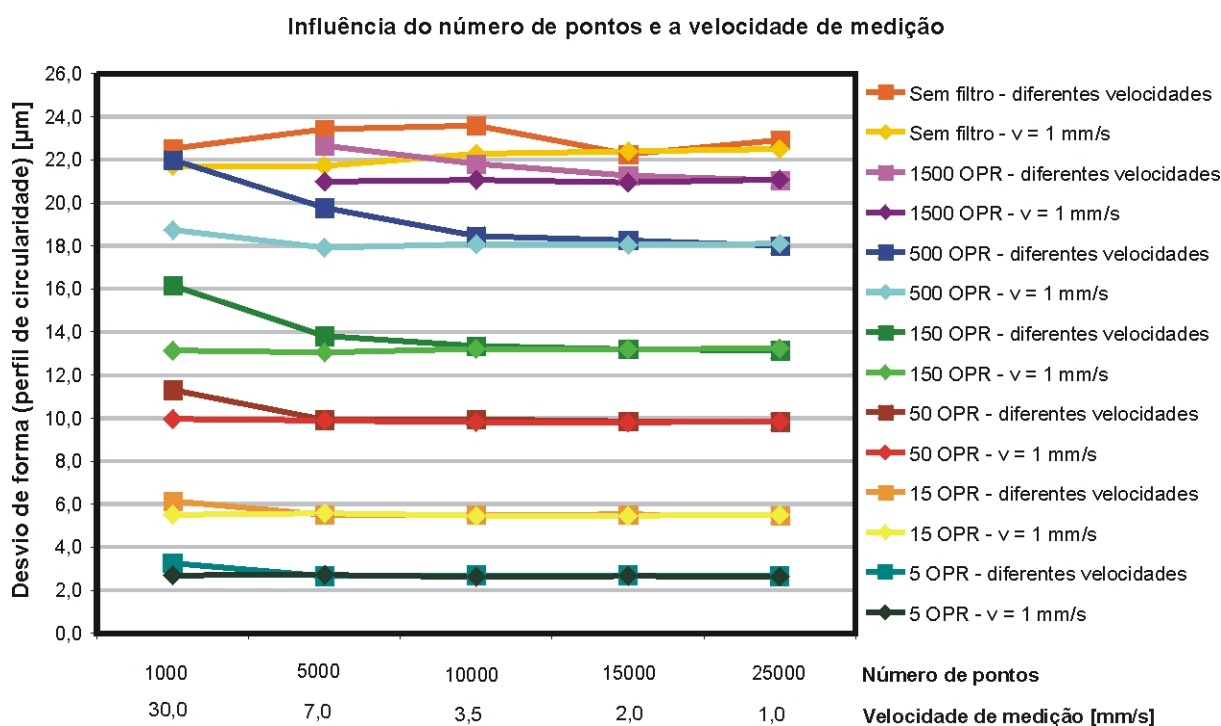


Figura 49: Influência da quantidade de pontos no desvio de forma, avaliado pela amplitude total pico-avale, para dados com diferentes velocidades de medição e diferentes frequências de corte do filtro (casos 11 a 20 da tabela 10).

O efeito da velocidade de medição também é evidente na análise do conteúdo dinâmico como mostra a figura 50. A maior diferença na atenuação da amplitude ocorre

com a onda de 500 OPR para os casos 15 e 20. Essa onda, cuja amplitude deveria ser atenuada quando somente 1000 pontos por revolução são adquiridos, não apresenta atenuação a baixa velocidade (caso 15), mas sim quando a velocidade é elevada para 30 mm/s (caso 20).

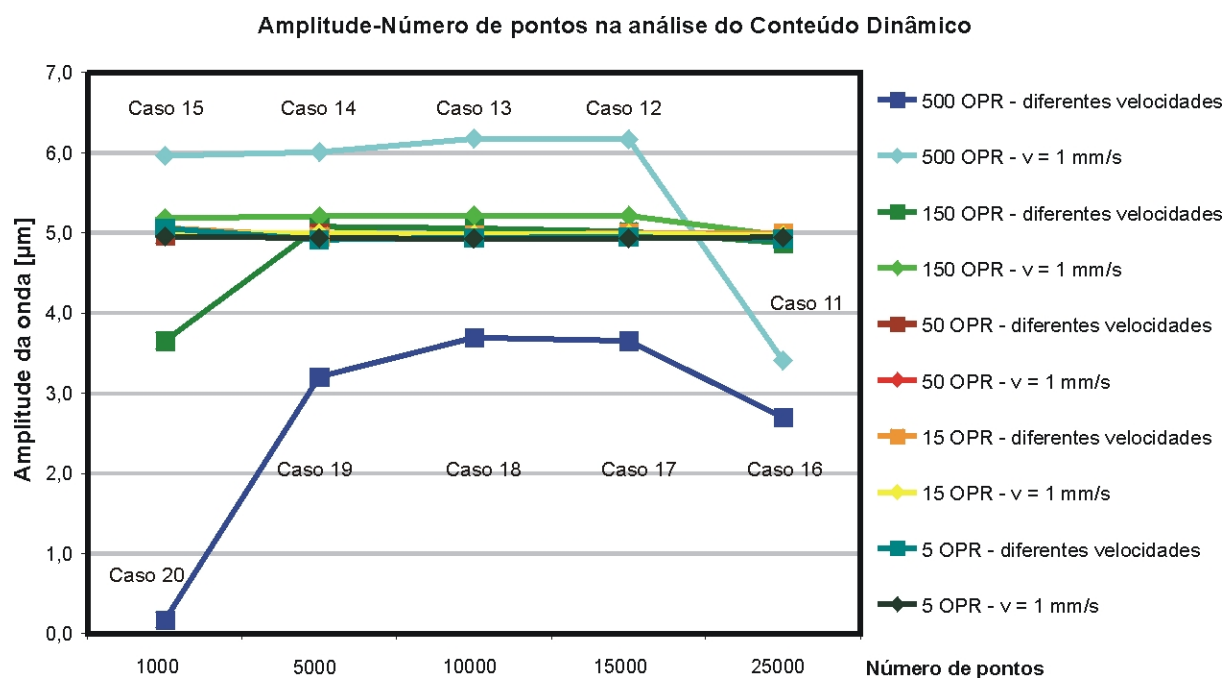


Figura 50: Influência da velocidade de medição e quantidade de pontos na análise do conteúdo dinâmico do sinal, avaliado com aplicação da FFT (casos 11 a 30 da tabela 10).

Pesquisando a bibliografia descobriu-se que existe uma recomendação do NPL (National Physical Laboratory) que sugere a coleta de dados não igualmente espaçados, quando por razões de ordem prática a medição é realizada com um número de pontos por revolução inferior ao mínimo recomendado [68]. Os casos 15 e 20 foram coletados com espaçamento supostamente constante. Porém, o caso 15 não mostrou atenuação, como se a recomendação do NPL houvesse sido implementada nessa coleta de dados.

Por essa razão, suspeitou-se que o espaçamento dos dados poderia não ser suficientemente uniforme, afetando assim os resultados da aplicação da transformada de Fourier. Foi então decidido verificar qual a real capacidade da MMC para coletar dados uniformemente espaçados ao longo de uma trajetória circular e a real influência da taxa de aquisição nos resultados da medição de circularidade.

4.4 ANÁLISE DA CAPACIDADE DA MMC DE OBTER DADOS IGUALMENTE ESPAÇADOS

Primeiramente verificou-se o comportamento da MMC durante a coleta dos dados. Para tanto se calculou a quantidade de pontos nominal através da equação 18, na qual ϕ é o diâmetro do padrão MWN 2 (180 mm) e p é a distância entre pontos sucessivos, em milímetros, obtida da Tabela 10.

$$N_{nominal} = \frac{\pi \cdot \phi}{p} \quad \text{Equação 18}$$

A tabela 15 mostra, para os distintos casos com força de medição 0,2 N, a quantidade de pontos nominal e a quantidade de pontos realmente coletados.

Tabela 15: Análise da capacidade de coleta de dados da MMC.

Caso	p [mm]	Velocidade de <i>scanning</i> (mm/s)	Pontos por revolução (nominal)	Pontos por revolução (coletado)
11	0,0203	1	27856	27114
12	0,034	1	16632	16629
13	0,0525	1	10771	10773
14	0,105	1	5386	5391
15	0,5	1	1131	1132
16	0,0203	1	27856	27151
17	0,034	2	16632	15307
18	0,0525	3,5	10771	9412
19	0,105	7	5386	4719
20	0,5	30	1131	1034

A coluna direita informa o número de pontos efetivamente coletados num contorno de 360°, obtido após expurgar os pontos correspondentes aos 20° excedentes no início e no final da corrida. Observa-se que existe uma diferença entre o número de pontos coletado e o nominal, usado para programar a máquina, e que essa diferença depende da distância entre dois pontos consecutivos e da velocidade de *scanning*.

A figura 51 mostra os resultados gráficos da análise da capacidade da MMC de produzir dados igualmente espaçados, para o caso 11 da tabela 10. Na parte superior esquerda da figura pode-se observar a seqüência de valores de espaçamento angular entre pontos sucessivos, para o contorno completo de 360°; na parte inferior, uma vista ampliada da mesma seqüência para um contorno de 10° e a direita, o histograma dos

espaçamentos angulares. Para o caso sob estudo, o espaçamento nominal é 0,775', representado pela linha azul no gráfico de seqüência.

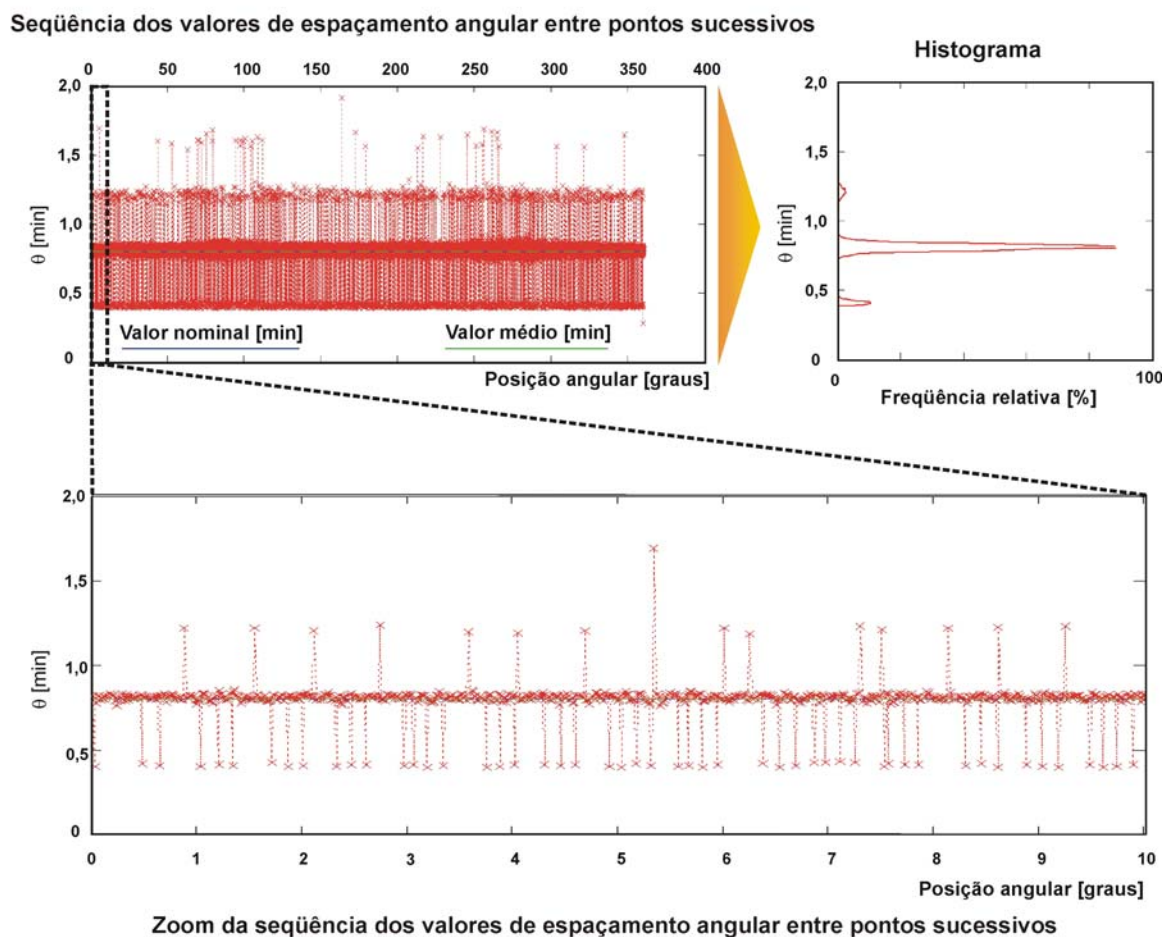


Figura 51: Resultados da análise do ângulo compreendido entre dois pontos sucessivos (caso 11 da tabela 10).

A análise destes gráficos torna evidente que os dados coletados não constituem uma amostra com espaçamentos uniformes e iguais ao espaçamento nominal. De fato, o espaçamento real entre pontos mostra 4 agrupamentos separados, o mais denso dos quais apresenta uma média aproximadamente igual ao espaçamento nominal (ver histograma). O menor valor de espaçamento angular detectado é na ordem de 0,4' e o maior aproximadamente 2,0', sendo que as médias dos agrupamentos distam aproximadamente 0,4'. Esse fenômeno foi observado nos diversos casos estudados, variando a velocidade de medição ou não.

A primeira suspeita do espaçamento angular não uniforme foi atribuída ao efeito tribológico conhecido por *stick-slip*, contudo, após uma análise mais criteriosa dos histogramas foi possível chegar a algumas conclusões diferentes:

- a seqüência dos valores de espaçamento angular entre pontos sucessivos não é totalmente aleatória, o que põe em suspeita a hipótese de *stick-slip*;
- na medida que a velocidade de medição aumenta, a distribuição das freqüências encontradas também varia;
- na medida que a velocidade de medição aumenta, aumenta proporcionalmente para um mesmo diâmetro o valor da variação do ângulo;
- o padrão de distribuição angular sugere que o sistema de controle da máquina possui níveis dentro dos quais a velocidade é controlada, que tenta manter o ângulo em média próximo ao valor nominal.

A constatação da irregularidade do espaçamento levou à necessidade de estudar o efeito dos dados não uniformemente espaçados sobre a transformada rápida de Fourier, usada no algoritmo de filtragem e na avaliação do conteúdo dinâmico do perfil. Espera-se com isso explicar melhor os comportamentos atípicos mostrados nas figuras 48 e 50.

4.5 INFLUÊNCIA DO ESPAÇAMENTO ANGULAR IRREGULAR

Para entender a influência do espaçamento angular no resultado da medição de circularidade, recorreu-se à análise do conteúdo dinâmico da linha circunferencial extraída pela MMC (dos casos com a mesma quantidade de pontos), usando como referência o conteúdo dinâmico da medição do padrão na MMF. Também foram analisados os histogramas dos espaçamentos angulares dessas medições. Estes resultados estão mostrados nas figuras 52 a 56.

Na figura 52 estão graficados os casos 11 e 16 que se caracterizam por terem sido medidos com a mesma força de medição, mesma velocidade e mesma quantidade de pontos.

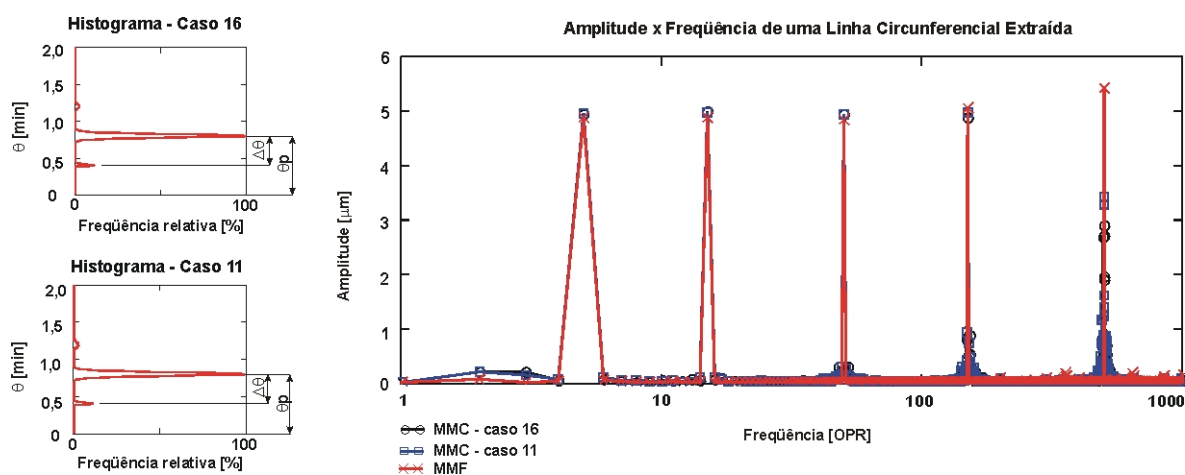


Figura 52: Análise da distribuição angular e análise do conteúdo dinâmico do sinal, avaliado com aplicação da FFT (casos 11 e 16 da tabela 10).

Como é óbvio, estes dois casos iguais apresentam o mesmo comportamento de variação do ângulo entre dois pontos consecutivos (ver histogramas à esquerda da figura). A análise do conteúdo dinâmico mostra que existe uma pequena variação da amplitude da onda de 500 OPR e, ao contrário do perfil adquirido com a MMF (gráfico em vermelho), a medição por coordenadas introduz erros de ovalização e de três lóbulos (componentes de 2 e 3 OPR) da ordem de 0,2 μm causados por erros geométricos da MMC e flexão do apalpador. Observa-se também que nas altas freqüências, surgem picos espúrios e que ambos os casos apresentam atenuação expressiva da amplitude na freqüência de 500 OPR, como já foi reportado na figura 50. Não obstante, considerando-se que a velocidade de medição de 1 mm/s é extremamente baixa para um diâmetro de 180 mm, conclui-se que estas freqüências não foram introduzidas pelo sistema de medição.

Na figura 53 estão expostos os dois casos 12 e 17, com 15000 pontos por revolução. Comparando os histogramas, pode-se notar que o padrão de distribuição angular não é o mesmo para os casos 12 e 17. A diferença entre a velocidade de medição de 1 mm/s e 2 mm/s, respectivamente, não justifica a variação encontrada na análise do conteúdo dinâmico porque a última ainda pode ser considerada uma velocidade de medição baixa para o diâmetro de 180 mm. Entretanto, o caso 17, assim como os casos 11 e 16, apresenta freqüências espúrias ao redor da principal. No entanto, o caso 12, assim como os casos 16 e 11, também foi obtido com uma velocidade de medição de 1 mm/s, porém com menor quantidade de pontos. Analisando-se o conteúdo dinâmico do caso 12, observa-se que os valores de amplitude de onda aproximam-se muito do valor obtido pela MMF. Esta análise do

conteúdo dinâmico é importante porque mostra que não é somente a quantidade de pontos ou a velocidade de medição que faz com que surjam frequências espúrias e sim a combinação das duas.

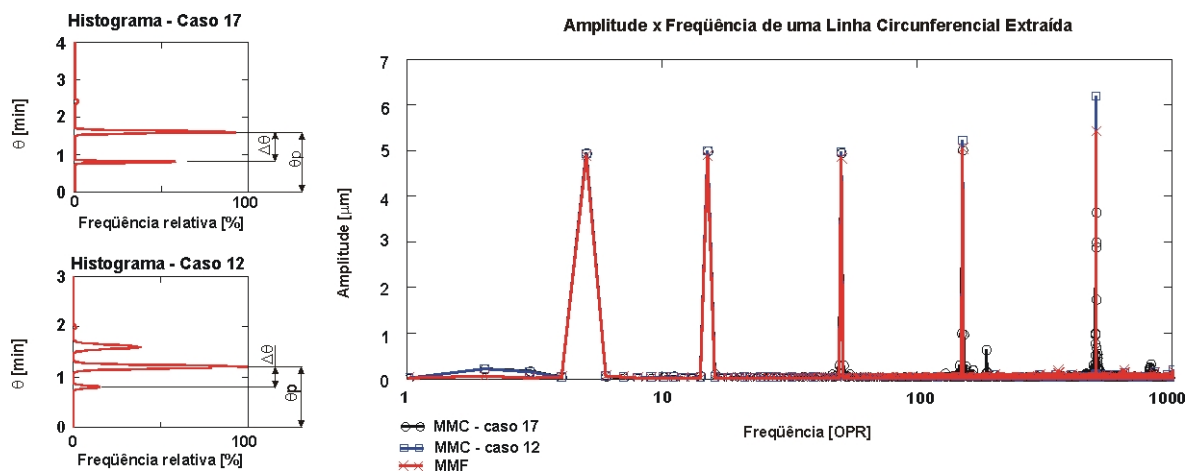


Figura 53: Análise da distribuição angular e análise do conteúdo dinâmico do sinal, avaliado com aplicação da FFT (casos 12 e 17 da tabela 10).

A figura 54 mostra os resultados da análise para os casos 13 e 18. Os histogramas da figura 54 mostram que, para o caso 18, a variação do ângulo aumentou junto com a velocidade de medição. No gráfico do conteúdo dinâmico do perfil, nota-se claramente o surgimento de frequências espúrias com amplitudes de aproximadamente $1,5 \mu\text{m}$. Para o caso 13 a variação do ângulo se mantém, porém a frequência relativa diminui. É importante dizer que se considerou a frequência relativa como sendo a relação entre as frequências e a frequência máxima, pois é sabido que estatisticamente a frequência relativa é encontrada dividindo-se a frequência observada em cada intervalo pelo número total de observações. Optou-se por esta relação, para que os valores calculados fossem encontrados entre 0 e 1, facilitando a análise comparativa.

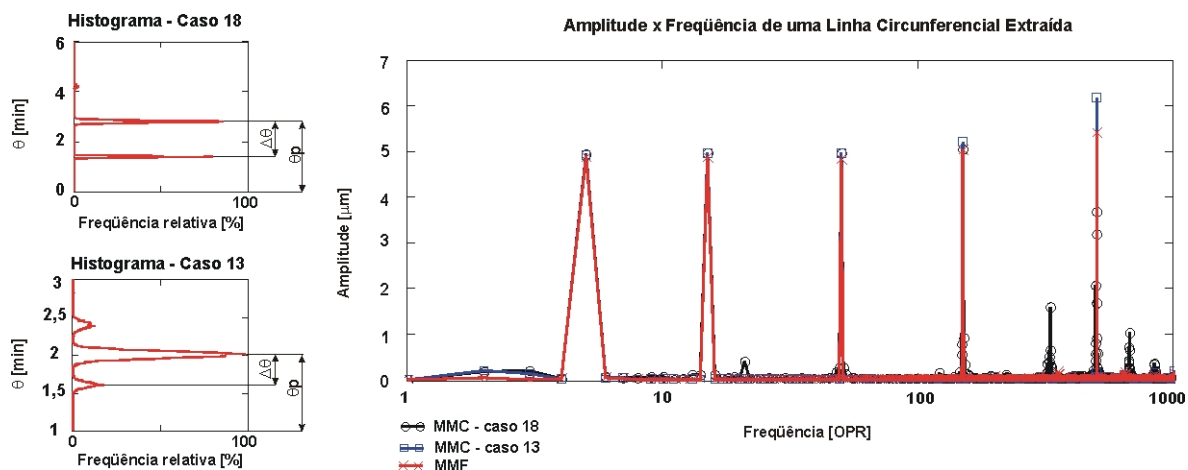


Figura 54: Análise da distribuição angular e análise do conteúdo dinâmico do sinal, avaliado com aplicação da FFT (casos 13 e 18 da tabela 10).

Continuando a análise, foi observado que os histogramas da figura 55 apresentam um comportamento similar aos da figura 54, somente que as diferenças entre o caso 14 e o 19 são mais marcantes ainda. Com o aumento da velocidade surgem ainda mais frequências espúrias e com a diminuição da quantidade de pontos a frequência relativa da variação do ângulo é bastante abrandada.

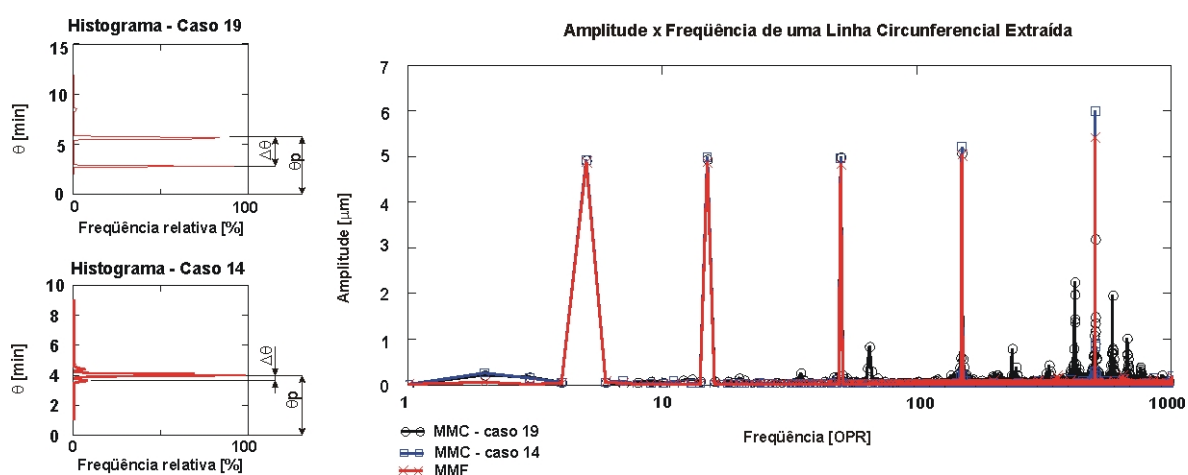


Figura 55: Análise da distribuição angular e análise do conteúdo dinâmico do sinal, avaliado com aplicação da FFT (casos 14 e 19 da tabela 10).

Por fim, ao analisar a figura 56 que corresponde aos casos extremos de diferenças de velocidades de medição, pode-se notar que o comportamento da variação do ângulo fica ainda mais evidente. No entanto, para o caso 15 a onda de 500 OPR foi perfeitamente detectada, embora não seja atendido o requisito de medir como mínimo 7 pontos por onda. Além disso, a alta velocidade de medição própria do caso 20 introduz uma ovalização de quase $1 \mu\text{m}$ e gera um grande número de picos espúrios a partir da frequência 50 OPR.

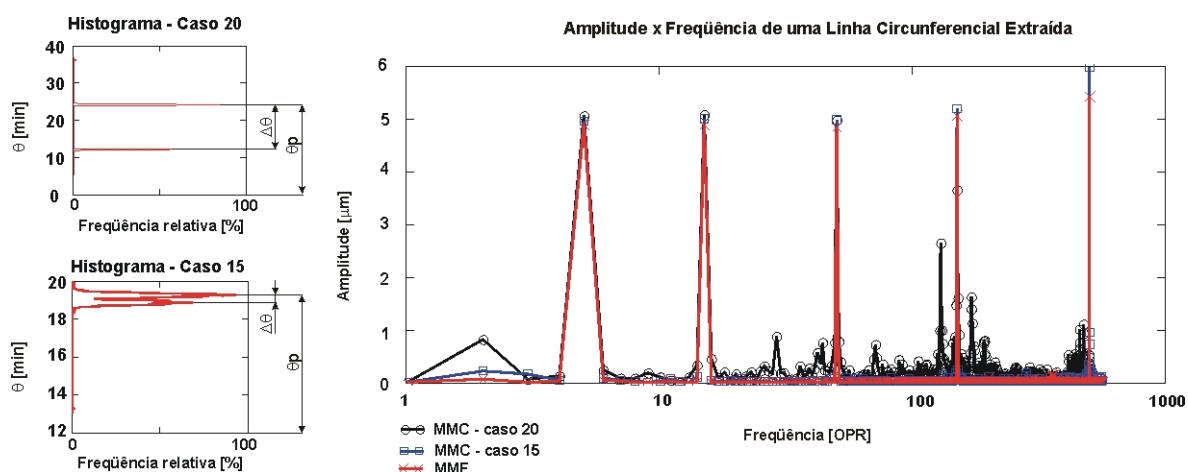


Figura 56: Análise da distribuição angular e análise do conteúdo dinâmico do sinal, avaliado com aplicação da FFT (casos 20 e 15 da tabela 10).

Os resultados reportados nesta secção estão resumidos na figura 50 e na tabela 16, na qual:

- θ_m : Valor médio do ângulo entre dois pontos consecutivos;
- $\Delta\theta$: Diferença aproximada entre as médias de dois agrupamentos de distâncias angulares no histograma (ângulo entre duas modas);
- θ_p : Valor aproximado da moda mais próxima a θ_m .

O cálculo do ângulo médio entre dois pontos consecutivos em minutos pode ser determinado pela equação 19.

$$\theta_m = \frac{360 \cdot 60}{N} \text{ [']} \quad \text{Equação 19}$$

Onde N corresponde ao número de pontos efetivamente adquiridos.

Tabela 16: Resumo das análise da influência do espaçamento angular.

Características						
Casos	θ_m [']	θ [']	$\Delta\theta$ [']	Velocidade	Número de	Taxa de

		(histogramas)	(histogramas)	[mm/s]	pontos (coletados)	aquisição [Pontos/s]
11	0,797	0,8	0,4	1,0	27114	47,95
12	1,299	1,2	0,4	1,0	16629	29,41
13	2,005	2,0	0,4	1,0	10773	19,05
14	4,007	4,0	0,4	1,0	5391	9,53
15	19,081	19,0	0,4	1,0	1132	2,00
16	0,796	0,8	0,4	1,0	27151	48,01
17	1,411	1,6	0,8	2,0	15307	54,14
18	2,295	2,8	1,4	3,5	9412	58,25
19	4,579	5,6	2,8	7,0	4719	58,42
20	20,869	23,5	12,0	30,0	1034	54,86

Através da análise das figuras acima e da tabela 16, pode-se chegar a duas conclusões interessantes, que se complementam. A primeira é que a amplitude da onda tende a ser melhor avaliada à medida que a taxa de aquisição diminui. A segunda conclusão é que o valor da variação do ângulo ($\Delta\theta$) aumenta proporcionalmente em função da velocidade de medição para um mesmo diâmetro e que os valores das amplitudes das ondas de alta frequência apresentam problemas sempre que o valor da variação do ângulo ($\Delta\theta$) é igual ou maior do que a metade do valor do ângulo médio θ_m . Pode-se observar ainda que esta relação também está diretamente relacionada à taxa de aquisição, como mostra a tabela 17.

Tabela 17: Relação entre ângulo médio, variação do ângulo e taxa de aquisição.

Casos	$\frac{\theta_m}{2}$ [°]	$\Delta\theta$ [°] (histogramas)	$\frac{\theta_m/2}{\Delta\theta}$	Taxa de aquisição [Pontos/s]
11	0,398	0,4	0,996	47,95
12	0,649	0,4	1,623	29,41
13	1,003	0,4	2,506	19,05
14	2,003	0,4	5,008	9,53
15	9,541	0,4	23,852	2,00
16	0,398	0,4	0,994	48,01
17	0,706	0,8	0,882	54,14
18	1,147	1,4	0,820	58,25
19	2,289	2,8	0,817	58,42
20	10,445	12,0	0,870	54,86

Outro aspecto importante que pode ser observado na tabela 16 é que o valor de θ se afasta de θ_m na medida em que a velocidade aumenta. Os valores dos ângulos entre dois pontos apresentam frequências relativas que se afastam do valor nominal,

mas que na média coincidem com θ_m . Isto significa dizer que na medida em que a velocidade aumenta os ângulos entre dois pontos tornam-se menos regulares.

Analisando-se as tabelas 16 e 17 é possível chegar a relações úteis. Por exemplo, o valor da variação do ângulo ($\Delta\theta$) em minutos pode ser calculado através da equação 20, que foi obtida empiricamente:

$$\Delta\theta \cong 72 \cdot \frac{v_{scan}}{\phi} \quad ['] \quad \text{Equação 20}$$

Onde, v_{scan} é a velocidade de *scanning* e ϕ é o diâmetro a ser medido.

Dividindo-se a metade do ângulo médio entre dois pontos consecutivos pelo valor variação do ângulo $\Delta\theta$, chega-se à equação 21:

$$\delta = \frac{\theta_m/2}{\Delta\theta} \quad \text{Equação 21}$$

Onde δ é uma variável adimensional.

Verifica-se que nos casos 12, 13, 14 e 15 não houve distorções relevantes do espectro. Assim, pode-se estabelecer que conjuntos de dados coletados apresentando valores de $\delta = (\theta_m/2)/\Delta\theta \geq 1,6$ não apresentarão problemas no uso da FFT, sendo por conseqüência desnecessário realizar qualquer pós tratamento dos dados. Quando valores de $\delta = (\theta_m/2)/\Delta\theta < 1,6$ são achados, a análise do conteúdo dinâmico será prejudicada, particularmente na região de altas freqüências. Assim, o valor 1,6 foi escolhido por representar a melhor relação entre velocidade de medição e quantidade de pontos, que corresponde a taxa de aquisição. Respeitando esse limite, os dados podem ser coletados sem que seja necessário um pós-tratamento. Esse comportamento é válido para freqüências de corte menores ou iguais a 500 OPR.

Substituindo-se a equação 19 e equação 20 na equação 21 e fazendo com que o resultado desta divisão seja igual a 1,6, chega-se à equação 22:

$$\frac{\left(\frac{360 \cdot 60}{N} \right)}{\left(\frac{72 \cdot v_{scan}}{\phi} \right)} \geq 1,6 \quad \text{Equação 22}$$

Trabalhando a equação 22 pode-se chegar à equação 23, que traz uma importante relação entre três importantes parâmetros para medição do desvio de circularidade:

$$\frac{\phi}{V_{scan}} \geq 0,011 \cdot N \quad \text{Equação 23}$$

Contudo ainda existe a possibilidade de manipular a equação 23 de forma que os dados de entrada correspondam aos parâmetros que o operador informa ao *software* para a execução do *scanning*, que no caso são a velocidade de medição em [mm/s] e a distância entre dois pontos consecutivos p em [mm]. A quantidade de pontos pode ser calculada através da equação 24.

$$N = \frac{\phi \cdot \pi}{p} \quad \text{Equação 24}$$

Substituindo a equação 24 na equação 23, chega-se à equação 25, que relaciona os parâmetros de entrada do *scanning*.

$$\frac{p}{V_{scan}} \geq 0,034 \quad \text{Equação 25}$$

Contudo ainda é necessário explicar a origem das freqüências espúrias na análise do conteúdo dinâmico. Como já foi mostrado, a intensidade desse fenômeno é determinada pelo valor de δ e, quanto menores são os valores de δ , maior é a atenuação das amplitudes a altas freqüências e mais densos e de maior amplitude se tornam os picos espúrios. Os valores da variável δ diminuem com a velocidade de *scanning*, mas também com o número de pontos por revolução.

Após uma análise detalhada dos resultados da FFT para os outros casos da tabela 10 e através de discussões com especialistas da área [69], pode-se afirmar que os picos espúrios não correspondem a ondas presentes na linha circunferencial extraída pela MMC, senão os que aparecem como consequência da aplicação da FFT aos dados não uniformemente espaçados.

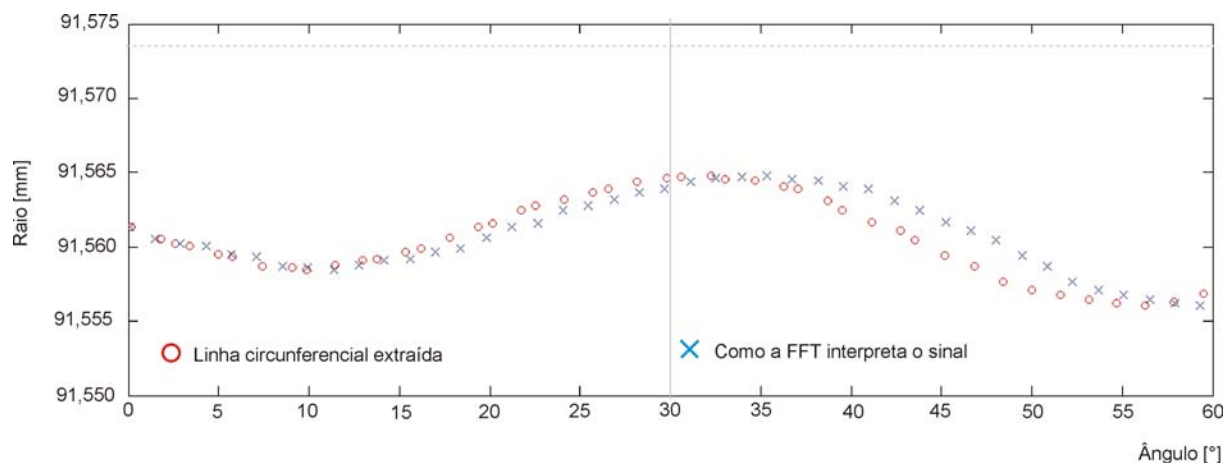
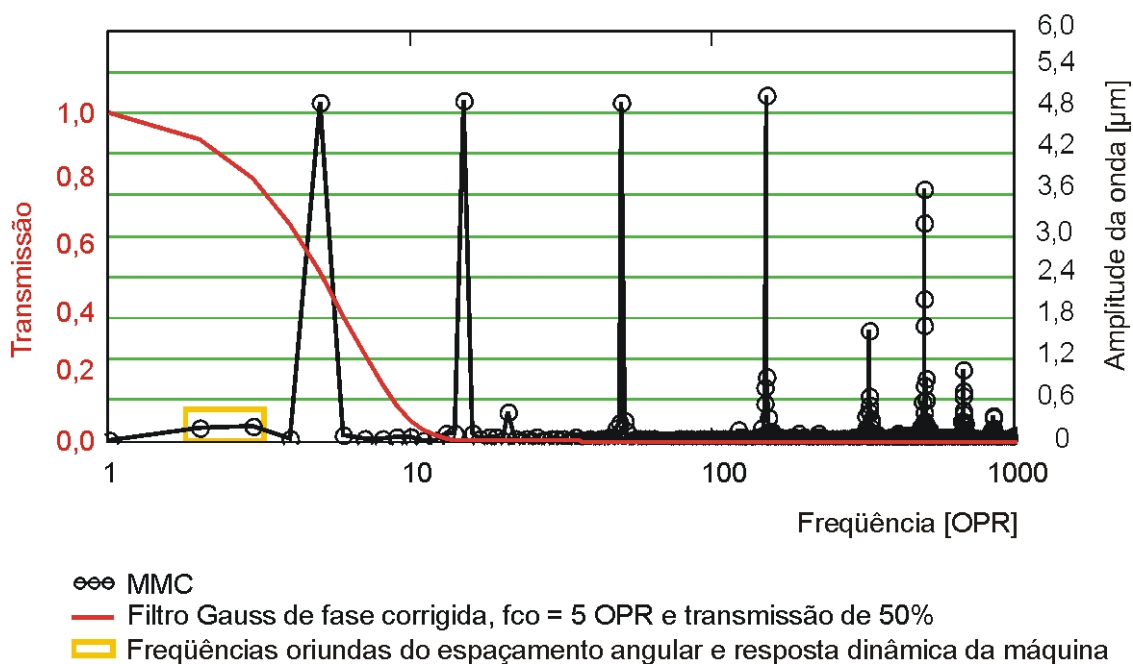


Figura 57: Linha circunferencial extraída com e sem espaçamento uniforme (caso 17 da tabela 10).

Analisando a figura 57, pode-se observar que existe uma grande diferença entre a linha circunferencial extraída (pontos em vermelho) e como a FFT interpreta este sinal (pontos em azul). Isso faz com que as amplitudes correspondentes às frequências altas sejam atenuadas em todos os casos e não somente naqueles que não cumprem com a regra dos sete pontos por período. As variações dos ângulos menores que o valor médio fazem com que surjam frequências acima da nominal, já as variações dos ângulos maiores causam o surgimento de frequências abaixo da frequência nominal.

Através da análise da figura 58, pode-se melhor compreender a figura 49. A característica de transmissão do filtro gaussiano de fase corrigida com frequências de corte de 5 OPR (figura 58, superior) e 500 OPR (figura 58, inferior) foi sobreposta à análise do conteúdo dinâmico. Pode-se constatar que as frequências espúrias são completamente filtradas para o caso da frequência de corte de 5 OPR, ao contrário do que acontece para a frequência de corte de 500 OPR.

Amplitude x frequência - desvio de forma (perfil de circularidade)



Amplitude x frequência - desvio de forma (perfil de circularidade)

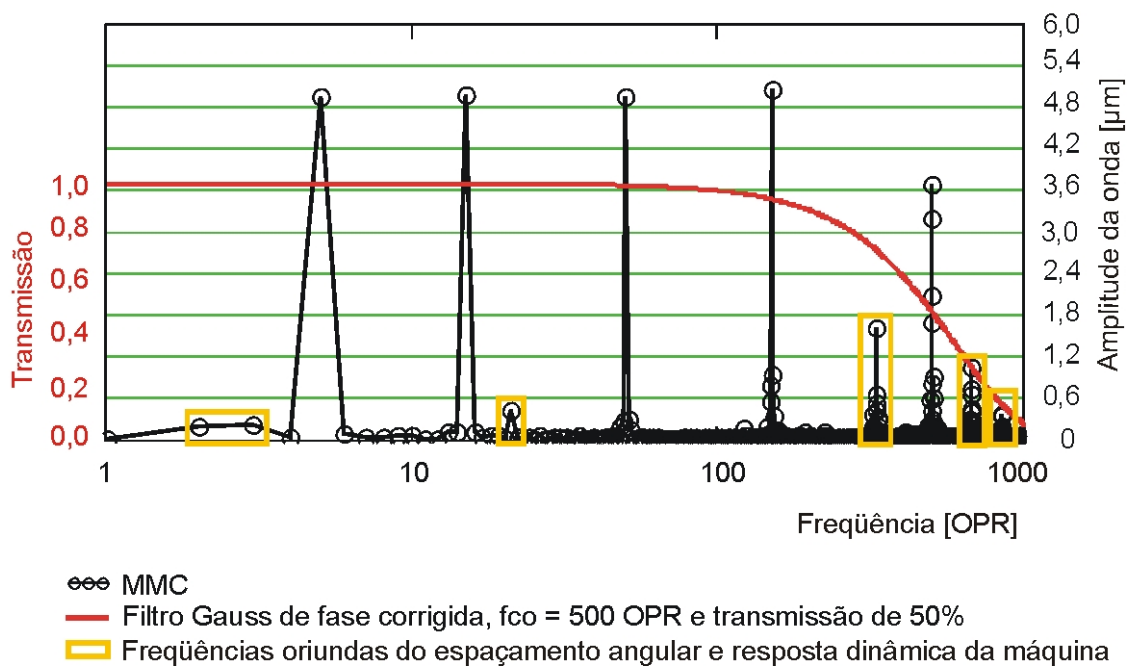


Figura 58: Influência do espaçamento irregular dos pontos de medição sobre a amplitude total pico-vale, analisada com aplicação da FFT (caso 18 da tabela 10).

4.6 INTERPOLAÇÃO LINEAR

Para diminuir o impacto a propriedade indesejável do espaçamento irregular dos dados brutos, desenvolveu-se um algoritmo de interpolação linear, que transforma a amostra obtida pela MMC numa amostra com espaçamento angular constante com $\theta_m = 360^\circ / N_{\text{coletado}}$. Fica assim definida uma nova linha circunferencial extraída, que cumpre com os requisitos para utilização correta da FFT, conforme pode ser visto na figura 59, onde estão plotados a linha circunferencial extraída (pontos em vermelho), como a FFT interpreta este sinal (pontos em azul) e a nova linha circunferencial extraída modificada com os dados interpolados (pontos em preto). Contudo, é necessário lembrar que a interpolação dos dados pode resultar em picos espúrios adicionais no espectro de amplitudes versus freqüências e/ou na divisão das linhas principais do espectro [61], [70].

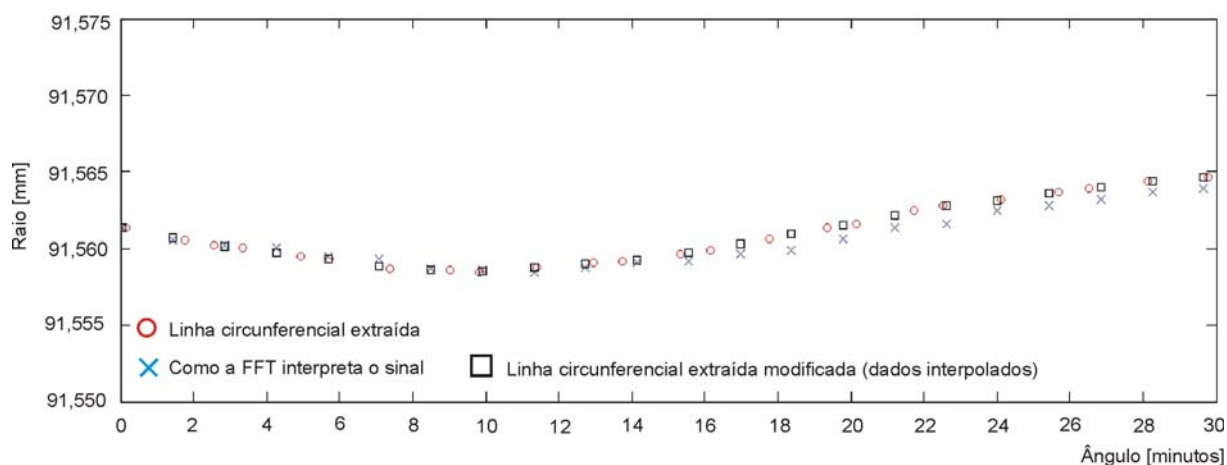


Figura 59: Linha circunferencial extraída com e sem espaçamento uniforme e como a FFT interpreta o sinal de entrada (caso 17 da tabela 10).

4.7 EFEITO DA INTERPOLAÇÃO NA AMPLITUDE TOTAL PICO-VALE

A figura 60 mostra o efeito da quantidade de pontos na amplitude total pico-vaie, calculada usando o método de ajuste LSCL, para dados interpolados e não interpolados e diferentes freqüências de corte do filtro. Os dados foram coletados a velocidade 1 mm/s (casos 11-15 da tabela 10).

Como foi visto anteriormente no item 4.4, os valores informados pela MMC são maiores que os valores verdadeiros convencionais obtidos por calibração na MMF, sendo que a diferença aumenta na medida em que a frequência de corte do filtro aumenta. Contudo, para frequências altas (500 OPR ou mais) e baixos números de pontos (menos de 5000 pontos por revolução), percebe-se uma discrepância entre os dados obtidos com e sem interpolação que merece ser analisada. Nos dados não interpolados, os valores de amplitude tendem a aumentar, quando caberia esperar que, para essas frequências de corte e essa quantidade de pontos, a amplitude começasse a mostrar evidências de atenuação por amostragem insuficiente. Os dados interpolados linearmente já mostram um comportamento mais próximo ao esperado, com uma significativa atenuação da amplitude quando o número de pontos por revolução é reduzido (i.e. menos de 5000 pontos).

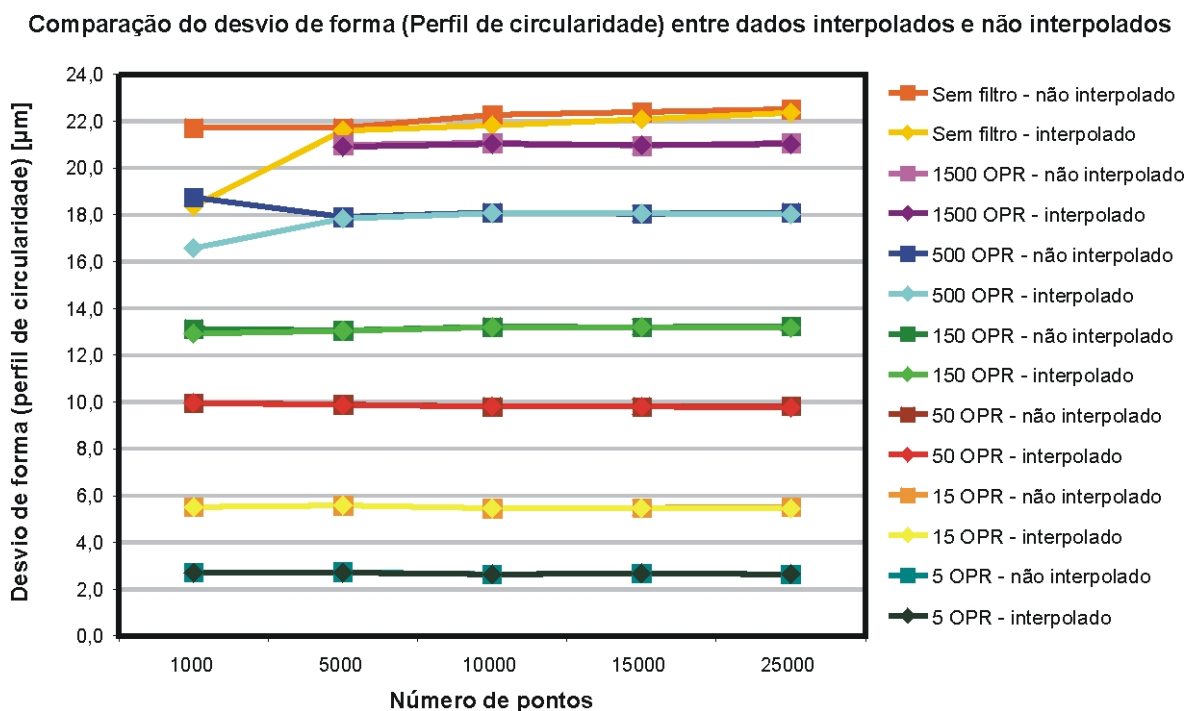


Figura 60: Efeito da quantidade de pontos no desvio de forma, avaliado pela amplitude total pico-vale, para dados interpolados e não interpolados e diferentes frequências de corte do filtro (casos 11 a 15 da tabela 10).

A figura 61 mostra os resultados de um estudo similar ao anterior, mas realizado sobre dados coletados com diferentes velocidades de *scanning* (casos 16 a 20 da tabela 10).

Nestes resultados, os valores de amplitude pico-vale tendem a aumentar na medida em que o número de pontos diminui e, conseqüentemente, a velocidade de

scanning aumenta. Em particular, os casos 18, 19 e 20 mostram amplitudes pico-vale que se afastam cada vez mais do valor de referência na medida em que a frequência de corte do filtro aumenta. Nesses casos, o recurso de interpolar linearmente para reduzir o efeito do espaçamento não uniforme não consegue diminuir o erro a valores aceitáveis.

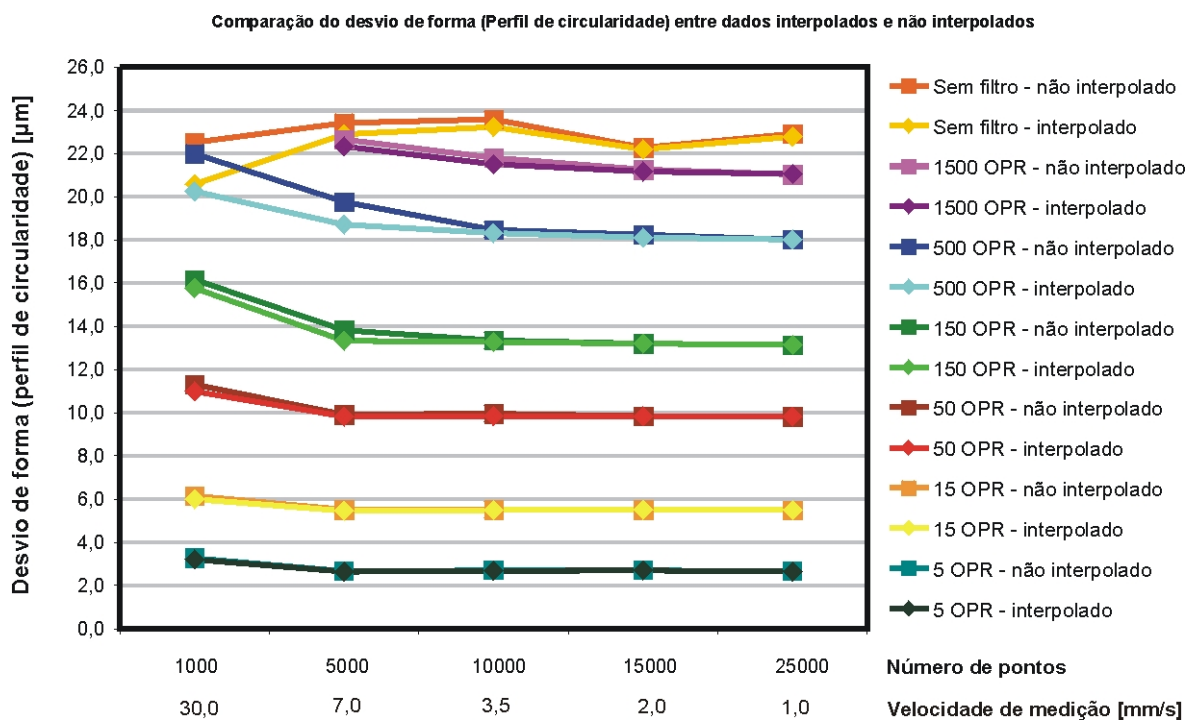


Figura 61: Efeito da quantidade de pontos no desvio de forma, avaliado pela amplitude total pico-vale, para dados interpolados e não interpolados e diferentes frequências de corte do filtro (casos 16 a 20 da tabela 10).

O fenômeno relatado no parágrafo anterior é efetivamente de interesse prático, pois se produz para combinações de frequência de corte e números de pontos que atendem as exigências mínimas de amostragem. Cabe lembrar que as demandas de elevar a produtividade levariam a selecionar sempre que possível a mínima quantidade de pontos por revolução que é compatível com a maior frequência de interesse. Assim, por exemplo, na medição de circularidade de um cilindro de 200 mm de diâmetro seria recomendável utilizar uma frequência de corte de 500 OPR, para a qual o número mínimo de pontos por revolução é 3500 [25]. Nessa condição, o erro total detectado na medição do padrão de múltiplas ondas é de aproximadamente 4 μm para perfil não interpolado (i.e. ~20% da amplitude total pico-vale de referência) e 2,5 μm para perfil interpolado, o qual é ainda um valor alto de erro (i.e. ~13% da amplitude total pico-vale de referência).

Contudo, os resultados obtidos na medição da amplitude pico-vale não são suficientes para concluir sobre o desempenho da MMC na medição de circularidade por *scanning*. Maiores esclarecimentos serão possíveis com aplicação da transformada rápida de Fourier para estudo do conteúdo dinâmico da linha circunferencial extraída.

4.8 EFEITO DA INTERPOLAÇÃO NO CONTEÚDO DINÂMICO DO SINAL

Para elucidar os aspectos levantados no item anterior, foi comparado o conteúdo dinâmico da linha circunferencial extraída pela MMC com o conteúdo dinâmico da linha circunferencial modificada por interpolação linear.

A figura 62 mostra os resultados desta comparação para o caso 18 da primeira etapa tabela 10, caracterizado por apresentar uma diferença relativamente baixa entre as amplitudes pico-vale obtidas com e sem interpolação (figura 61). Pode-se observar que a transformada do perfil obtido pela MMC sem interpolação (em preto) se afasta significativamente da referência (em vermelho), notadamente na região de altas frequências em particular, o pico de 500 OPR aparece desdobrado em vários picos de frequências muito próximas, mas de amplitudes menores. Além disso, outros picos de amplitudes não desprezíveis foram gerados entre 250 e 1000 OPR. Alguns desses picos coincidem com marcações de amplitudes igualmente baixas presentes na referência.

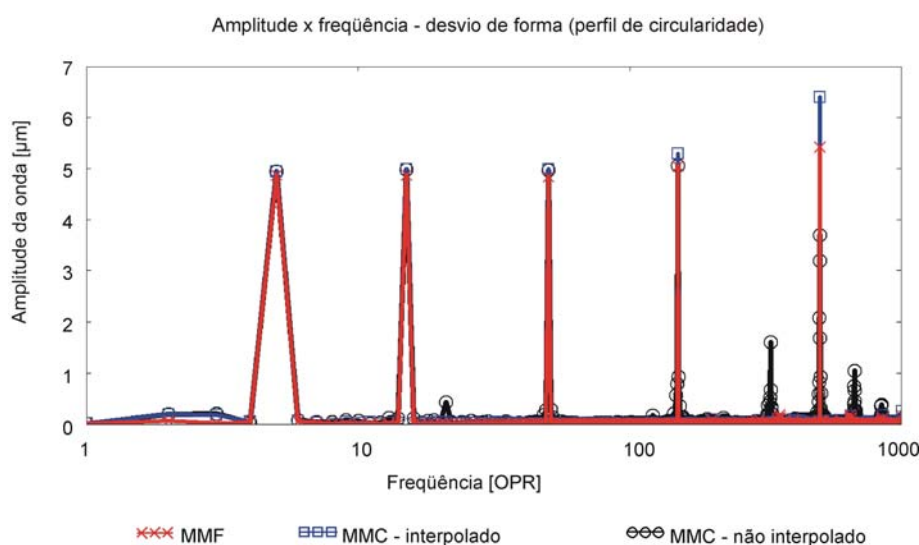


Figura 62: Efeito da interpolação linear dos dados brutos sobre o conteúdo dinâmico do sinal, avaliado com aplicação da FFT (caso 18 da tabela 10).

A distorção do espectro é minimizada significativamente quando os dados são interpolados linearmente (linha azul). Porém, verifica-se um aumento de 1 μm na amplitude do pico de 500 OPR e também um ligeiro incremento da amplitude da onda de 150 OPR.

Esse fenômeno pode ser mais bem observado na figura 63, que mostra os valores de amplitude de onda obtidos com aplicação da FFT a dados interpolados e não interpolados. Pode-se observar que as mudanças se concentram nas ondas de frequências a partir de 50 OPR, mas tornam-se expressivas para 150 e 500 OPR. Nesses casos, o perfil não interpolado apresenta amplitudes menores que o perfil interpolado, devido à atenuação nessas frequências específicas.

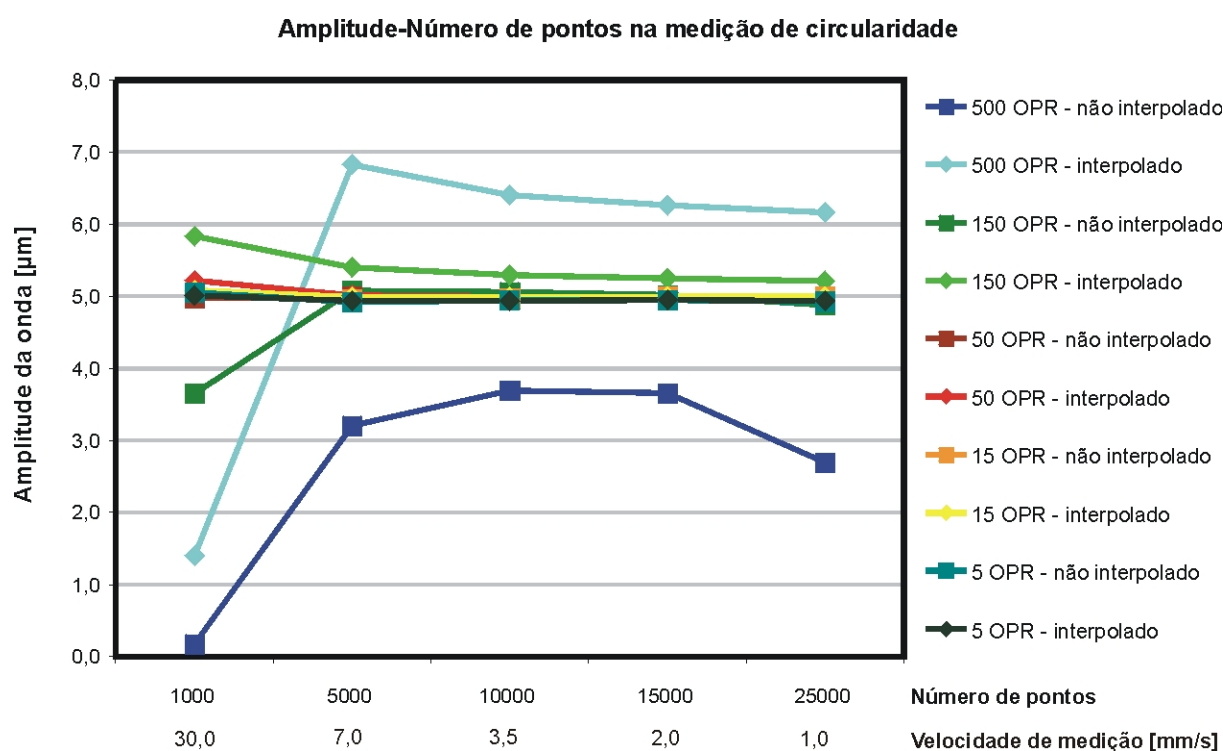


Figura 63: Comparação entre resultados obtidos aplicando FFT aos dados brutos e aos dados interpolados linearmente (casos 16 a 20 da tabela 10).

É importante notar que a componente de 500 OPR apresenta um comportamento interessante quando avaliada a partir de dados não interpolados. Para um reduzido número de pontos (caso 20), a atenuação é devida principalmente à amostragem insuficiente, mas também ao desdobramento do pico de 500 OPR em múltiplos picos espúrios, associados a um alto valor de $\Delta\theta$, próprio das elevadas velocidades de *scanning*. No outro extremo, quando um elevado número de pontos é usado (caso 16), o valor de $\Delta\theta$ é menor, mas também se reduz o valor de θ_m ,

resultando novamente em valores altos da variável adimensional δ . Isso também gera um desdobramento do pico de 500 OPR em múltiplos picos espúrios, caracterizando uma atenuação significativa desse componente do sinal. A mesma componente, avaliada usando dados interpolados, mostra valores maiores de amplitude em todos os casos.

Finalizando esta etapa da dissertação pode-se utilizar os conceitos até então discutidos para entender melhor o comportamento da amplitude pico-vale nas diversas condições de medição. É de particular interesse explicar porque a interpolação apresenta pouca influência na amplitude, embora possua efeito relevante na reconstrução do conteúdo dinâmico do perfil.

Os resultados informados na figura 60 mostram que, quando a velocidade de *scanning* é baixa, a quantidade de pontos adquiridos por revolução não tem influência expressiva na amplitude pico-vale, sempre que as exigências mínimas de amostragem sejam respeitadas (i.e. como mínimo 7 pontos amostrados por período da onda de maior frequência). Também não se observam diferenças marcantes entre o uso de dados interpolados ou não interpolados, para todas as combinações válidas de número de pontos e frequência de corte do filtro. Dois fatores contribuem para que a mudança na amplitude pico-vale não seja significativa, ainda nos casos em que se pode esperar que as componentes de alta frequência sejam afetadas pelo uso da FFT em conjuntos de dados não uniformemente espaçados (e.g. caso 11 da tabela 10). O primeiro desses fatores é que as componentes de alta frequência constituem só uma parte da amplitude total pico-vale. Assim, quando a componente de 500 OPR existente no perfil é atenuada, o efeito dessa mudança na amplitude total é pouco perceptível. O segundo fator está relacionado à característica de transmissão do filtro gaussiano, ilustrada na figura 16. Como foi visto na figura 58, superpondo essa característica de transmissão com o gráfico de frequências versus amplitudes, pode-se observar que tanto a onda de 500 OPR como as ondas espúrias de frequências próximas a 500 OPR são transmitidas pelo filtro quando a frequência de corte é definida para 500 OPR ou mais. Assim, a perda de amplitude da onda de 500 OPR associada à atenuação fica parcialmente compensada pela contribuição das amplitudes das ondas espúrias.

Já nos casos caracterizados por alta velocidade de *scanning*, particularmente nos casos 19 e 20 da tabela 10, o fenômeno de geração de picos espúrios é intenso e produz, devido ao segundo fator mencionado, um aumento da amplitude total pico-vale.

A interpolação linear não corrige completamente os valores da amplitude, embora elimine os picos espúrios do espectro, como mostrado na seção anterior.

4.9 INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO DO SENSOR

Nesta etapa, o padrão KOMBI-MWN 1 foi medido com dois sensores de diâmetros diferentes, três vezes cada, de forma que se pudesse verificar a repetitividade da MMC na medição por *scanning*, analisar a influência do diâmetro do sensor e gerar dados que pudessem ser utilizados no algoritmo de filtro morfológico. Essas características foram apresentadas no capítulo anterior item 3.6 .

4.9.1 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO DO SENSOR NO CONTEÚDO DINÂMICO

Nas figuras 64 e 65 estão graficados os conteúdos dinâmicos das linhas circunferenciais extraídas com e sem interpolação dos casos 1 e 4 da tabela 12. Ambos os casos apresentam valores baixos da relação $\delta = (\theta m/2)/\Delta\theta$, de forma tal que as ondas de mais altas freqüências são atenuadas, mesmo com muito mais de sete pontos por onda, devido ao princípio de funcionamento da FFT. Contudo, a análise do conteúdo dinâmico com sensor de diâmetro de 8,0 mm (figura 65) apresenta muito mais freqüências espúrias que com o diâmetro de 1,5 mm ao redor da freqüência de 500 OPR, embora ambos os sensores tenham alta rigidez. Nota-se também que as freqüências espúrias surgiram ao redor de freqüências já existentes no sinal de referência.

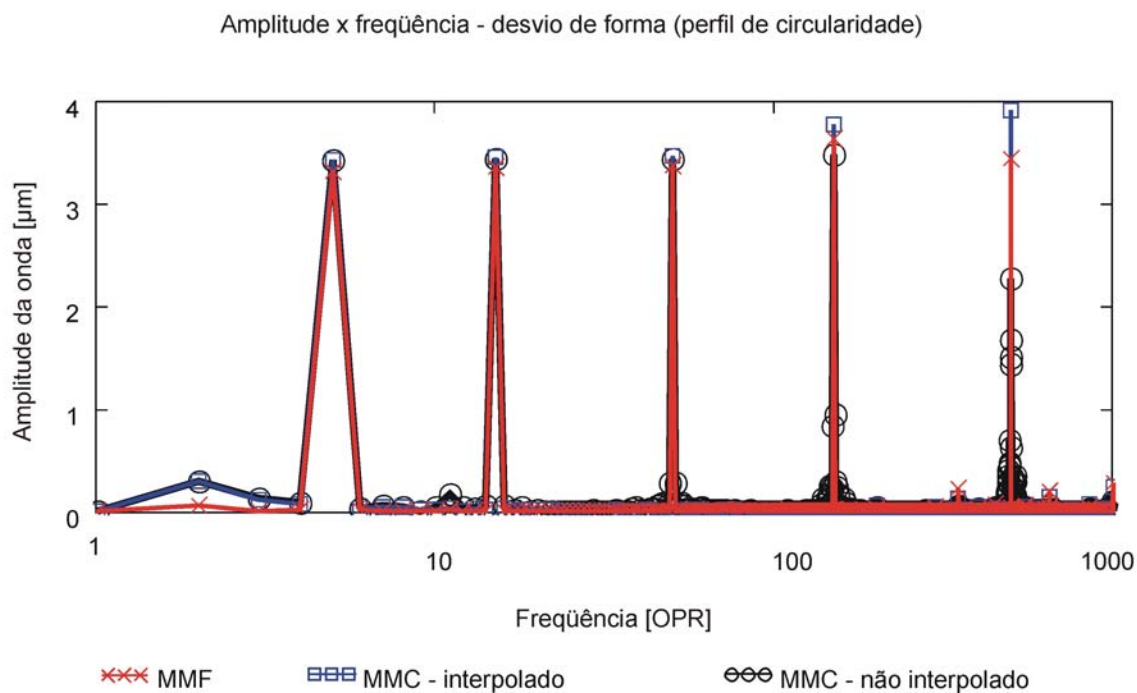


Figura 64: Influência do diâmetro de 1,5 mm no conteúdo dinâmico do sinal, avaliado com aplicação da FFT (caso 1 da tabela 12).

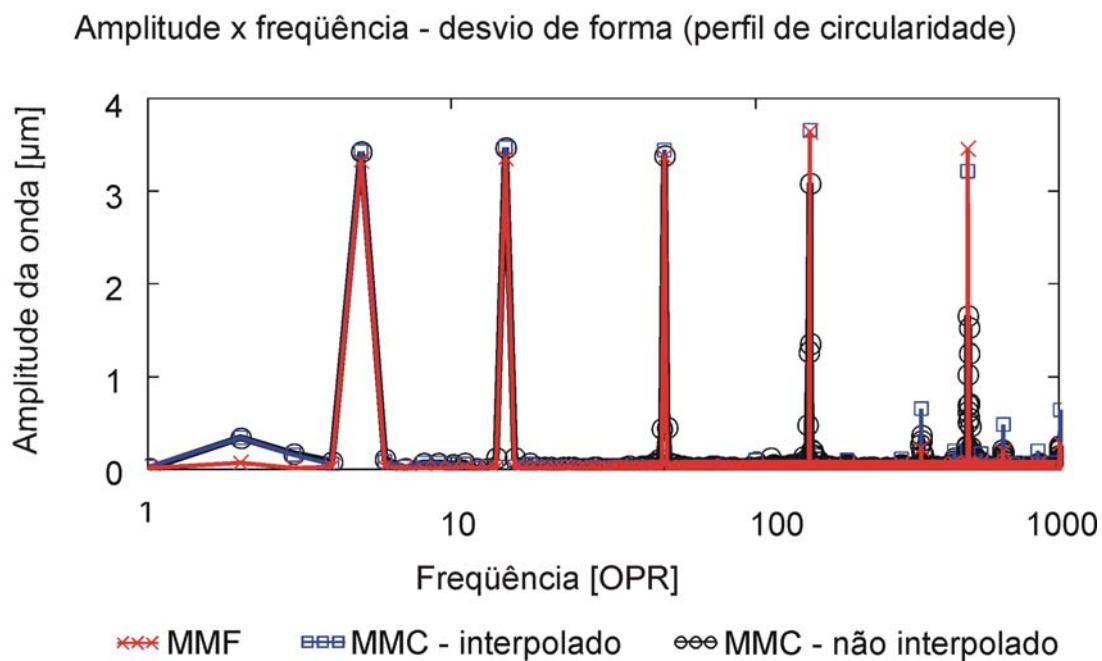


Figura 65: Influência do diâmetro de 8,0 mm no conteúdo dinâmico do sinal, avaliado com aplicação da FFT (caso 4 da tabela 12).

4.9.2 INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO DO SENSOR NA QUANTIDADE DE PONTOS

Na figura 66 se comprova que com um diâmetro de 1,5 mm a MMC adquiriu aproximadamente 26150 pontos com uma variação em torno de 100 pontos entre uma repetição e outra. Já com o sensor de 8,0 mm de diâmetro, a quantidade de pontos baixou para 25800 pontos e a variabilidade aumentou para 200 pontos. Isso aconteceu apesar dos parâmetros de *scanning* para ambos os casos serem os mesmos.

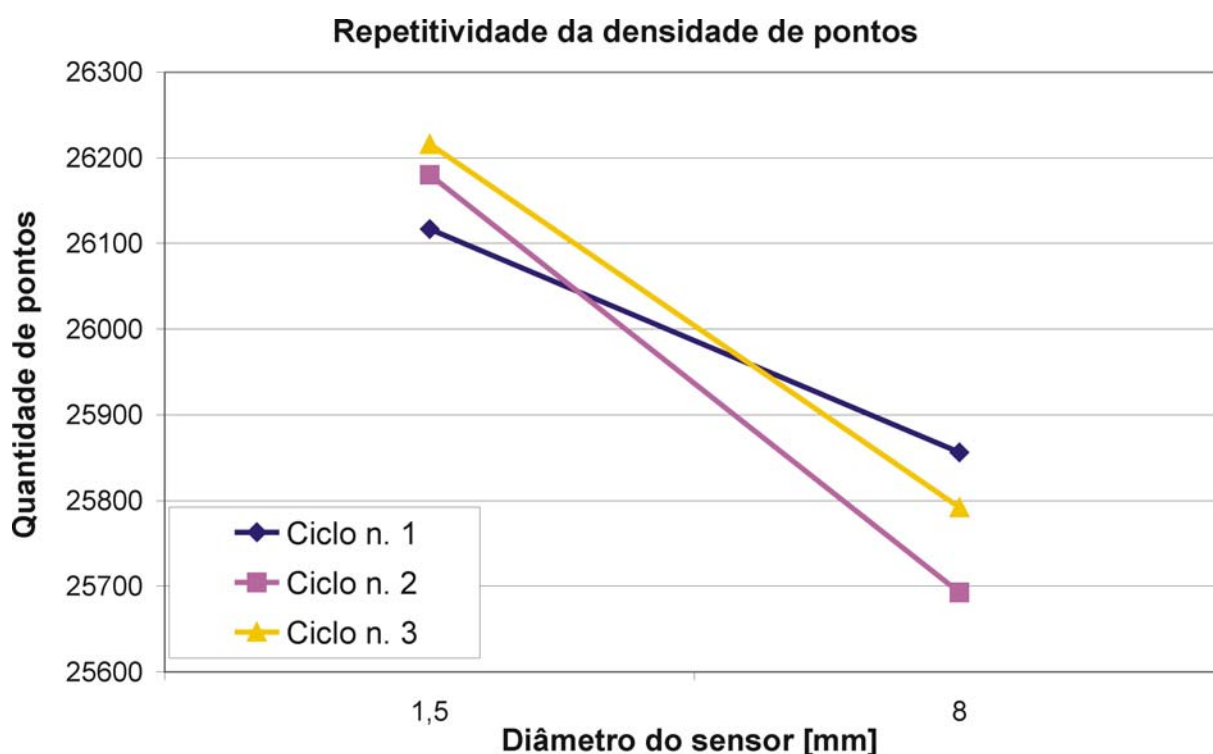


Figura 66: Repetitividade da quantidade de pontos para diferentes sensores (casos 1 a 6 da tabela 12).

Analisando os conteúdos dinâmicos dos outros casos da tabela 12 (não mostrados) verifica-se que assim como foi analisado no item 4.4 sempre que o conteúdo dinâmico apresenta picos espúrios, a quantidade de pontos adquiridos será menor que o nominal e a dispersão será maior. Este comportamento foi causado pelo diâmetro do sensor, já que as condições dinâmicas para o sensor de 8,0 mm eram mais favoráveis uma vez que a velocidade angular para esse diâmetro é menor (equação 26).

$$w = \frac{V_{scan}}{r}$$

Equação 26

Os resultados desta seção permitem expressar uma recomendação com referência à seleção do tamanho de sensor para avaliação de circularidade por *scanning*. Fica evidente que sensores menores devem ser preferidos, sempre que garantam uma rigidez suficiente como para que componentes dinâmicas espúrias não sejam introduzidas.

4.9.3 INFLUÊNCIA DA FREQUÊNCIA DE CORTE DO FILTRO E O DIÂMETRO DO SENSOR NA AMPLITUDE TOTAL PICO-VALE

Na tabela 18 estão apresentados os valores avaliados sem filtro e com filtro gaussiano de fase corrigida com transmissão de 50%, frequências de corte 15, 50, 150, 500 OPR com círculo de referência LSCI e parâmetro avaliado RONt, obtidos na segunda etapa para os dois diferentes diâmetros dos sensores.

Os resultados da tabela 18, foram obtidos diretamente do *software* UMESS da MMC e não sofreram nenhum tratamento externo.

Tabela 18: Valores da amplitude pico-vale obtidos com sensores de diferentes diâmetros.

Frequência de corte [OPR]	Ciclo	Diâmetro do sensor 1,5 mm [μm]	Diâmetro do sensor 8,0 mm [μm]
Sem filtro	Ciclo 1	15,2	15,2
	Ciclo 2	15,4	15,7
	Ciclo 3	15,1	15,3
500	Ciclo 1	12,5	12,2
	Ciclo 2	12,5	12,2
	Ciclo 3	12,5	12,2
150	Ciclo 1	9,3	9,3
	Ciclo 2	9,3	9,3
	Ciclo 3	9,3	9,3
50	Ciclo 1	6,8	6,9
	Ciclo 2	6,9	6,9
	Ciclo 3	6,9	6,9
15	Ciclo 1	3,9	3,9
	Ciclo 2	3,9	3,9
	Ciclo 3	3,9	3,9

Observa-se que, como era previsível, somente a amplitude total pico-vale para a frequência de corte de 500 OPR foi diminuída de 12,5 μm (diâmetro 1,5 mm) para 12,2 μm (diâmetro de 8,0 mm). Outras características importantes que se pode notar nessa tabela são que a aplicação de um filtro melhora significativamente a repetitividade dos

resultados e que a escolha de um diâmetro de sensor errado pode ser menos significativa que a escolha da frequência de corte. Contudo não se deve descuidar da escolha do diâmetro do sensor, já que essa diferença é tanto mais significativa quanto maior for a profundidade Wt e menor o erro de forma.

4.10 FILTRO MORFOLÓGICO

Para diminuir o efeito da filtragem mecânica nos casos 4 a 6 da tabela 12, foi aplicado um algoritmo de reconstrução (i.e. operação morfológica de erosão) aos dados da linha circunferencial extraída. A título de investigação o mesmo foi feito para os casos 1 a 3 da tabela 12, apesar de que teoricamente o diâmetro do sensor de 1,5 mm não deveria produzir nenhuma atenuação do sinal. Também se verificou a influência do espaçamento irregular dos pontos de medição na aplicação do algoritmo de reconstrução. Isso foi verificado através da utilização de dados brutos e dos mesmos dados interpolados linearmente.

Na tabela 19 são apresentados os valores medidos de amplitude total pico-vale para os dados da linha circunferencial extraída, com e sem a aplicação do algoritmo de reconstrução de perfil, para os diâmetros dos sensores de 1,5 mm e 8,0 mm.

Tabela 19: Aplicação do algoritmo de reconstrução aos dados da linha circunferencial extraída dos casos 1 a 6 da tabela 12.

Dados sem interpolação			
Diâmetro 1,5 mm		Diâmetro 8,0 mm	
Sem filtro e sem reconstrução [μm]	Sem filtro e com reconstrução [μm]	Sem filtro e sem reconstrução [μm]	Sem filtro e com reconstrução [μm]
15,3	15,1	15,1	14,4
15,5	15,2	15,7	14,6
15,1	15,0	15,3	14,4

Com este algoritmo de reconstrução esperava-se recuperar parte da amplitude atenuada pela filtragem mecânica causada pelo sensor de 8,0 mm. Contudo, ao analisar a tabela 19 pode-se observar que o algoritmo de reconstrução atuou como um filtro passa-baixas para ambos os diâmetros dos sensores de forma que os valores de amplitude pico-vale obtidos após reconstrução, ao contrário do que era esperado, diminuíram. Por exemplo, no caso do diâmetro do sensor de 1,5 mm a redução foi de

aproximadamente 0,2 μm , sendo que por este diâmetro não ter teoricamente causado nenhuma filtragem mecânica o algoritmo de reconstrução não deveria ter alterado o valor da amplitude pico-vale. Já para os casos com o diâmetro do sensor de 8,0 mm a atenuação foi ainda maior chegando a 1,1 μm para o caso 5. Esses resultados foram totalmente inesperados e contrários à teoria. Em função do que já foi visto na tabela 18, decidiu-se verificar o efeito do algoritmo de reconstrução apenas para a frequência de corte de 500 OPR. Na tabela 20 pode-se observar que o valor da amplitude total pico-vale para a frequência de corte de 500 OPR com o algoritmo de reconstrução também foi atenuado. Esta diminuição já era esperada, uma vez que o filtro gaussiano de fase corrigida é aplicado nos dados já afetados pelo filtro morfológico, como pode-se notar na tabela 19.

Tabela 20: Análise da influência do algoritmo de reconstrução para perfis de circularidade filtrados com frequência de corte de 500 OPR.

Dados sem interpolação			
Diâmetro 1,5 mm		Diâmetro 8,0 mm	
500 OPR e sem reconstrução [μm]	500 OPR e com reconstrução [μm]	500 OPR e sem reconstrução [μm]	500 OPR e com reconstrução [μm]
12,6	12,5	12,2	12,2
12,7	12,6	12,3	12,4
12,6	12,6	12,1	12,3

Suspeitou-se que a atenuação dos resultados estava ocorrendo devido à distribuição não uniforme dos pontos. Assim, decidiu-se aplicar o algoritmo de interpolação linear à linha circunferencial extraída antes do algoritmo de reconstrução.

Na tabela 21, pode-se observar que o algoritmo de reconstrução não é afetado pela distribuição irregular dos pontos uma vez que os resultados após a aplicação do filtro morfológico com e sem interpolação são os mesmos.

Tabela 21: Análise da influência do algoritmo de reconstrução em dados interpolados linearmente.

Dados com interpolação			
Diâmetro 1,5 mm		Diâmetro 8,0 mm	
500 OPR e sem reconstrução [μm]	500 OPR e com reconstrução [μm]	500 OPR e sem reconstrução [μm]	500 OPR e com reconstrução [μm]
12,5	12,5	12,2	12,2
12,5	12,6	12,2	12,4
12,6	12,6	12,2	12,3

Conforme já foi discutido no item 2.2.5, sempre ocorre uma distorção nos dados que descrevem uma superfície, obtidos com qualquer elemento de contato. Uma aquisição perfeita da superfície somente é possível se o raio local de curvatura é maior que o diâmetro do sensor esférico usado na medição, para todos os pontos da superfície da peça. Além disso, a distância de amostragem deve ser menor que o raio do sensor.

Pôde-se perceber, através dos resultados apresentados na tabela 18, que o valor da amplitude pico-vale é reduzido quando se usam sensores maiores, que não atendem a condição acima. Isso prova que a filtragem mecânica atua produzindo o efeito de uma operação morfológica de dilatação. No entanto, os resultados das tabelas 20 e 21 mostraram que a tentativa de recuperar a amplitude atenuada pelo uso do sensor de 8,0 mm fracassou parcialmente. Somente duas das três repetições na tabela 21 mostraram alguma recuperação. Dessas duas, só uma se aproxima em valor à atenuação de 0,3 μm observada na tabela 18.

Esse fracasso na aplicação da reconstrução pode se dever ao fato da esfera de 8,0 mm estar perto do valor limite de 7,0 mm, que não produz efeito de filtragem mecânica. Assim, as diferenças observadas são pequenas e a magnitude da reconstrução também o será. A medição com uma esfera ainda maior (e.g. 10,0 mm) poderia produzir diferenças mais expressivas, que superassem em valor outros ruídos existentes. Infelizmente, esse sensor não estava disponível quando as medições foram realizadas.

Na opinião do autor desta dissertação, o filtro morfológico ainda está em uma fase de desenvolvimento muito teórica e alguns aspectos práticos, que não são mencionados na teoria, afetam o resultado da sua aplicação a casos reais. Entre esses aspectos, cabe citar os efeitos tribológicos e dinâmicos (e.g. *stick-slip*, descolamento do sensor, micro-saltos) e a resolução do sistema de aquisição de dados, que no caso da MMC e considerando a transformação cartesiana para polar, não é uniforme ao longo de todo o percurso circunferencial.

4.11 SIMULAÇÃO

O objetivo principal desta simulação é verificar a influência da quantidade de pontos sem o efeito da variação do ângulo e sem as fontes de influência inseridas pela

MMC. Para isso, criou-se um perfil padrão por simulação, usando a máxima quantidade de pontos que a tecnologia atual de *scanning* permite adquirir, que é de 75000 pontos. O modelo também permite que a posição de início da medição seja mudada com referência ao zero angular do padrão, de forma que a dispersão dos valores associados a distintos pontos de início possa ser quantificada.

Por exemplo, com uma quantidade de 75000 pontos o ângulo entre dois pontos consecutivos corresponde a 0,288', quando o mesmo perfil for medido com a metade da quantidade, ou seja, 37500 o ângulo entre dois pontos consecutivos será o dobro, 0,576' e o perfil poderá ser medido em duas posições diferentes.

A figura 67 ilustra, de forma simplificada, o princípio de funcionamento do algoritmo de simulação. O perfil em vermelho obtido com 12 pontos ($\theta = 30^\circ$) corresponde ao perfil verdadeiro. Caso o mesmo perfil fosse medido com a metade dos pontos, dois perfis poderiam ser obtidos; perfil em azul e perfil em preto, cada um com um valor de desvio de circularidade diferente.

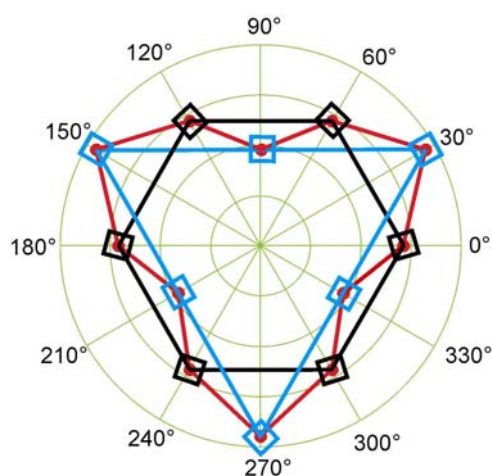


Figura 67: Figura ilustrativa do princípio de funcionamento do algoritmo de simulação.

O erro encontrado na simulação corresponde ao valor da amplitude total pico-va-le, para um círculo de referência LSCI, que foi escolhido em função do tempo de simulação e devido a diferença para o círculo de referência MZCI ser muito pequena em perfis simétricos.

Simulou-se um conjunto com dez quantidades de pontos submúltiplos de 75000 diferentes: 100, 150, 250, 500, 1000, 2500, 5000, 12500, 25000 e 37500 pontos. O perfil foi simulado para um raio de 80 mm, possuindo cinco componentes harmônicas de 3,5 μm de amplitude, nas frequências 5, 15, 50, 150 e 500 OPR.

Na figura 68 pode-se observar o comportamento da amplitude total pico-vale para as diferentes quantidades de pontos. O valor do desvio de circularidade diminui na medida em que a quantidade de pontos utilizados para discretizar o perfil também diminui. Outro aspecto que se pode visualizar é que a variação entre o máximo e o mínimo erro de circularidade aumenta com a diminuição da quantidade de pontos.

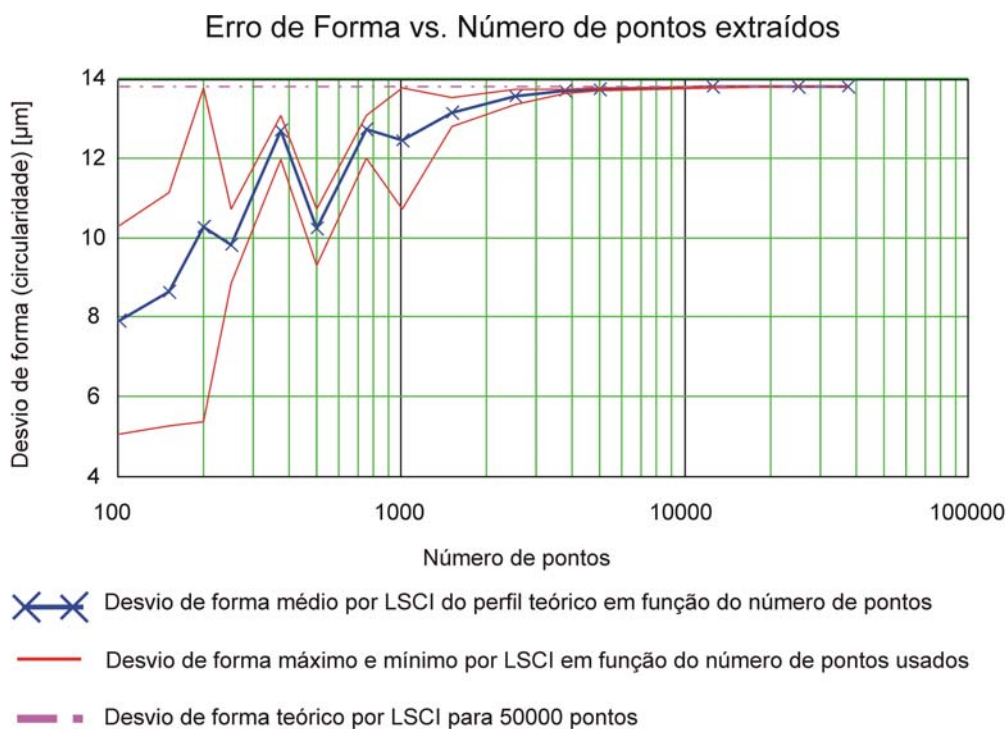


Figura 68: Desvio de circularidade em função da quantidade de pontos.

Os dados da tabela 22 correspondem ao gráfico da figura 68. Analisando esta tabela pode-se notar que o valor da amplitude total pico-vale do desvio de circularidade tende a convergir ao VVC à medida que o número de pontos aumenta e que a influência da posição de início vai diminuindo. Contudo esta diminuição não está diretamente associada à quantidade de pontos, como pode ser visto na tabela 22 para as quantidades de 150 e 1000 pontos. Essa variação é devida ao padrão ser constituído por ondas de frequências que não são múltiplas entre si. Essa característica faz com que exista uma interdependência entre a quantidade de pontos da amostra e a disposição das ondas no padrão. Assim, pode acontecer casos em que se produzem atenuações extraordinárias ou em que a atenuação real é menor que a esperada. De forma similar opera a variação devida ao ponto de início da medição.

Tabela 22: Influência da quantidade de pontos e posição de início de medição do perfil.

Número de pontos	Desvio de circularidade RONT [μm]	Varição aproximada do valor do desvio de circularidade RONT em função da posição de início de medição [μm]
100	7,90	±2,85
150	8,63	±3,38
250	9,81	±0,97
500	10,22	±0,93
1000	12,44	±1,71
2500	13,56	±0,19
5000	13,742	±0,025
12500	13,7935	±0,0051
25000	13,8010	±0,0024
37500	13,8022	±0,00096
75000	13,80316	0

Finalizando esta fase de análise da influência da quantidade de pontos, fez-se uma avaliação do erro relativo devido a quantidade de pontos utilizada para descrever o perfil e a influência da posição de início da amostragem.

O erro relativo (ER) foi obtido através da equação 27.

$$ER = \left(\frac{(I_N - VVC)}{VVC} \right) \cdot 100 \quad \text{Equação 27}$$

Onde VVC corresponde ao Valor Verdadeiro Convencional, obtido por simulação com 75000 pontos e I_N ao valor do desvio de circularidade total pico-vale para a simulação com N pontos.

O resultado da variação do valor do desvio de circularidade RONT em função da posição de início de medição foi obtido pela máxima variação calculada para cada valor de número de pontos.

Na figura 69 pode-se notar que para uma baixa quantidade de pontos os erros podem ser da ordem de 43% com uma variação de aproximadamente ±21%. Pode-se observar também que com 3500 pontos, o que corresponde a sete pontos por onda para uma frequência de 500 OPR, o erro relativo é menor que 1% e que a influência da posição inicial de medição é aproximadamente ±0,75%.

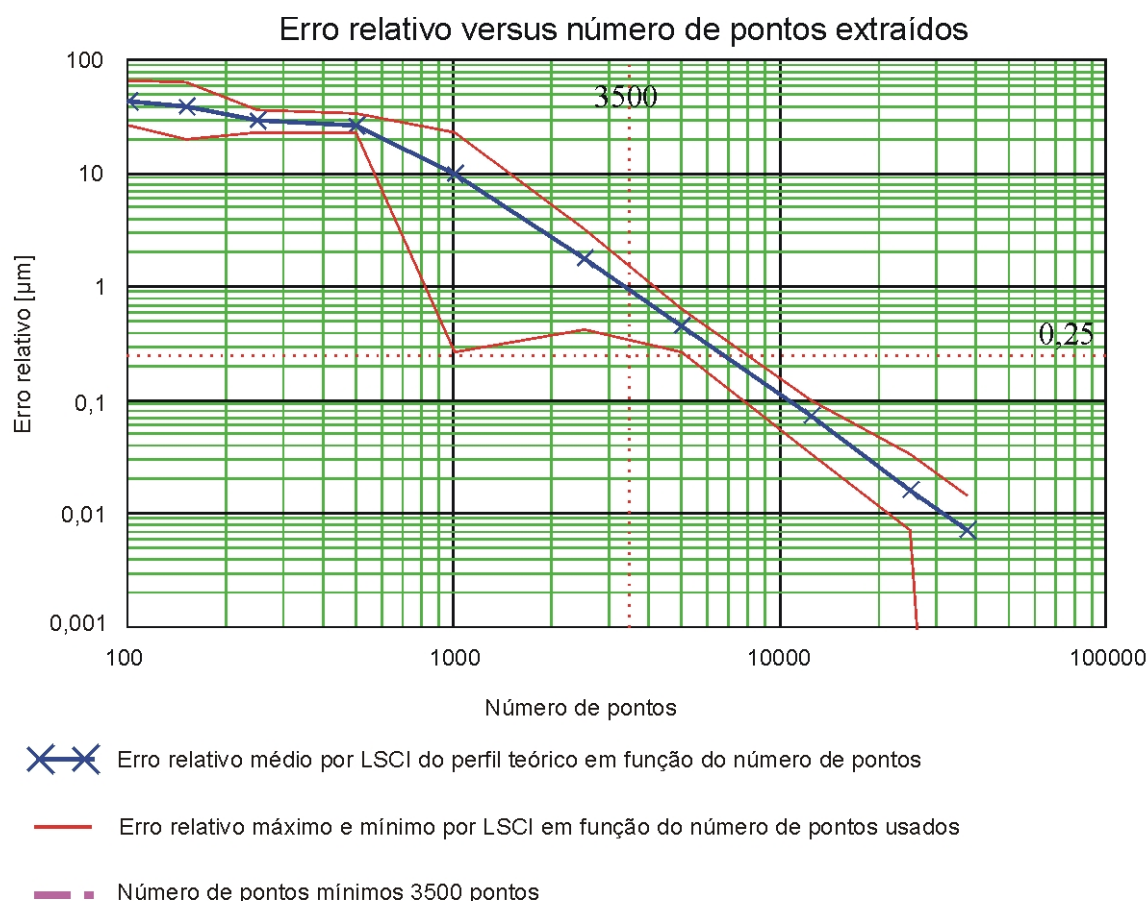


Figura 69: Erro relativo em função da quantidade de pontos.

4.12 SOBREPOSIÇÃO DE PERFIS

Durante o processo de implementação do algoritmo de ajuste LSCI ocorreu que, para alguns casos, o algoritmo apresentava valores muito diferentes do VVC. Esta diferença foi primeiramente atribuída à possibilidade da existência de pontos atípicos na linha circunferencial extraída. Para isso desenvolveu-se um algoritmo que permite sobrepor os dados de referência obtidos com uma MMF e os dados nos quais se suspeitavam haver pontos atípicos.

A maior dificuldade encontrada foi gerar um bom alinhamento dos dois perfis a comparar. Para isso, decidiu-se implementar um algoritmo de *best-fit* (melhor ajuste) que faz com que as fases dos ângulos coincidam e viabiliza a comparação visual. O efeito deste processo pode ser observado na figura 70. À esquerda estão graficados os perfis de circularidade da MMF (em azul) e MMC (em vermelho) sem *best-fit*; à direita ambos os perfis após aplicar o *best-fit*.

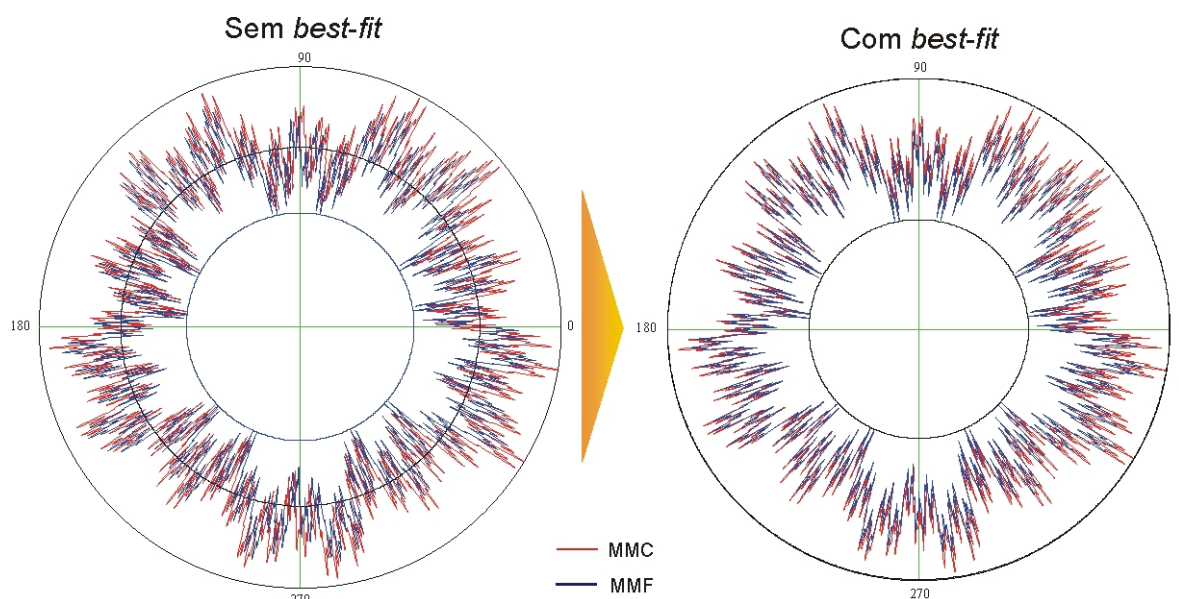


Figura 70: Perfis sobrepostos sem e com processamento usando algoritmo de *best-fit*.

O algoritmo de sobreposição de perfis acabou se mostrando uma ferramenta importante, pois possibilita a comparação das linhas conferenciais extraídas com diferentes sistemas (e.g. MMF e MMC), com diferentes MMC ou então a mesma MMC, porém com parâmetros diferentes. Através do algoritmo de sobreposição e da implementação de algumas ferramentas estatísticas pode-se verificar a influência da distribuição irregular dos pontos e dos erros geométricos da máquina.

Em função do que foi analisado e discutido ao longo do capítulo 4 foram geradas algumas recomendações de cunho prático a fim de minimizar os erros causados pela escolha incorreta dos parâmetros de medição.

5 RECOMENDAÇÕES PARA PLANEJAR A MEDIÇÃO DE DESVIOS DE FORMA EM MMC

Em empresas com sistemas da qualidade modernos, tais como o ISO/TS 16949, o desenvolvimento do processo de medição deveria ser realizado num ambiente de engenharia simultânea, com participação de profissionais de distintas áreas (figura 71).

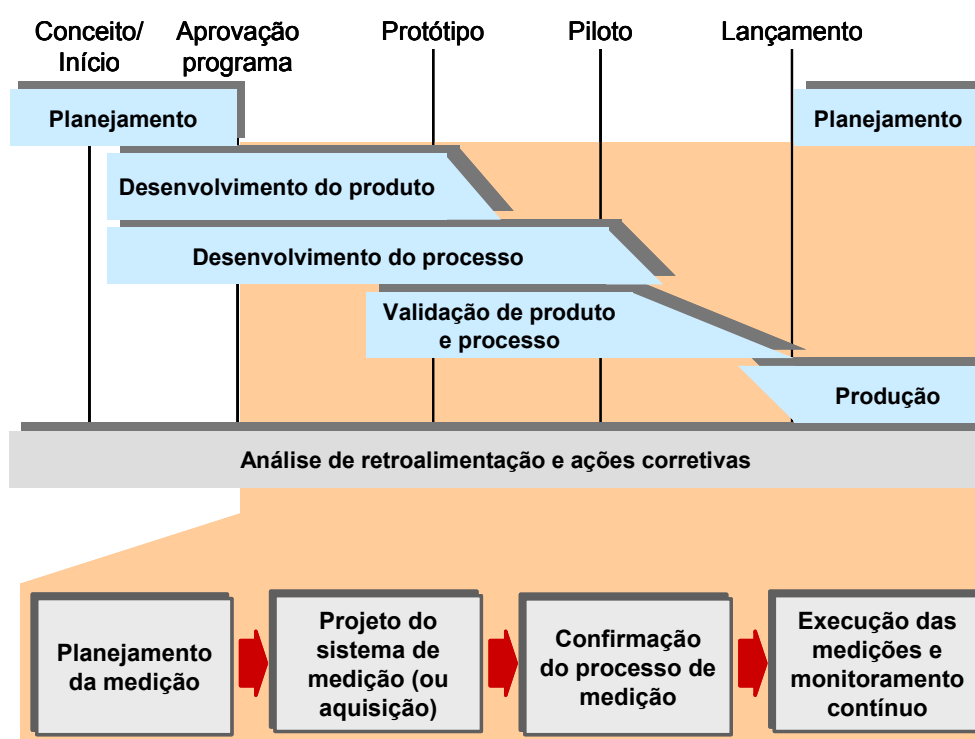


Figura 71: O desenvolvimento da medição no contexto do planejamento avançado da qualidade de produto e processo produtivo.

Uma solução de medição pode começar a ser desenvolvida tão logo se disponha de informações descrevendo o produto e o processo de produção. No entanto, o processo de medição deveria estar validado (i.e. confirmado) antes de realizar a aprovação do lote piloto e a avaliação da capacidade do processo produtivo. De nada adiantaria analisar um processo produtivo usando resultados de medição cuja

confiabilidade e adequabilidade é duvidosa. Essa situação resulta em tempos curtos para desenvolver a medição, o qual significa que nunca há tempo hábil para corrigir erros e realizar retrabalhos se um processo de medição se mostra insatisfatório. A margem de segurança é mínima.

A medição de circularidade por *scanning* precisa ser criteriosamente planejada, para que seja possível transitar pelo processo de desenvolvimento da medição sem surpresas, chegando à etapa de confirmação metrológica com a segurança de que as decisões tomadas levam a uma medição válida. Nesta seção propõe-se um conjunto de recomendações para auxiliar ao metrologista no planejamento e validação de medições de forma por *scanning*. As recomendações se baseiam nos resultados obtidos na pesquisa que, como se sabe, foi realizada usando padrões de múltiplas ondas e não peças reais. Por essa razão, certo grau de extrapolação foi preciso. Assim, os procedimentos descritos a seguir deverão ser usados cuidadosamente, validados pela prática e revisados se for necessário.

Na figura 72 pode-se observar a seqüência de atividades recomendadas para planejar e validar um processo de medição de circularidade usando recursos de *scanning* em MMC. O processo começa com a definição preliminar das condições de medição a seguir:

- frequência de corte do filtro gaussiano;
- características do sensor;
- quantidade de pontos;
- velocidade de *scanning*.

Quando um filtro é aplicado retiram-se do sinal coletado os ruídos que foram introduzidos pela manufatura ou pelo sistema de medição, mas que não afetam a funcionalidade da peça de forma relevante. Por isso, a melhor escolha da frequência de corte é aquela feita em conjunto com o projetista do componente e o engenheiro de processos. O primeiro conhece a função da peça e pode informar como ela é afetada pelas componentes de ondulação de diferente frequência. O segundo conhece as características do processo de fabricação e sua influência na formação de ondas de frequências diversas. De posse desta informação e considerando ainda a necessidade de filtrar os ruídos gerados pelo próprio sistema de medição, o metrologista pode definir a frequência de corte certa para a tarefa de medição de circularidade em pauta. Uma

vez determinada esta frequência de funcionalidade deve-se escolher entre os valores normalizados a frequência mais próxima e de maior valor. Caso o *software* permita, pode-se utilizar a própria frequência de funcionalidade, porém isto pode trazer problemas de comparação de resultados com equipamentos que estão limitados às frequências padronizadas.

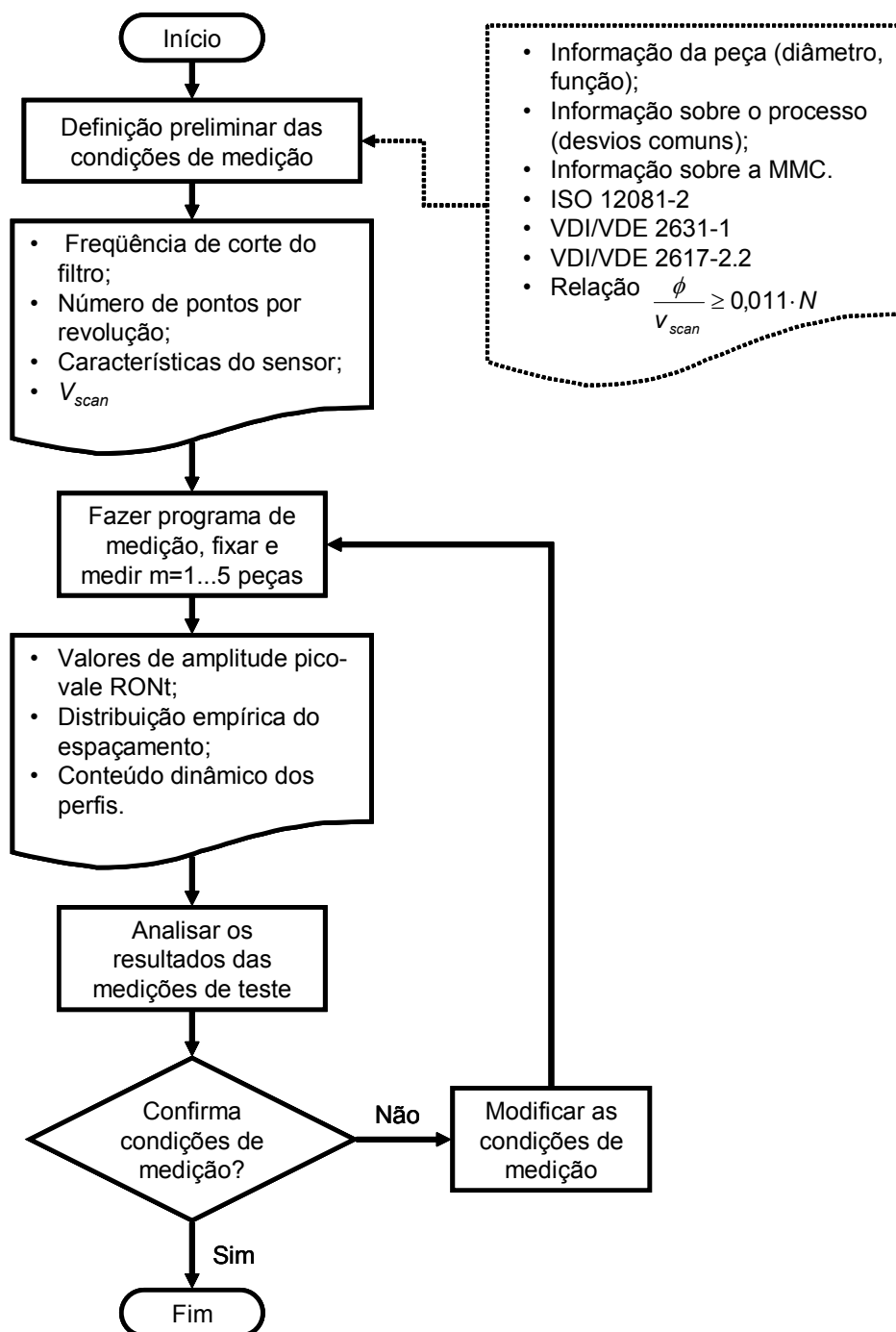


Figura 72: Seqüência de atividades para planejamento e validação de medições de forma em MMC.

No decorrer do trabalho, mostrou-se também que o número de pontos por revolução possui relativamente pouca influência na medição da amplitude pico-vale, sempre que o requisito de amostragem mínima seja respeitado. Assim, quanto mais alta for a máxima freqüência de interesse, maior deverá ser o número mínimo de pontos (fator 7 ou mais). Na definição do número de pontos devem-se considerar também aspectos tais como o diâmetro da circunferência a avaliar e os requisitos de produtividade. Diâmetros grandes podem precisar de maior quantidade de pontos por revolução, para que defeitos locais não sejam omitidos por conta de uma distância excessiva entre pontos sucessivos.

A possibilidade de aumentar o tamanho da amostra até atingir valores da ordem de 75000 pontos por revolução é sem dúvida atrativa. Porém, deve-se lembrar que a análise apresentada na seção 4.5 permitiu verificar que, quando se trabalha com altos números de pontos por revolução e/ou altas velocidades de *scanning*, os dados podem apresentar um espaçamento não uniforme, o que afeta a avaliação da amplitude das componentes de freqüências mais altas. Assim, a escolha de uma quantidade de pontos maior que a necessária resulta na necessidade de diminuir a velocidade de *scanning*, afetando a produtividade da MMC. Por isso, ambos os parâmetros devem ser definidos simultaneamente. A relação $\phi/v_{scan} \geq 0,011 \cdot N$ pode ser usada para definir um valor seguro da velocidade de *scanning*, para o qual os problemas de espaçamento não uniforme não influenciem expressivamente nos resultados de aplicação de FFT.

Finalmente, o diâmetro do sensor deveria ser selecionado para evitar a filtragem mecânica das mais altas freqüências relevantes para a avaliação da peça. Assim, pode-se aplicar as recomendações da norma ISO/FDIS 12181-2:2001(E), VDI/VDE 2631-1 e VDI/VDE 2617-2.2. Nesse estágio é conveniente lembrar que sensores maiores tendem a introduzir maiores ruídos. Por isso, sensores de pequeno diâmetro deveriam ser usados, sempre que tal decisão não afete a rigidez da haste. Observa-se que, se a amplitude da onda de mais alta freqüência não for conhecida, pode ficar ainda certa dúvida sobre se o diâmetro do sensor é suficientemente pequeno para evitar a filtragem mecânica.

Uma vez definidos os parâmetros de *scanning*, recomenda-se realizar medições em uma ou mais peças amostradas do processo de produção. Em princípio medir uma única peça pareceria suficiente para avaliar a qualidade das decisões tomadas na atividade anterior. Porém, deve-se lembrar que muitos processos de fabricação

apresentam variabilidade no que diz respeito à forma das peças que produzem. Essa variabilidade se reflete em diferenças da intensidade e da geometria do desvio de forma evidenciadas entre peças produzidas em condições aparentemente idênticas. Assim, é difícil obter uma amostra “típica” ou “crítica”, que represente o processo todo, para fins da validação de uma estratégia de medição de forma em MMC. O mais adequado é obter várias peças da corrente produtiva em diferentes momentos, produzidas, por exemplo, com ferramentas novas e marginalmente gastas, em ambiente quente e frio, com diferentes dispositivos de fixação (se houver) e assim por diante. Se a peça bruta for fundida ou forjada, o campo de tensões residuais é sempre uma fonte expressiva de variação na forma final. Assim, é conveniente que as amostras sejam extraídas de diferentes lotes de fundição ou forjamento.

No caso de componentes facilmente deformáveis, deve-se dar especial atenção ao sistema de apoio e fixação usado para posicioná-los na MMC. É particularmente importante evitar que as tensões devidas à fixação deformem a superfície cuja forma se deseja controlar. Se isso vier a acontecer, a variabilidade natural da força de fixação será mais uma fonte de variabilidade da medição, afetando a repetitividade e, conseqüentemente, a capacidade de discriminação do teste. Para conhecer a importância do erro de repetitividade resultante dessa e outras fontes, sugere-se que duas repetições sejam feitas em cada uma das peças da amostra.

Uma vez obtidos os resultados da medição, RONT, do perfil de circularidade e o conteúdo dinâmico da linha circunferencial extraída, é necessário analisá-los criteriosamente. Para facilitar a análise, é conveniente que os resultados sejam apresentados de forma numérica, gráfica e eletrônica (dados da linha circunferencial extraída em arquivo ASCII). Deve-se procurar responder as perguntas a seguir:

1. Estão sendo cortadas pelo filtro componentes harmônicas do perfil que podem afetar a função da peça?
2. O diâmetro do sensor precisa ser ajustado?
3. É necessário mudar a quantidade de pontos por revolução?
4. É necessário mudar a velocidade de *scanning*?

A resposta da primeira pergunta pode ser obtida analisando o conteúdo dinâmico da linha circunferencial extraída. Se as peças medidas mostrassem componentes de frequências altas que seriam cortadas pela característica do filtro na

freqüência de corte selecionada, pode ser conveniente que esta última seja aumentada. Dessa forma, o parâmetro $RONt$ será portador da informação sobre a amplitude decorrente dessas freqüências elevadas, que podem afetar a funcionalidade. Também é possível que os gráficos de conteúdo dinâmico mostrem que o processo não produz componentes das freqüências mais altas que são passadas pelo filtro selecionado. Nesse caso pode ser interessante reduzir a freqüência de corte do filtro. No entanto, essa decisão deve ser tomada com cuidado: uma vez que a decisão foi implementada, não há forma de saber o que o filtro cortou.

Se a freqüência de corte do filtro for mudada, deve-se ajustar o diâmetro de sensor para que o mesmo não produza filtragem mecânica das componentes passadas pela nova freqüência de corte. A decisão de aumentar o tamanho do sensor para ajustá-lo a uma freqüência de corte menor deve ser tomada com reservas.

A necessidade de ajustar a quantidade de pontos por revolução decorre da mudança da freqüência de corte do filtro. Deve-se respeitar sempre a condição de amostrar como mínimo 7 pontos por onda da mais alta freqüência relevante.

A resposta ao quarto questionamento é talvez a mais difícil de dar com segurança. Deve-se lembrar que a equação $\phi/v_{scan} \geq 0,011 \cdot N$ foi obtida em condições de laboratório, usando padrões conhecidos com alto grau de exatidão. Essa equação não está suficientemente validada com peças reais e, conseqüentemente, sua capacidade de predição é ainda dúbia. Por isso, a evidência observacional resultante das medições de teste deveria ser analisada com extremo cuidado, em busca de sintomas de velocidade excessiva. Sabe-se que o conteúdo dinâmico pode mostrar comportamentos espúrios na região de mais altas freqüências quando a alta velocidade gera espaçamento não uniforme. Porém, no caso de peças reais o conteúdo dinâmico é de relativamente baixa utilidade porque o valor verdadeiro convencional desse é desconhecido para as peças da amostra. Assim, como saber se certos picos que aparecem na região de altas freqüências do espectro são espúrios ou pertencem efetivamente à linha circunferencial extraída.

Para verificar a existência de problemas devidos à aplicação da transformada de Fourier a dados não uniformemente espaçados, o mais simples é construir o histograma do espaçamento angular entre pontos sucessivos (i.e. a distribuição empírica). A relação $\delta = \theta m/2 \cdot \Delta\theta$, já introduzida na seção 4.5, pode ajudar a avaliar o efeito da velocidade no espaçamento para o caso em pauta. Se o valor de $\Delta\theta$ for

relativamente alto com referência ao valor de θm , pode ser que problemas aconteçam com a transformada de Fourier e que o espectro seja pouco confiável na região de altas frequências. Nesses casos, pode ser necessário diminuir a velocidade de *scanning*.

Uma outra forma de analisar se a velocidade é excessiva é comparar as medições realizadas com a MMC com medições de referência feitas em MMF. Não parece necessário que a comparação envolva as várias peças usadas no resto do processo: com somente uma das peças será suficiente. A comparação não deveria ser somente numérica, mas também gráfica. Neste estágio, a ferramenta de superposição de perfis proposta na seção 4.12 pode ser de grande utilidade.

Todos os ajustes realizados nos parâmetros de *scanning* precisam ser testados antes de validar definitivamente o processo de medição segundo o procedimento da figura 72. Uma vez aprovados, pode-se proceder a documentar a estratégia de medição e implantá-la na medição de produção. Porém, deve-se compreender que processos degradam no tempo: verificações periódicas são necessárias para restabelecer periodicamente a confiabilidade nas medições. Essas verificações podem ser feitas com padrões apropriados ou diretamente com uma das peças usadas no processo de validação, sempre que se possa garantir a estabilidade da mesma no tempo.

Antes de realizar o extensivo procedimento de validação descrito na figura 72, pode ser recomendável verificar o potencial da MMC para realizar medições de circularidade. Os erros geométricos devidos à estrutura da MMC e suas escalas e também alguns problemas ambientais, tais como gradientes espaciais de temperatura (e.g. o laboratório tem uma parede quente ou o fluxo de ar condicionado bate numa certa região da estrutura da MMC), podem introduzir componentes de baixa frequência que afetem os resultados de medição de forma significativa.

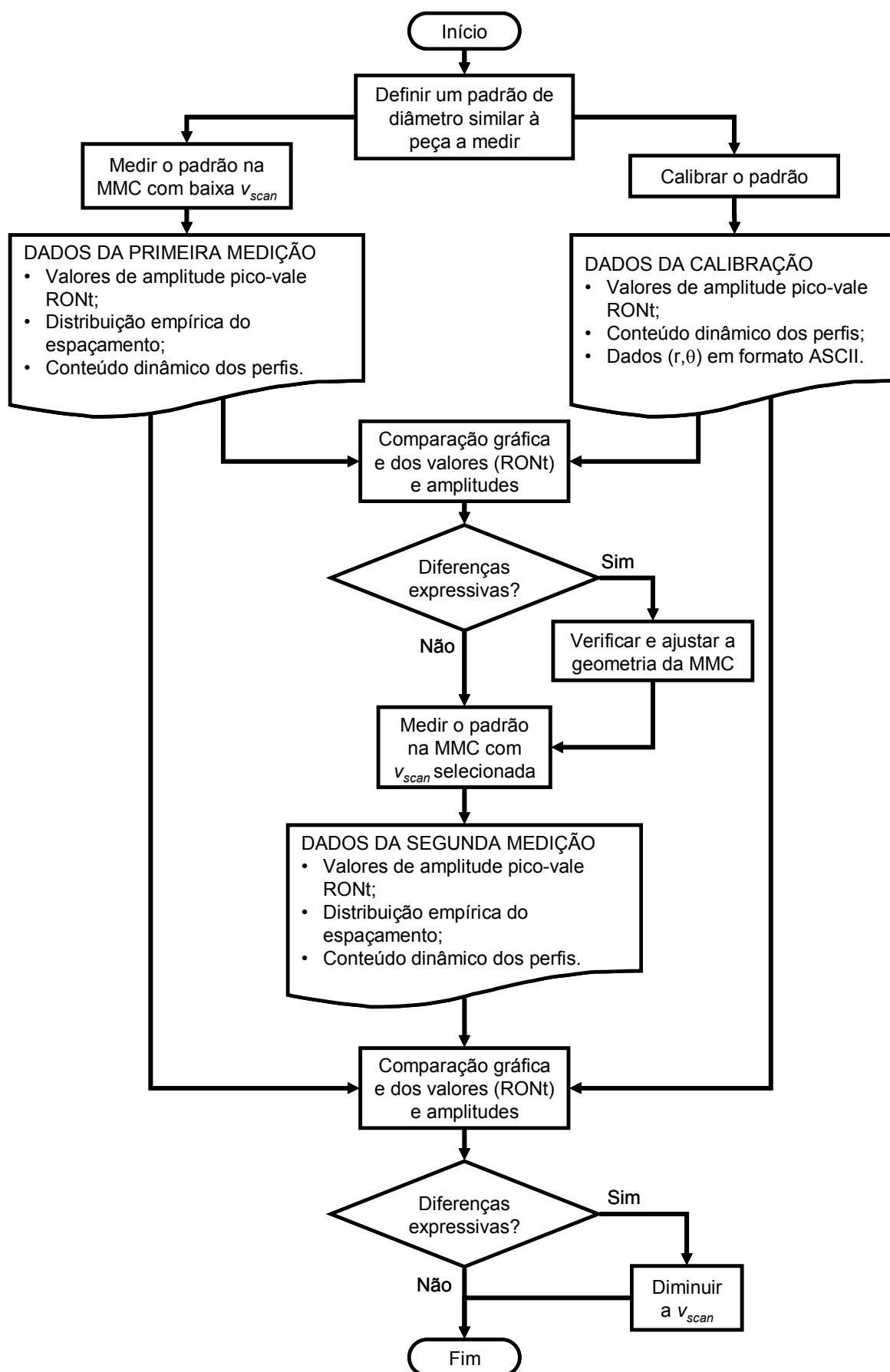


Figura 73: Seqüência de atividades para verificação da capacidade de medição de circularidade usando um padrão (anel ou tampão).

O teste proposto usa objetos padrão de forma e tamanho similar à geometria a medir (i.e. cilindros/anéis padrão ou cujo diâmetro não se afaste mais de $\pm 15\%$ do diâmetro da peça). O objeto deve ser calibrado em MMF e devem-se conhecer o RONT com diferentes freqüências de corte e o conteúdo dinâmico. É importante também dispor dos dados em arquivo ASCII. O procedimento está detalhado na figura 73 e se desenvolve em duas etapas básicas: uma medição a baixa velocidade e outra à velocidade de *scanning* selecionada para medir a peça.

A primeira etapa consiste em medir o artefato na posição em que a peça será medida, com o sensor e a quantidade de pontos pré-selecionados para medir a peça, mas a muito baixa velocidade de *scanning*. Espera-se que este teste revele o efeito dos erros geométricos, sem incidência dos efeitos dinâmicos. Por isso, deveria ser realizada antes de começar com o procedimento da figura 72. Os resultados obtidos devem ser comparados com a informação obtida na calibração do padrão. Comparações numéricas do valor RONT não são suficientes: é necessário realizar também a comparação dos conteúdos dinâmicos e dos gráficos polares. Novamente, o algoritmo de sobreposição de perfis pode ser de utilidade nestas comparações.

Se não existirem diferenças significativas entre os valores obtidos na medição em MMC a baixa velocidade e a medição de referência em MMF, pode-se afirmar que a MMC possui potencial para realizar a medição em questão. Se as houver, a MMC precisa ser verificada e ajustada.

A segunda etapa do teste pode ser realizada após definir a velocidade de *scanning* com o procedimento da figura 72. Esta etapa se justifica na necessidade de verificar a importância do aumento das componentes de baixa freqüência (i.e. desvios de dois ou três lóbulos) devida ao aumento da velocidade de *scanning*, segundo evidenciado na figura 56. Se o incremento for inaceitável, dever-se reduzir a velocidade de *scanning*.

6 CONCLUSÕES

6.1 SOBRE A PESQUISA

A melhoria das práticas da medição dos desvios de forma por scanning em MMC foi o objetivo do projeto de pesquisa executado em cooperação entre o Laboratório de Máquinas-ferramentas da Universidade Técnica de Aachen (Alemanha), a Fundação CERTI e o laboratório de Metrologia e Instrumentação (LABMETRO) da Universidade Federal de Santa Catarina.

Ao mesmo tempo a falta de normas brasileiras sobre o assunto trouxe sérias dificuldades na tradução de termos técnicos em função da necessidade de manter-se a fidelidade da informação original durante a escrita do trabalho.

Por outro lado muitas das normas internacionais utilizadas neste trabalho ainda estão em fase de desenvolvimento e aprovação. Notou-se que apesar dos esforços internacionais ainda não existem conclusões definitivas a respeito do método de ajuste a ser utilizado.

6.2 O QUE FOI GERADO

Através deste trabalho foi possível identificar e quantificar algumas fontes de influência que atuam durante o processo de medição de circularidade. Esses dados serão utilizados na segunda fase do projeto, quando então será estimada a incerteza de medição em função do tempo de medição e vice-versa.

Descobriu-se que a capacidade de adquirir dados igualmente espaçados na medição de circularidade em MMC no modo *scanning* está relacionada à quantidade de pontos, à velocidade de medição e ao diâmetro de interesse.

Os resultados permitiram gerar recomendações para planejar a medição de desvios de forma em MMC que auxilia o operador de MMC a escolher os parâmetros que atuam no processo de filtragem, tais como frequência de corte, velocidade de medição, número de pontos e escolha do diâmetro do sensor. Este trabalho poderá ser utilizado pelo laboratório de medição por coordenadas do CMI. Também os cursos de medição de forma e rugosidade do CMI poderão ser atualizados através do material estudado e o conhecimento adquirido durante o decorrer do projeto. Do mesmo modo os algoritmos utilizados ficarão a disposição do Centro e poderão ser utilizados para análise de casos suspeitos bem como corrigir o espaçamento angular.

Através do capítulo 2 conseguiu-se resgatar as questões históricas que serviram para esclarecer o porquê dos valores de frequência, tipos de filtros e círculos de referência que são utilizados na metrologia dos dias de hoje.

6.3 OPORTUNIDADES FUTURAS

Em função de peculiaridades e limitações próprias, este trabalho deixa em aberto várias questões que podem ser desenvolvidas em outros estudos. A principal delas está relacionada à comprovação da efetividade da sistemática em atingir os resultados esperados em cada fase.

6.3.1 ELIMINAÇÃO DE PONTOS ATÍPICOS

Eliminação de pontos atípicos através do diagrama de caixa (*Box Plot*). Este método é uma apresentação gráfica que descreve simultaneamente várias características importantes de um conjunto de dados, tais como o centro, dispersão, desvio da simetria e identificação das observações que estão surpreendentemente longe do seio dos dados, (Essas observações são chamadas de “*outliers*”.) [71].

Também existe a possibilidade da eliminação dos pontos atípicos através da utilização de um algoritmo baseado em histograma. Este algoritmo foi sugerido por [72].

6.3.2 DISTRIBUIÇÃO IRREGULAR DOS ÂNGULOS

Existem duas propostas de trabalhos futuros para a solução do problema da distribuição irregular dos pontos, sendo elas:

A primeira é a utilização de um método de FFT que permite trabalhar com dados não regularmente espaçados [70].

A segunda é através da análise da fase do conjunto de dados que pode ajudar a resolver problemas com a variação da frequência angular [73].

Como foi visto neste trabalho o problema da distribuição irregular dos dados pode ser solucionado através da implementação de algoritmos de interpolação linear.

6.3.3 CARACTERÍSTICAS TOLERADAS

Este estudo pode também ser estendido para as outras características de tolerância que também estão definidos na norma ISO 1101.

6.3.4 FILTRAGEM

Atualmente o grupo ISO/TS 213 está votando uma família de normas da GPS específicas para a filtragem na medição de topografias. Esta família de normas recebeu o número de ISO 16610. Já existem no mercado MMC com *softwares* que permitem a seleção de alguns desses filtros.

6.3.5 CABEÇOTE MEDIDOR PASSIVO

Seria de grande valia que estudos semelhantes aos informados nesta dissertação fossem efetuados em uma MMC com cabeçote medidor passivo, visto que o sistema de controle, principal diferença entre os métodos de apalpação, aparentemente tem grande influência nos resultados.

6.3.6 ALGORITMO DE *BEST-FIT*

Outra proposta é o aprimoramento do algoritmo de *best-fit* através da introdução de ferramentas estatísticas conforme foi discutido no item 4.12 .

6.3.7 PEÇAS REAIS

Por fim, é sugerido como proposta de trabalho futuro a utilização de peças reais produzidas por diferentes métodos de manufatura no estudo dos parâmetros de

influência neste trabalho identificados. Esse estudo, somado aos resultados gerados pelas equipes alemã e brasileira, permitirão estimar uma incerteza de medição para a medição de forma em MMC.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BENNICH, P. **Conflitos na interface entre projeto e fabricação**. Florianópolis: 2003. 10 slides: color.
- [2] HUMIENNY, Z.; OSANNA, P. H.; TAMRE, M.; *et al.* *Geometrical Product Specifications - Course for Technical Universities*, 1^a ed. Warszawa. 2001.
- [3] PORATH, M. C. **Konstruktion und Erprobung spezieller Form-Prüfkörper und Konzeption einer Vorgehensweise zur modellbasierten Identifizierung und Quantifizierung von Einflussgrößen für die Formprüfung auf Koordinatenmessgeräten**. Aachen, 2005. 111 f. Masterarbeit - Lehrstuhl für fertigungsmesstechnik und Qualitätsmanagement - WZL/RWTH/AACHEN.
- [4] SOARES, G. G.; MARQUES, C. C.; SCHMIDT, Â. **Medição de Forma**. Florianópolis: 2004. 84 slides: color.
- [5] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 1101**: Geometrical Product Specifications (GPS) – Geometrical Tolerancing – Tolerances of form, orientation, location and run-out. Geneva, 2004.
- [6] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE/VERBAND DER ELEKTROTECHNIK, ELETRONIK, INFORMATIONSTECHNIK. **VDI/VDE 2631** blatt 1: Formprüfung - Grundlagen zur Bestimmung von Form und Lageabweichungen. Düsseldorf, 1999.
- [7] PFEIFER, T.; SCHMITT, R.; NAPIERALA, A. Effizientere Abläufe erreichen Formen mit Koordinatenmessgeräten erfassen. **Qualität und Zuverlässigkeit**, München, n. 50, p. 45-49, set. 2005.
- [8] AMERICAN NATIONAL STANDARD ENGINEERING DRAWINGS AND RELATED DOCUMENTATION PRACTICES. **ANSI Y14.5M-1982**, Dimensioning and Tolerancing. New York, 1982.
- [9] VOELCKER, H. B. A CURRENT PERSPECTIVE ON TOLERANCING AND METROLOGY; THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS; 1993 p. iii-325.
- [10] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 8015**: Technical Drawings - Fundamental tolerancing principle. Switzerland, Dez.1985.
- [11] PETERS, J. Contribution of CIRP to the Development of Metrology and Surface Quality Evaluation during the last fifty years. In.: CIRP Annals 2001.

- [12] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 4760**: Gestaltabweichungen, Deutschland, 1982.
- [13] REASON, R. E. Progress in the appraisal of surface topography during the first half-century of instrument development. Jul. 1979.
- [14] REASON, R. E. Some Basic Principles of Surface Metrology. **Engis Equipment Co.** Out. 1960.
- [15] MOORE, W. R. **Die Grundlagen der mechanischen Genauigkeit**, 1ª ed., Connecticut: Bridgeport. p. 4-353, 1970.
- [16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 6409**: Tolerâncias geométricas - Tolerâncias de forma, orientação, posição e batimento - Generalidades, símbolos, definições e indicações em desenho. São Paulo, 1997.
- [17] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/DFIS 12181-1**: Geometrical Product Specification (GPS) – Roundness – Part 1: Terms, definitions and parameters of roundness. Switzerland, 2001.
- [18] SCHELLENBACH, U. **History of Atomic Force Microscopy**. Disponível em: <http://www.lot-oriel.com/site/site_down/pn_afmhistory_deen.pdf>. 2005. Acesso em: Abr. 2005.
- [19] SCHMALZ, G. **Technische Oberfläche**. Berlin: Beuth Verlag, 1985.
- [20] NILSSON, J.; RIEDEL, S. **Circuitos Elétricos**, 6 ed. Tradução de: Ronaldo Sérgio de Biasi. Rio de Janeiro/RJ: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2003.
- [21] BOSSE, H. **Aspekte der Filterung in der Formmesstechnik**. Braunschweig: Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Fertigungstechnik, Labor 5.21; Fev. 1994. Relatório Técnico n.: PTB-F-13.
- [22] BRIGHAM, E. O. **The fast Fourier transform**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1974.
- [23] JUSKO, O. **Aspekte der Filterung in der Formmesstechnik**. Mensagem recebida por: <jusko@ptb.de> em:15.6.2005.
- [24] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/DFIS 11562**: Geometrical Product Specification (GPS) – Surface texture: Profile method – Metrological characteristics of phase correct filters. Switzerland, 1996.
- [25] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/DFIS 12181-2**: Geometrical Product Specification (GPS) – Roundness – Part 2: Specification operators. Switzerland, 2001.
- [26] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **COMMITTEE DRAFT ISO/DTS 16610-40:10.11.2003 (E)**: Geometrical product specifications (GPS) — Filtration — Part 40: Morphological profile filters. Switzerland, 2003.

- [27] VEREIN DEUSTCHER INGENIEURE/ VERBAND DER ELEKTROTECHNICK, ELETRONICK, INFORMATIONSTECHNIK. **VDI/VDE 2617** blatt 2.2: Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten Kenngrößen und deren prüfung Formmessung. Düsseldorf, 1999.
- [28] NEUMANN, H. J. **Koomesstechnik im industriellen Einsatz: zehn Jahre Innovationrdinaten**. Landsberg/Lech: Moderne Industrie, 2000.
- [29] DIETZSCH, M.; KRYSTEK, M.; MEYER, M. Bestmögliche Annäherung. **Messen und prüfen**. 2001.
- [30] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDIZATION. **COMMITTEE DRAFT ISO/DTS 16610-49**: Geometrical Product Specifications (GPS) - Filtration - Part 49: Morphological profile filters: Scale space techniques. Switzerland, 2003.
- [31] KLEN, E. R. **Calibração de máquinas de medir por coordenadas utilizando placas de esferas**: uma técnica econômica, rápida e metrologicamente eficiente. Florianópolis, 2000. 105 f. Dissertação - CTC - Universidade Federal de Santa Catarina.
- [32] BERNHARDT, R.; IMKAMP, D.; MÜLLER, H. Der VAST Navigator für mehr Produktivität auf Koordinatenmessgeräten. **Innovation SPEZIAL Messtechnik**. n. 6, p. 4-7. 2004.
- [33] WANNER, J. Formprüfung mit Koordinatenmessgeräten. **QZ**. München, n. 32, p. 481-486. 1987.
- [34] DONATELLI, G. D.; GONÇALVES, A. A.; SCHNEIDER, C. A.; PFEIFFER, G. **Metrologia Goemétrica na Indústria: Tendências e Desafios**. Palestra proferida no SENAI/SC, Florianópolis, 2005.
- [35] GOEKELER - Zubehoer industrielle Messtechnik CMM Stylus Catalog. 2004. Lenningen, Deutschland. Catálogo.
- [36] OLIVEIRA, A. L. **Validação de Processos de Medição por Coordenadas em Operações de Controle de Qualidade**. Florianópolis, 2003. 154 f. Dissertação (Mestrado em Metrologia Científica e Industrial) – UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina.
- [37] SOUSA, A. R. **Padrões Corporificados e a Tecnologia de Medição por Coordenadas Inovando a Qualificação Geométrica de Centros de Usinagem**. Florianópolis/SC. 2004. 122 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - CTC - UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina.
- [38] MOSER, O.; OHNHEISER, R. Formmessung auf Koordinatenmessgeräten. **QZ** Oberkochen. n. 39, 1994.
- [39] LOTZE, W. High-Speed Scanning auf Koordinatenmessgeräten. **Microtecnic**, n. 4,p. 4-10, 1993.

- [40] SOUSA, A. R. **Garantia da confiabilidade metrológica na medição por coordenadas**. Florianópolis: 2003. 28 slides: color.
- [41] CARL ZEISS. **Active Scanning Technologie**. Disponível em:< <http://www.zeiss.de/C12567B6005445A1/Contents-Frame/46D60B1510F38E22C1256E2A003A208F>> Acessado em:31.10.2005.
- [42] Renishaw. **Active and passive scanning probe design**. Disponível em:< www.renishaw.com/client/category/UKEnglisch/CAT-642.shtml> Acessado em:02.07-2004.
- [43] Renishaw. **Renscan DC principi**. Disponível em:< www.renishaw.com/client/category/UKEnglisch/CAT-618.shtml> Acessado em:13.04.2004.
- [44] Renishaw. **Applying renskan DC to your measurement process**. Disponível em:< www.renishaw.com/client/category/UKEnglisch/CAT-619.shtml> Acessado em:13.04.2004.
- [45] Renishaw. **Renscan DC – the results**. Disponível em:< www.renishaw.com/client/category/UKEnglisch/CAT-618.shtml> Acessado em:13.04.2004.
- [46] WECKENMANN, A.; ESTLER, T.; PEGGS, G. *et al.* **Probing Systems in Dimensional Metrology**. In.: CIRP Annals 2004.
- [47] MÜLLER, H.; SCHWARZ, W. VAST Navigator. Scanning der 3. Generation. **Innovation SPEZIAL Messtechnik**. Oberkochen, n. 5, p. 40-43, 2003.
- [48] Carl Zeiss. IMT Corporation **True Scanning...Spread the Word !** 2005. Catálogo.
- [49] Carl Zeiss. **Scanning. The Revolution in Measuring Technology**. 2005. Catálogo.
- [50] JUSKO, O.; LÜDICKE, F. **Neuartige Mehrwellennormale zur Kalibrierung von Rundheitsmessgeräten**. Braunschweig: PTB-Jahresbericht 1998. p. 242-243. Relatório Técnico.
- [51] VEREIN DEUSTCHER INGENIEURE/VERBAND DER ELEKTROTECHNICK, ELETRONICK, INFORMATIONSTECHNIK. **VDI/VDE 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme**. 1993.
- [52] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDIZATION. **ISO 10360-4: Geometrical Product Specifications (GPS) — Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) — Part 4: CMMs used in scanning measuring mode Switzerland**, 2001.
- [53] NAPIERALA, A. **Estratégia de medição para padrões de múltiplas ondas KOMBI - MWN**. Mensagem recebida por: <a.napierala@wzl.rwth-aachen.de> em: 22.08.2005.
- [54] QS GRIMM. **Messunsicherheit-Rundheitsmessung**. Draft de apostila. 2002.

- [55] SHAKARJI, C. M.; DHANISH, P. B.; **Least-Squares Fitting Algorithms of the NIST Algorithm Testing System**. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology 1998.
- [56] MathSoft Inc. **Mathcad 2000 Professional** 2005. 1 CD.
- [57] CHERNOV, N.; LESORT, C. **Least squares fitting of circles and lines, Department of Mathematics University of Alabama at Birmingham**. Dez. 2004.
- [58] DHANISH, P. B.; SHUNMUGAM, M.S. An algorithm for form error evaluation - using the theory of discrete and linear Chebyshev approximation. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**. n. 92, p. 309-324, 1991.
- [59] DHANISH, P. B. A simple algorithm for evaluation of minimum zone circularity error from coordinate data. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 42 2003 Jul 31.
- [60] YUAN, Y. B.; VORBURGER, T.; SONG, J. F. *et al.* **A Simplified Realization for the Gaussian Filter in Surface Metrology**. Chemnitz (Germany). p. 133, 2000.
- [61] JUSKO, O.; LÜDICKE, F.; WÄLDELE, F. **High Precision Form Measurements with Coordinate Measurement Machines**. Chemnitz. p. 341-351, 2000.
- [62] NPL. **Dados de referência (x,y) NPL, para validação do algoritmo de LSCI**. Disponível em:<
http://www.npl.co.uk/ssfm/ssfm3/theme3/numerical_software_testing/project3_2/milestone3/data-generator1-odrcircle.htm> Acessado em:07.10.2005.
- [63] NPL. **Dados de referência (x,y) NPL, para validação do algoritmo de MZCI**. Disponível em:<
http://www.npl.co.uk/ssfm/ssfm3/theme3/numerical_software_testing/project3_2/milestone3/data-generator1-mzcircle.html> Acessado em: 07.10.2005.
- [64] MALBURG, M. C. **SigmaRound Version 1.12, FreeWare Edition**. Digital Metrology Solutions, Inc. Disponível em: Acessado em:07.10.2005.
- [65] ISO/TC 213/ WG 15 GPS - Extraction and Filtration. **Reference material**. Disponível em:<<http://isotc213.ds.dk/wg15-site/wg15-reference.htm>> Acessado em:07.10.2005.
- [66] Mahr GmbH. **FORM-PC Versão 4.20.18**. 2000. 1 CD.
- [67] MathWorks, Inc. **MATLAB Version 6.5.0180913a Release 13**. 2002. 1 CD.
- [68] Flack, D. CMM Measurements. **Measurement Good Practice Guide**. Teddington, Middlesex, United Kingdom, HMSO. n. 41, p. 1-60. 2001.
- [69] ALBERTAZZI, A. A. **Influência de dados não uniformemente espaçados na aplicação da FFT**. 2005. Comunicação Pessoal.

- [70] **"Spectral Analysis of Unevenly Sampled Data"** . **"Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing"**. Cambridge: Cambridge University Press, 1992:575-584. Disponível em: <
<http://www.library.cornell.edu/nr/bookcpdf.html>> Acessado em: 05.08.2005.
- [71] MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros (Applied Statistics and probability for engineers, 2nd edition**, 2 ed. Tradução por: Profa. Verônica Calado, D. Sc. Rio de Janeiro, RJ: LTC – Livros Técnicos Científicos Editora S.A., 2003.
- [72] PONTE, A. dal. **Eliminação de pontos atípicos utilizando um algoritmo baseado em histograma**. 2005. Comunicação Pessoal.
- [73] JUSKO, O. LÜDICKE, F. **Novel multi-wave standards for the calibration of form measuring instruments**. Disponível em: <
http://www.ptb.de/de/org/5/53/texte/mwn_e.pdf> Acessado em: 25.11.2005.

ANEXOS

ANEXO 1

Kalibrierschein

Kunde:	Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre
Bezeichnung:	Kombinationsmehrwellennormal – MWN 80 500 (nominal 80 mm Außendurchmesser)
Kalibrierschein Nr.:	03/11/04
Anzahl der Seiten:	27
Prüfer:	Thomas Fischer/ Maurício de Campos Porath
Prüfort:	Messraum/WZL/RWTH Aachen
Prüfdatum:	09.11.2004
Temperatur des Prüflings:	20°C ± 1°C
Temperatur am Prüfort:	20°C ± 1°C
Luftfeuchte am Prüfort:	45% ± 5%
Prüfmittel:	Formtester MFU 7, Mahr Letzte Überwachung: 22.01.04

Vorgehensweise:

Es wurden kalibriert:

1. Die Rundheitsabweichung der strukturierten Außenfläche in der mittleren Messebene (D80)
2. Die Rundheitsabweichung der strukturierten Innenfläche in der mittleren Messebene (D40)
3. Die Ebenheitsabweichung der strukturierten Ebene in der mitte der kreisförmigen Spur (D54)
4. Die Wellentiefen der dominanten Harmonischen der beiden Rundheitsprofile und des Ebenheitsprofils (ungefiltert)

Die Messergebnisse wurden aus dem Mittelwert von 5 Einzelmessungen gebildet. Die Streuung der Ergebnisse wurde im Messunsicherheitsbudget berücksichtigt.

Der Tasterdurchmesser betrug 1,5 mm für die Außenfläche und die Ebene und 1,0 mm für die Innenfläche.

Für alle Messungen wurden 3600 gleichmäßig verteilte Punkte messtechnisch erfasst.

Zur Filterung wurde ein Gaußfilter mit einem Übertragungsverhältnis von 50% angewendet.

Zur Berechnung der Amplituden der Harmonischen wurde eine Fouriertransformation der ungefilterten Formprofile mithilfe des Softwarapaketes *MATLAB* durchgeführt.

Für die Ausrichtung wurden die zwei zylindrischen Referenzflächen angewendet. Zwischen der so ermittelten Achse und der Flächennormale der kreisförmigen Referenzebene wurden keine signifikanten Winkelabweichungen festgestellt. Daher kann die kreisförmige Referenzebene in Verbindung mit einer der beiden zylindrischen Referenzflächen bei Anwendung des Normals ebenfalls für die räumliche Ausrichtung benutzt werden.

Die zugeordneten Messunsicherheiten betragen 0,4 μm für die Rundheitsabweichungen, 0,6 μm für die Ebenheitsabweichungen und 0,2 μm für die Wellentiefen der dominanten Harmonischen.

Die Messunsicherheit wurde gemäß DIN V ENV 13005 (GUM) ermittelt. Angegeben ist die erweiterte Messunsicherheit, die sich aus der Standardmessunsicherheit durch Multiplikation mit dem Erweiterungsfaktor $k=2$ ergibt. Der Wert der Messgröße liegt so mit einer Wahrscheinlichkeit von annähernd 95% im zugeordneten Werteintervall.

Es folgen:

- Die Messergebnisse in tabellarischer Form
 - Die Diagramme der Formprofile mit unterschiedlichen Filtergrenzwellenzahlen
 - Die Frequenzspektren der ungefilterten Formprofile
 - Die Messunsicherheitsbudgets nach DIN V ENV 13005 (GUM)
 - CD-R mit den für die Fouriertransformation angewandten Punkten
-

Ergebnisse:

1. Formabweichungen

Rundheit – Außenfläche (D80)					
Filtergrenzwellenzahl [W/U]	1500	500	150	50	15
Formabweichung [μm]	13,5	11,7	8,8	6,4	3,5

Rundheit – Innenfläche (D40)					
Filtergrenzwellenzahl [W/U]	1500	500	150	50	15
Formabweichung [μm]	13,1	11,4	8,7	6,3	3,4

Ebenheit (D54)					
Filtergrenzwellenzahl [W/U]	1500	500	150	50	15
Formabweichung [μm]	13,3	11,7	8,9	6,6	3,8

2. Wellentiefen der dominanten Harmonischen

Rundheit – Außenfläche (D80)					
Wellenzahl [W/U]	500	150	50	15	5
Wellentiefe [μm]	3,4	3,6	3,4	3,4	3,3

Rundheit – Innenfläche (D40)					
Wellenzahl [W/U]	500	150	50	15	5
Wellentiefe [μm]	3,2	3,6	3,3	3,2	3,2

Ebenheit (D54)					
Wellenzahl [W/U]	500	150	50	15	5
Wellentiefe [μm]	3,2	3,6	3,3	3,2	3,3

ANEXO 2

Kalibrierschein

Kunde:	Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre
Bezeichnung:	Kombinationsmehrwellennormal – MWN 180 500 (nominal 180 mm Außendurchmesser)
Kalibrierschein Nr.:	02/11/04
Anzahl der Seiten:	39
Prüfer:	Thomas Fischer/ Maurício de Campos Porath
Prüfort:	Messraum/WZL/RWTH Aachen
Prüfdatum:	09.11.2004
Temperatur des Prüflings:	20°C ± 1°C
Temperatur am Prüfort:	20°C ± 1°C
Luftfeuchte am Prüfort:	45% ± 5%
Prüfmittel:	Formtester MFU 7, Mahr Letzte Überwachung: 22.01.04

Vorgehensweise:

Es wurden kalibriert:

1. Die Rundheitsabweichung der strukturierten Außenfläche in der mittleren Messebene (D180)
2. Die Geradheitsabweichung der strukturierten Stirnfläche (D30 – 155)
3. Die Wellentiefen der dominanten Harmonischen des Rundheitsprofils und des Geradheitsprofils (ungefiltert)

Die Messergebnisse wurden aus dem Mittelwert von 5 Einzelmessungen gebildet. Die Streuung der Ergebnisse wurde im Messunsicherheitsbudget berücksichtigt.

Der Tasterdurchmesser betrug 1,5 mm.

Für die Rundheitsmessung wurden 3600 gleichmäßig verteilte Punkte messtechnisch erfasst. Bei der Geradheitsmessung wurde eine Schrittweite (Abstand zweier nacheinanderfolgender Punkte) von 0,01 mm verwendet.

Für die Ermittlung der Geradheitsabweichung, wurden vier um 90° versetzte Geraden gemessen. Die einzelnen Winkelpositionen sind auf dem Normal gekennzeichnet. Für die Geradheitsmessungen wurde jeweils eine Auswertestrecke von 62,5 mm (D30 bis D155) verwendet. Für die Frequenzanalyse der Geradheitsprofile wurde eine Auswertestrecke von 40 mm (D52,5 bis D132,5) betrachtet.

Zur Filterung wurde ein Gaußfilter mit einem Übertragungsverhältnis von 50% angewendet.

Zur Berechnung der Amplituden der Harmonischen wurde eine Fouriertransformation der ungefilterten Formprofile mithilfe des Softwarepaketes *MATLAB* durchgeführt.

Für die Ausrichtung wurden die zwei zylindrischen Referenzflächen angewendet. Zwischen der so ermittelten Achse und der Flächennormale der kreisförmigen Referenzebene wurden keine signifikanten Winkelabweichungen festgestellt. Daher kann die kreisförmige Referenzebene in Verbindung mit einer der beiden zylindrischen Referenzflächen bei Anwendung des Normals ebenfalls für die räumliche Ausrichtung benutzt werden.

Die zugeordneten Messunsicherheiten betragen 0,4 µm für die Rundheitsabweichungen, 0,6 µm für die Geradheitsabweichungen und 0,2 µm für die Wellentiefen der dominanten Harmonischen.

Die Messunsicherheit wurde gemäß DIN V ENV 13005 (GUM) ermittelt. Angegeben ist die erweiterte Messunsicherheit, die sich aus der Standardmessunsicherheit durch Multiplikation mit dem Erweiterungsfaktor $k=2$ ergibt. Der Wert der Messgröße liegt so mit einer Wahrscheinlichkeit von annähernd 95% im zugeordneten Werteintervall.

Es folgen:

- Die Messergebnisse in tabellarischer Form
- Die Diagramme der Formprofile mit unterschiedlichen Grenzwellenlängen bzw. Grenzwellenzahlen.
- Die Frequenzspektren der ungefilterten Formprofile

- Die Messunsicherheitsbudgets nach DIN V ENV 13005 (GUM)
- CD-R mit den für die Fouriertransformation angewandten Punkten

Ergebnisse:

1. Formabweichungen

Rundheit – Außenfläche (D180)					
Filtergrenzwellenzahl [W/U]	1500	500	150	50	15
Formabweichung [μm]	19,8	17,0	12,5	9,3	5,1

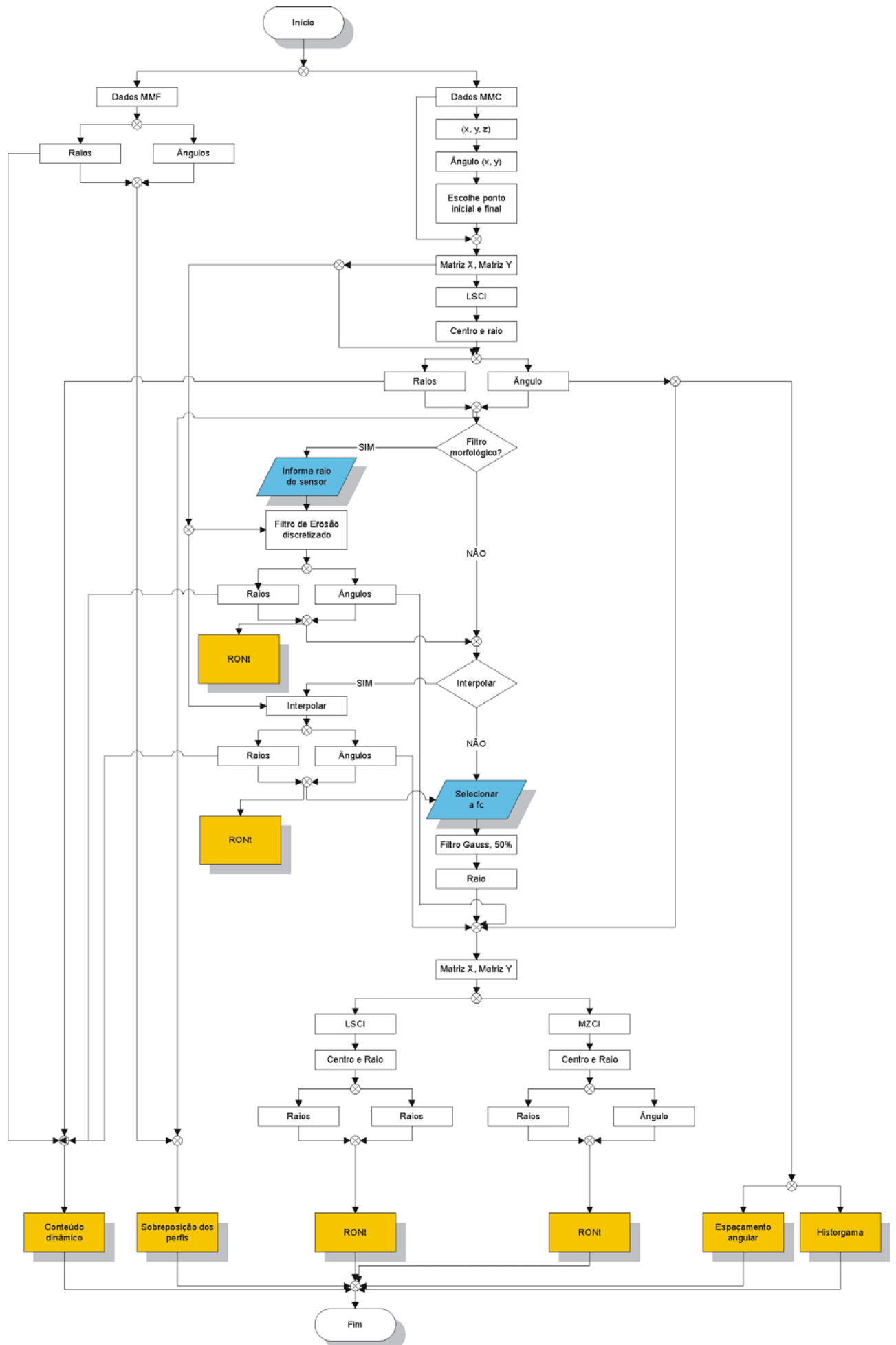
Geradheit (D30 – 155)				
Filtergrenzwellenlänge [mm]	0,25	0,8	2,5	8,0
Formabweichung 0° [μm]	19,8	16,4	10,5	3,8
Formabweichung 90° [μm]	19,6	16,1	10,4	3,9
Formabweichung 180° [μm]	19,7	16,2	10,4	4,1
Formabweichung 270° [μm]	19,6	16,2	10,3	3,8

2. Wellentiefen der dominanten Harmonischen

Rundheit (D180)					
Wellenzahl [W/U]	500	150	50	15	5
Wellentiefe [μm]	5,4	5,0	4,8	4,9	4,9

Geradheit Stirnfläche (D52,5 – 132,5)			
Wellenlänge [mm]	0,8	2,5	8,0
Wellentiefe 0° [μm]	6,7	6,9	6,9
Wellentiefe 90° [μm]	6,7	6,8	6,9
Wellentiefe 180° [μm]	6,7	6,9	6,9
Wellentiefe 270° [μm]	6,7	6,8	6,8

ANEXO 3



Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)