

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
METROLOGIA CIENTÍFICA E INDUSTRIAL**

Francisco Augusto Arenhart

**PLANEJAMENTO E MELHORIA DE PROCESSOS DE
MEDIÇÃO DE FORMA POR *SCANNING* EM
MÁQUINAS DE MEDIR POR COORDENADAS**

Florianópolis

2010

Francisco Augusto Arenhart

**PLANEJAMENTO E MELHORIA DE PROCESSOS DE
MEDIÇÃO DE FORMA POR *SCANNING* EM
MÁQUINAS DE MEDIR POR COORDENADAS**

Dissertação submetida ao Programa de
Pós-Graduação em Metrologia Científica
e Industrial da Universidade Federal de
Santa Catarina para a obtenção do Grau
de Mestre em Metrologia.

Orientador: Prof. Dr. Eng. Gustavo
Daniel Donatelli

Florianópolis

2010

Catlogação na fonte pela Biblioteca Universitária
da
Universidade Federal de Santa Catarina

A681p Arenhart, Francisco Augusto
Planejamento e melhoria de processos de medição de forma por
scanning em máquinas de medir por coordenadas [dissertação] / Francisco
Augusto Arenhart ; orientador, Gustavo Daniel Donatelli. - Florianópolis,
SC, 2010.

188 p.: il., grafs., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina,
Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Metrologia
Científica e Industrial.

Inclui referências

1. Metrologia científica. 2. Coordenadas - Medição. 3. Formas -
Medição. 4. Planejamento - Medição. 5. Incerteza de medição. I. Donatelli,
Gustavo Daniel. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de
Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial. III. Título.

CDU 537.7

Francisco Augusto Arenhart

**PLANEJAMENTO E MELHORIA DE PROCESSOS DE
MEDIÇÃO DE FORMA POR *SCANNING* EM
MÁQUINAS DE MEDIR POR COORDENADAS**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Metrologia”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial.

Florianópolis, 07 de junho de 2010.

Prof. Gustavo Daniel Donatelli, Dr. Eng.
Orientador

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr. Eng.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr. Eng.
Presidente

Prof. Rolf Bertrand Schroeter, Dr. Eng.
Membro

Mauricio de Campos Porath, Dr.-Ing.
Membro

AGRADECIMENTOS

Gostaria de prestar sinceros agradecimentos ao orientador Prof. Gustavo Daniel Donatelli pelo suporte e pela confiança concedidos a mim e ao meu trabalho durante todos esses anos de trabalho conjunto.

Ao Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial de Universidade Federal de Santa Catarina, professores, alunos e colaboradores, em especial ao Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior e a Rosana Vieira pelo suporte prestado ao longo desta caminhada.

À Fundação CERTI pela oportunidade de participar deste projeto de colaboração internacional Brasil/Alemanha, aos colegas de trabalho, em especial ao Eng. Alexandre Lucas e ao Eng. Mateus Dieckmann de Oliveira, por todo o suporte fornecido para as realizações dos experimentos e do trabalho como um todo.

Ao DFG (Fundação de Pesquisa Alemã) pelo suporte financeiro e ao WZL (Laboratório de Máquinas-Ferramenta) da RWTH Aachen, em especial à Susanne Nisch, pelo intercâmbio de conhecimentos.

A duas importantes pessoas que participaram e contribuíram de forma direta para o desenvolvimento e enriquecimento deste trabalho: Eng. Felipe Luis Probst e ao Dr.-Ing. Mauricio de Campos Porath.

Às empresas e ao pessoal que contribuíram com os experimentos realizados.

Às pessoas queridas: meus pais, pela minha formação e pelo suporte incondicional prestado por toda minha vida; minha menina, Maria Augusta, pela companhia, compreensão e companheirismo em todos os momentos; meu avô Helmuth (*in memorian*), pelos importantes ensinamentos.

Brevis esse laboro, obscurus fio.

Quintus Horatius Flaccus,
Ars Poetica, 25.

RESUMO

No contexto de avaliação e controle da produção, o desempenho ótimo de um processo de medição requer a minimização do tempo de execução do conjunto de tarefas de medição específicas a serem realizadas em uma determinada peça, sem comprometer o desempenho metrológico requerido para cada uma das tarefas de medição. Com a introdução da tecnologia de aquisição por contato contínuo (*scanning*) para medição de superfícies em máquinas de medir por coordenadas (MMC), uma redução significativa dos tempos de medição pôde ser obtida, tornando viável a avaliação de especificações que exigem altas densidades de pontos, em particular às relacionadas à avaliação de desvios de forma. Por outro lado, devido ao caráter dinâmico das medições realizadas por *scanning*, os fatores que influenciam o desempenho metrológico de uma MMC operando nesse modo são muitos, tornando o planejamento do processo de medição uma tarefa extremamente complexa. Além disso, caso o processo de medição não atenda aos requisitos metrológicos definidos para sua aplicação, melhorias deverão ser implementadas. Como as etapas de planejamento e a melhoria dos processos de medição envolvem custos associados à sua realização, a obtenção do equilíbrio entre tempo de medição e desempenho metrológico exige a adoção de uma abordagem sistemática e de ferramentas adequadas. O presente trabalho apresenta uma proposta para auxiliar as etapas de planejamento e a melhoria de processos de medição de forma por *scanning* em MMC. O modelo de planejamento e melhoria proposto tem como base o uso de informações disponíveis a priori e de conhecimentos preestabelecidos, bem como das informações de alto valor agregado geradas na etapa de validação do desempenho metrológico do processo de medição. Ferramentas e métodos de suporte ao modelo são apresentados e discutidos. Resultados de dois estudos de caso envolvendo processos de medição de forma por *scanning* industriais são apresentados.

Palavras-chave: Metrologia por coordenadas, medição de forma, planejamento da medição, incerteza de medição.

ABSTRACT

In the field of product evaluation and manufacturing control, the optimal performance of a measurement process demands the minimization of the time required to perform a predefined set of specific measurement tasks on a particular workpiece without compromising the metrological performance required for each of the tasks. With the introduction of the continuous contact acquisition technology (scanning) for surfaces measurement with coordinate measuring machines (CMM), a significant reduction in measurement times were obtained, making feasible the evaluation of specifications that require high point densities, in particular those related to the assessment of form deviations. On the other hand, due to the dynamic nature of the measurements performed by scanning, the influence factors which may decrease the metrological performance of a CMM operating in this mode are numerous, turning the measurement process planning into a fairly complex task. Furthermore, if the measurement process does not comply with the metrological requirements defined for its application, improvements must be implemented. Once the planning and improvement of measurement processes involve associated costs, the adoption of a systematic approach and appropriate tools to achieve the balance between measurement time and metrological performance becomes a requirement. This work presents a proposal to assist the planning and improvement of form measurement processes by scanning with CMM. The model of planning and improving of the measurement process is based on information available a priori and pre-established knowledge, as well as on the information generated during the validation of the metrological performance of the measurement process. Methods and tools supporting the model are presented and discussed. Results from two case studies involving industrial form measurement processes by scanning are presented.

Keywords: Coordinate metrology, form measurement, measurement planning, measurement uncertainty.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASME – *American Society of Mechanical Engineers*
CAA – *Computer Aided Accuracy*
CAD – *Computer Aided Design*
CEP – *Controle Estatístico do Processo*
CMM – *Coordinate Measuring Machine*
D-CAA – *Dynamic bending Computer Aided Accuracy*
DFT – *Discrete Fourier Transform*
FFT – *Fast Fourier Transform*
GD&T – *Geometric Dimensioning and Tolerancing*
GPS – *Geometrical Product Specifications*
GUM – *Guide to the expression of Uncertainty in Measurement*
ISO – *International Standardization Organization*
IFFT – *Inverse Fast Fourier Transform*
LSCI – *Least Squares reference Circle*
LSCY – *Least Squares reference Cylinder*
LSLI – *Least Squares reference Line*
LSPL – *Least Squares reference Plane*
MMC – *Máquina de Medir por Coordenadas*
MWN – *MehrWellenNormal*
MCCI – *Minimum Circumscribed reference Circle*
MCCY – *Minimum Circumscribed reference Cylinder*
MICI – *Maximum Inscribed reference Circle*
MICY – *Maximum Inscribed reference Cylinder*
MSA – *Measurement Systems Analysis*
MZCI – *Minimum Zone reference Circle*
MZCY – *Minimum Zone reference Cylinder*
MZLI – *Minimum Zone reference Line*
MZPL – *Minimum Zone reference Plane*
OPR – *Ondulações Por Revolução*
P&D – *Pesquisa e Desenvolvimento*
PDCA – *Plan, Do, Check, Act*
R&R – *Repetitividade e Reprodutibilidade*
RMS – *Root-Mean-Square*
RONt – *Desvio de circularidade pico-vale*
RONp – *Desvio de circularidade pico-referência*
RONv – *Desvio de circularidade referência-vale*
RONq – *Desvio de circularidade RMS*
TS – *Technical Specification*

VAST – *Variable Accuracy and Speed probing Technology*
VDE – *Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik*
VDI – *Verein Deutscher Ingenieure*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	PLANEJAMENTO E MELHORIA DOS PROCESSOS DE MEDIÇÃO	22
1.2	AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO METROLÓGICO DOS PROCESSOS DE MEDIÇÃO	25
1.3	MELHORIA DOS PROCESSOS DE MEDIÇÃO ATRAVÉS DO GANHO DE CONHECIMENTO	27
1.4	OBJETIVOS DO TRABALHO	28
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	30
2	ESTADO DA ARTE SOBRE MEDIÇÃO DE FORMA POR SCANNING EM MMC	31
2.1	ANÁLISE DE SINAIS EM MEDIÇÕES DE FORMA	33
2.2	ESTRUTURA DA MMC	35
2.3	SISTEMA DE APALPAÇÃO	41
2.4	AMBIENTE DE MEDIÇÃO	58
2.5	INTERFACE PEÇA/APALPADOR	60
2.6	DISCRETIZAÇÃO	67
2.7	FILTRAGEM DIGITAL	72
2.8	TRATAMENTO DE <i>OUTLIERS</i>	80
2.9	CÁLCULO DOS ELEMENTOS DE REFERÊNCIA E PARÂMETROS GEOMÉTRICOS	83
2.10	FONTES DE INCERTEZA RELACIONADAS À DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO	84
2.11	SÍNTESE DO CAPÍTULO	92
3	AVALIAÇÃO E MELHORIA DOS PROCESSOS DE MEDIÇÃO DE FORMA POR SCANNING EM MMC	95
3.1	MÉTODO PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO METROLÓGICO	97
3.2	ROTINAS DE PROCESSAMENTO E AVALIAÇÃO GEOMÉTRICA DE PERFIS INTEGRAIS	109
3.3	FERRAMENTAS DE ANÁLISE DE PERFIS INTEGRAIS	121
3.4	CONSIDERAÇÕES SOBRE O AMBIENTE DE ANÁLISE	126
4	ESTUDOS DE CASO	127
4.1	ESTUDO DE CASO 1 CIRCULARIDADE EM UM TAMBOR DE FREIO	128
4.2	ESTUDO DE CASO 2 CIRCULARIDADE EM UM CUBO DE EIXO	141
4.3	SÍNTESE DO CAPÍTULO	150

5	RECOMENDAÇÕES PARA O PLANEJAMENTO DO PROCESSO DE MEDIÇÃO	155
5.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	155
5.2	DEFINIÇÃO DOS OPERADORES DE ESPECIFICAÇÃO	156
5.3	DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE AQUISIÇÃO	157
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	163
	REFERÊNCIAS	167
	APÊNDICE A – IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO DA ANÁLISE ESTATÍSTICA DO PERFIL PARTICIONADO PARA RECONHECIMENTO E ELIMINAÇÃO DE <i>OUTLIERS</i>	179
	APÊNDICE B – FORMULÁRIO PARA DEFINIÇÃO DOS OPERADORES DE ESPECIFICAÇÃO	181
	APÊNDICE C – ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DA ESTIMATIVA INICIAL DA VELOCIDADE DE MEDIÇÃO	183

1 INTRODUÇÃO

A avaliação de conformidade com as especificações geométricas de produto segundo normas ISO (GPS) [1] ou ASME (GD&T) [2] é uma das mais importantes atividades para a garantia da qualidade dos produtos e processos na indústria de manufatura mecânica.

A introdução das máquinas de medir por coordenadas (MMC) no campo da metrologia dimensional representou um grande avanço em termos de flexibilidade e versatilidade, tornando possível a avaliação integrada dos diversos tipos de especificações geométricas em um único equipamento.

Nas suas diferentes variantes, as MMC podem ser utilizadas em medições de apoio a pesquisa e desenvolvimento (P&D), na medição de ferramental e na calibração de padrões e peças de referência, tarefas que requerem elevada exatidão e rápida adaptabilidade. Outra grande aplicação da tecnologia de medição por coordenadas é a inspeção e controle da produção, onde tempo de medição passa a ser variável de fundamental importância.

A informação que descreve a superfície da peça pode ser adquirida através de diferentes princípios de sensoriamento, destacando-se a medição por contato e a medição óptica (fora do escopo deste trabalho). As primeiras MMC podiam adquirir a posição de pontos isolados na superfície da peça, por apalpação direta com sensores de contato. As coordenadas dos pontos coletados eram processadas para obter os parâmetros da geometria substituta, geralmente usando algoritmos de mínimos quadrados. As limitações deste modo de aquisição são evidentes: elevado tempo de medição e limitada informação sobre a superfície da peça. Isso dificulta a medição confiável de diversas características geométricas, especialmente a medição de desvios de forma.

Embora a aquisição ponto a ponto seja ainda amplamente utilizada na medição por coordenadas, os fabricantes de MMC têm introduzido progressivamente a capacidade de aquisição por contato contínuo (*scanning*). Nessa modalidade, as MMC modernas podem adquirir as coordenadas de um grande número de pontos ao longo de uma trajetória, durante a qual o sensor permanece em contato com a superfície da peça. Deste modo é possível alcançar um conhecimento mais apurado da superfície da peça, reduzindo a contribuição à incerteza decorrente das limitações de amostragem e diminuindo simultaneamente os tempos de medição (Figura 1).

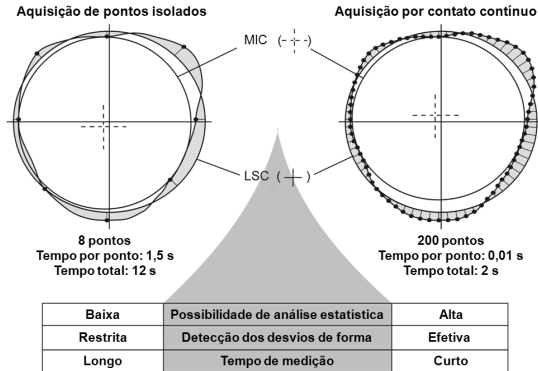


Figura 1 – Comparação entre processos de aquisição ponto a ponto e por contato contínuo. Fonte: Adaptada de [3].

Essas vantagens são chave para viabilizar a medição de desvios de forma em máquinas de medir por coordenadas, especialmente quando as tolerâncias apertadas exigem da MMC um desempenho metrológico semelhante ao de equipamentos específicos para essa tarefa. A realização de medições de comprimento, forma, posição e orientação em um único equipamento permite reduzir os tempos de fixação e posicionamento das peças e os tempos e custos decorrentes de seu transporte interno. No caso particular de grandes peças, a possibilidade de avaliar características de forma em MMC permite evitar a aquisição de equipamentos específicos de alto custo.

No entanto, a avaliação de desvios de forma em MMC usando a tecnologia de *scanning* apresenta desafios ainda não completamente resolvidos. Os fatores que influenciam o desempenho metrológico de uma MMC operando nesse modo são muitos. Embora alguns deles possam ser inferidos a partir do conhecimento de como a MMC se comporta na medição ponto a ponto, outros dependem da natureza dinâmica inerente às medições por contato contínuo. Entre os fatores de influência mais significativos em medições por *scanning*, pode-se citar as características do sistema de medição (p. ex. rigidez estrutural, resposta dinâmica do sensor), os parâmetros utilizados na medição por *scanning* (e.g. velocidade de medição, parâmetros de filtragem) e as características da superfície sob avaliação (p. ex. material, acabamento superficial). A Figura 2 mostra um conjunto de fatores de influência sobre os resultados de medição de forma por *scanning* em MMC. É importante ressaltar que poucos desses fatores atuam de forma independente sobre os resultados de medição.

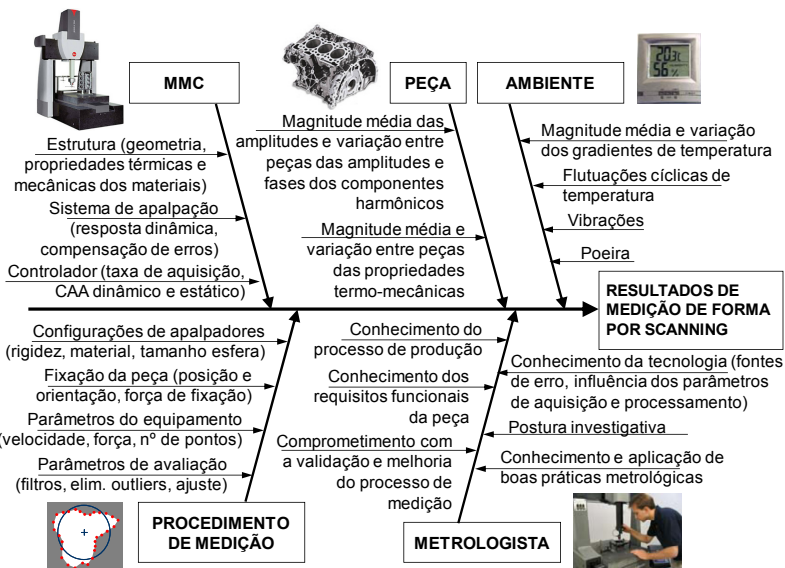


Figura 2 – Fatores de influência sobre a qualidade dos resultados de medição de forma por *scanning* em MMC. Fonte: Autor.

A obtenção do desempenho ótimo de um processo de medição no contexto de avaliação e controle da produção envolve a minimização do tempo de execução do conjunto de tarefas de medição específicas a serem realizadas em uma determinada peça, sem comprometer o desempenho metrológico requerido para cada tarefa de medição. Dessa forma, a determinação dos parâmetros de medição por *scanning* torna-se uma tarefa extremamente complexa, a ser executada por planejadores com experiência no tema.

Embora alguns fabricantes de MMC já tenham introduzido sistemas de suporte à definição dos parâmetros de medição por *scanning* nos seus softwares de medição [4], o desempenho metrológico real das medições ainda permanece obscuro. Até o presente não foi proposta uma metodologia consistente para avaliar a incerteza das medições de forma por *scanning* em MMC. Perante essa realidade, é impossível garantir a rastreabilidade das medições, assim como demonstrar que o desempenho metrológico do processo de medição é adequado à tarefa de medição específica (e.g. avaliar a capacidade do processo de medição

pelo atendimento da *regra de ouro da metrologia*¹ ou por outros procedimentos consolidados [5-8]).

Mesmo de posse de uma sistemática para avaliação do desempenho metrológico, há ainda aspectos que precisam ser resolvidos para viabilizar um desempenho ótimo das medições por *scanning*. As tarefas de planejamento do procedimento de medição e de implementação de melhorias no processo de medição devem consumir o mínimo de tempo e recursos disponíveis. Para tanto, informação detalhada sobre o comportamento do processo de medição, que possibilite identificar e corrigir as causas de erro é necessária. Apesar da grande quantidade de informação que pode ser obtida das nuvens de pontos adquiridas na medição de forma por *scanning*, poucos softwares de medição disponíveis em MMC utilizam ferramentas que permitam extrair dessa informação um conhecimento mais apurado e orientado à melhoria do processo de medição. Além disso, o conhecimento da tecnologia, dos fatores de influência e suas inter-relações é de vital importância para um uso adequado das informações disponíveis, de modo que resultados desejados sejam rapidamente obtidos. Infelizmente, esse conhecimento não está ao alcance da grande maioria dos planejadores e operadores de MMC.

As necessidades e limitações acima citadas definem um campo para pesquisa relevante em metrologia dimensional, cujos resultados podem ser de grande valor para os usuários e também para os fabricantes de máquinas de medir por coordenadas. Assim, o desenvolvimento de um método que viabilize uma execução eficiente do planejamento e da melhoria de processos de medição de forma em máquinas de medir por coordenadas utilizando a tecnologia de *scanning* é o objeto do presente trabalho.

1.1 PLANEJAMENTO E MELHORIA DOS PROCESSOS DE MEDIÇÃO

No contexto industrial, a realização de medições é requisito para obtenção da qualidade final de um produto ao longo de toda sua vida. As especificações de produto a serem avaliadas são definidas nas etapas de projeto de produto e processo, e documentados no plano de controle [12]. Após a liberação do processo de produção, os objetivos das

¹ A *regra de ouro da metrologia* estabelece que a incerteza de medição seja menor que 1/10 do intervalo de especificação para que a medição possa ser considerada capaz.

medições realizadas normalmente são a avaliação da conformidade do produto, o controle estatístico e avaliação da capacidade dos processos de produção.

O planejamento de um processo de medição inicia com a seleção e aquisição (ou projeto e fabricação) dos equipamentos e a definição do ambiente de medição para avaliação das especificações definidas no plano de controle. Essa etapa é de vital importância para o adequado funcionamento futuro dos processos de medição, pois uma decisão equivocada pode resultar em um processo de medição com desempenho metrológico irreversivelmente abaixo do requerido. Portanto, em primeiro lugar, devem estar claramente definidas e compreendidas as tarefas de medição, e a aplicação que será dada aos resultados de medição. Além disso, o planejador deve ter conhecimento das tecnologias dos sistemas de medição, das especificações dos fabricantes, das condições em que estas especificações se mantêm válidas, e principalmente, do que elas realmente significam quando se considera o mensurando sob avaliação². Esses dois últimos pontos são questões chave para uma correta tomada de decisão na aquisição dos equipamentos.

A etapa seguinte à seleção dos sistemas de medição é a definição de procedimentos de medição para cada tarefa específica. No caso de medições por coordenadas, a atividade mais importante na definição do procedimento é a escolha dos parâmetros de medição. Inicialmente, um primeiro conjunto de parâmetros de medição deve ser proposto para cada tarefa específica. A escolha desses parâmetros não é tarefa trivial, normalmente exigindo do planejador um conjunto de conhecimentos, entre outros, da tecnologia de medição por coordenadas, de boas práticas metrológicas gerais e específicas para cada tarefa de medição, de especificações de produto, de processamento de dados [9]. Além disso, é importante que o comportamento do sistema de medição para execução de tarefas específicas possa ser antecipado, permitindo uma eficiente definição dos parâmetros de medição. Para tanto, as informações que estiverem disponíveis, como especificações de fabricante, ensaios específicos realizados no equipamento, avaliação por um sistema especialista, etc., podem (e devem) ser utilizadas.

Com o sistema de medição e o procedimento de medição definidos, tem-se determinado o processo de medição, o qual deve ser

² Por exemplo, máquinas de medir por coordenadas são especificadas com base na medição de comprimentos, conforme procedimentos de avaliação descritos em normas tais como a ISO 10360-2 [10] e a ASME B.89.4.10360.2 [11]. Os resultados dessas avaliações não descrevem diretamente o desempenho das MMC na medição de especificações de geométricas.

avaliado do ponto de vista operacional e metrológico. Como a medição é um processo que não agrega diretamente valor ao produto e, por estar inserido na cadeia de produção, aumentando o *lead time*, o objetivo do planejamento é obter, simultaneamente, um processo de medição com desempenho metrológico aceitável, e que execute as tarefas de medição no menor tempo possível. Caso o desempenho do processo de medição não esteja de acordo com o almejado, será necessário iniciar um ciclo PDCA objetivando-se atingir o ponto de equilíbrio (Figura 3).

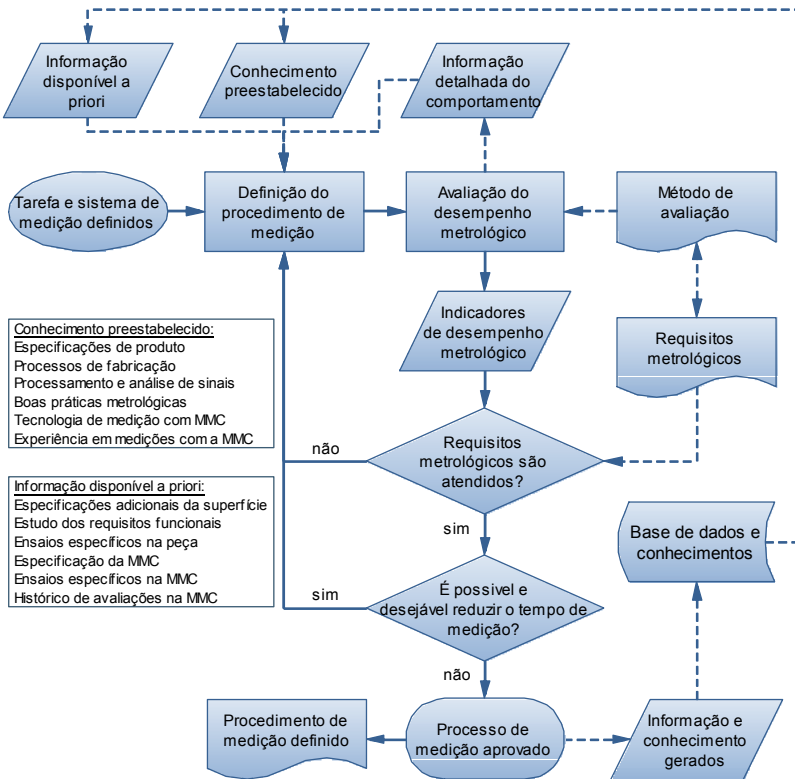


Figura 3 – Fluxograma do ciclo de planejamento e melhoria de um processo de medição por coordenadas. Fonte: Autor.

As etapas de planejamento e melhoria dos processos de medição requerem o envolvimento de recursos humanos com maior capacitação e podem exigir tempos consideravelmente longos de medição nos equipamentos, suscitando maiores custos do que as medições executadas na rotina. Portanto, um conjunto de parâmetros bem escolhidos a priori,

que levem uma rápida convergência ao desempenho almejado, irá reduzir consideravelmente os custos associados ao planejamento e à melhoria dos processos de medição. Um conjunto de recomendações gerais para o planejamento da medição de forma por *scanning* foram apresentadas anteriormente por [3].

1.2 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO METROLÓGICO DOS PROCESSOS DE MEDIÇÃO

A adequação do processo de medição para realização de tarefas específicas é constatada mediante o atendimento de um conjunto de requisitos metrológicos específicos (relacionados à tarefa), também definidos nas etapas de projeto de produto e processo, e documentados no plano de controle [12]. Para verificar o atendimento a esses requisitos, os processos de medição devem ser submetidos a métodos de avaliação específicos, cada qual definido por um procedimento de avaliação, e em alguns casos, por critérios de aceitação bem definidos. Em particular, a especificação técnica ISO/TS 16949 [13], de aplicação preferencial na indústria automotiva e sua cadeia de fornecimento, estabelece que “*Estudos estatísticos devem ser realizados para analisar a variação existente nos resultados de cada tipo de sistema de medição e equipamento de teste*”.

Para o atendimento deste requisito, o manual de Análise de Sistemas de Medição (MSA) [5] recomenda um conjunto de métodos estatísticos para analisar distintos comportamentos metrológicos do processo de medição. O teste de estabilidade, baseado no uso de gráficos de Shewhart, permite avaliar se o processo de medição está sob controle estatístico. Já os testes de tendência e linearidade avaliam, respectivamente, se os desvios de *offset* (tendência), e de ganho (linearidade), são estatisticamente significativos frente à variação amostral associada ao erro de repetitividade. Se existirem instabilidades ou se a tendência e linearidade se mostrarem significativas, o MSA orienta para corrigir esses problemas antes da liberação do sistema de medição. A verificação da adequabilidade dos sistemas de medição para realização das tarefas de avaliação de conformidade do produto e de controle e dos processos de produção fica a cargo do teste de repetitividade e reprodutibilidade (*R&R*). Este teste viabiliza a análise do efeito de um ou mais fatores que afetem a reprodutibilidade (e.g. o operador) e também fornece indicadores numéricos da capacidade de

medição, que são usados para conhecer se os erros de repetitividade e reprodutibilidade são pequenos frente à tolerância de produto ($R\&R/Tol$) e frente à variação total presente nos dados ($R\&R/VT$). Em geral, pode-se afirmar que a análise de sistemas de medição na cadeia automotiva está pautada na vertente estatística industrial norte-americana, relacionada fortemente com os conceitos de controle estatístico de processos (CEP).

O critério de análise do desempenho dos sistemas de medição seguido pelos comitês da ISO não exclui explicitamente os métodos de análise citados acima, mas enfatiza a necessidade de avaliar a incerteza de medição como requisito para provar a rastreabilidade dos resultados de medição [14]. A incerteza de medição é o mais robusto indicador da qualidade das medições, porquanto se propõe a considerar todas as potenciais fontes significativas de erro de medição, incluindo a incerteza de calibração dos padrões e/ou instrumentos e os efeitos de longo prazo, difíceis de quantificar em experimentos breves. O Guia para Expressão da Incerteza de Medição (GUM) [15] fornece orientações para a avaliação da incerteza de medição pelo método dos coeficientes de sensibilidade. O Suplemento 1 do GUM [16] fornece orientações para avaliação por simulação de Monte Carlo.

A relação entre a incerteza de medição e a avaliação de conformidade do produto é tratada na norma ISO 14253-1 [17]. Esse documento apresenta um conjunto de regras de decisão para provar a conformidade e não-conformidade com a especificação. Define com nitidez que a incerteza expandida determina um intervalo arredor dos limites de especificação dentro do qual é impossível provar a conformidade ou não-conformidade. Desta forma, o valor da incerteza influencia os custos de fabricação, tornando-se um elemento chave na relação cliente-fornecedor.

Embora a ISO 14253-1 não faça referência a um valor de incerteza “limite” ou “adequado”, é evidente que se a incerteza de medição se torna significativa com referência ao intervalo de tolerância do produto, haverá uma drástica redução do intervalo dentro do qual a conformidade pode ser provada. Isso prejudica o fornecedor, porquanto deverá reduzir a variabilidade do processo de fabricação para que as unidades produzidas não invadam a região de dúvida próxima aos limites de especificação.

Destarte, a vertente ISO conta com a incerteza de medição, um indicador de qualidade das medições mais robusto que o $R\&R$ da vertente norte-americana, mas não fornece valores limite concretos para

o mesmo. Como guia, pode-se usar a já mencionada “*regra de ouro*” para definir a aceitabilidade de um processo de medição.

Infelizmente, a avaliação da incerteza de tarefas de medição específicas em MMC é uma problemática ainda não resolvida. Embora diversas soluções tenham sido propostas [18-20], poucas foram aplicadas com sucesso para avaliar a incerteza de medições de forma por *scanning* em MMC. Assim, a validação e a melhoria contínua ficam comprometidas pela falta de valores confiáveis do principal indicador de desempenho.

Pelas razões acima, o presente trabalho focará na avaliação dos processos de medição de forma por *scanning* em MMC utilizado a incerteza de medição como indicador da qualidade das medições, sem esquecer, porém, da conveniência de aplicar conceitos tais como CEP para avaliar a evolução das tendências no tempo e entre peças e a consistência do erro de repetitividade. Também será considerada a avaliação de outros indicadores de desempenho metrológico, tais como o *R&R*, de ampla aplicação no meio industrial brasileiro e no mundo todo.

1.3 MELHORIA DOS PROCESSOS DE MEDIÇÃO ATRAVÉS DO GANHO DE CONHECIMENTO

Sabe-se que a melhoria contínua da qualidade só é possível a partir do ganho contínuo de conhecimento sobre os processos que operam no ciclo de vida do produto. Em particular, para induzir a melhoria dos processos produtivos, é necessário que a informação obtida através das medições das características do produto e do processo seja aproveitada para gerar conhecimento e *know-how* [21].

A qualidade do conhecimento gerado irá depender da qualidade da informação coletada, determinada pela incerteza de medição. Quanto menor seja a incerteza, maior será a qualidade do conhecimento, estando o limite de aprimoramento definido pela relação entre os custos de melhoria dos processos de medição e os benefícios que podem ser obtidos com o uso da informação de melhor qualidade. Este conceito propõe uma nova abordagem para o valor de incerteza de medição a ser considerado como critério de aceitação de um processo de medição, como foco na melhoria contínua através do ganho de conhecimento sobre o processo sendo avaliado.

Cabe destacar que para a transformação da informação (que é puramente formal e não tem significado por si própria) em conhecimento, a informação das medições deve ser associada a outras informações e ao conhecimento já existente. Um pré-requisito para essa transformação é a comunicação, o que faz necessário que a informação seja codificada antes de ser transmitida. Assim, a capacidade de atuar na melhoria de um processo de fabricação depende da qualidade das informações geradas (baixa incerteza de medição), mas também do modo que a informação é tratada para geração de conhecimento sobre o sistema de causas de variação do processo fabril [21].

O mesmo conceito pode ser aplicado à melhoria dos processos de medição, foco deste trabalho. Dada a natureza conflitante das variáveis incerteza de medição e tempo de medição, é necessário um apurado conhecimento do processo de medição para achar o ponto de equilíbrio entre as mesmas. A avaliação da incerteza de medição permite ganhar conhecimento sobre o processo de medição. Na avaliação de especificações geométricas de produto, porém, a definição do mensurando requer a parametrização dos dados adquiridos³, reduzindo drasticamente a informação contida nos resultados de medição. Desta forma, os resultados de medição têm reduzido seu potencial de fornecer realimentação de informações para atuar nas causas do erro de medição com fins de melhoria.

Assim, é necessário flanquear a avaliação de incerteza com sistemas que permitam analisar integralmente os dados coletados, permitindo revelar a causa dos comportamentos observados através dos parâmetros geométricos, tornando os processos de medição passíveis de melhoria.

1.4 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo geral do trabalho é fornecer uma base técnico-científica que permita auxiliar as etapas de planejamento e melhoria dos processos de medição de forma por *scanning* em MMC utilizando a incerteza de medição como principal indicador de desempenho metrológico (Figura 4).

Os objetivos específicos são:

³ Na definição de especificações de produto, o conjunto de pontos extraídos em uma medição é reduzido a um parâmetro geométrico (e.g. desvio de circularidade).

- Sistematizar o conhecimento existente sobre o sistema de causas do erro e sua associação com os parâmetros de medição em processos de medição de forma por *scanning* em MMC;
- Formular um conjunto de recomendações que apóiem o planejamento da medição de forma por *scanning* em MMC, abrangendo a definição dos parâmetros de aquisição, de processamento e de avaliação de especificação geométrica;
- Propor um método para avaliação do desempenho metrológico dos processos de medição de forma por *scanning* em MMC, com foco na incerteza de medição, que seja capaz de abranger todas as fontes de incerteza relevantes desse tipo de processo, e avaliá-lo do ponto de vista metrológico (probabilidade de abrangência e intervalos de incerteza) e operacional (possibilidade de implementação em processos de medição reais);
- Criar um ambiente computacional que permita avaliar o comportamento de processos de medição de forma por *scanning* através de uma análise integral do perfil extraído (nuvens de pontos), permitindo simultaneamente identificar comportamentos atípicos e causas de erro dominantes, e obter os indicadores de desempenho metrológico de acordo com o método desenvolvido;
- Aplicar as soluções desenvolvidas a casos reais de medições de forma por *scanning* em MMC, demonstrando sua capacidade de geração de conhecimento sobre o comportamento de processos de medição e seu potencial como ferramenta para auxiliar na melhoria dos mesmos.

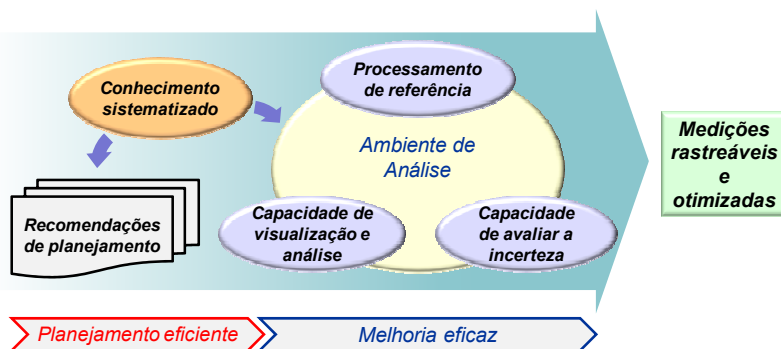


Figura 4 – Elementos constituintes da solução a ser proposta para atingir o objetivo geral do trabalho. Fonte: Autor.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O conhecimento da tecnologia e a compreensão dos princípios e fenômenos envolvidos em uma medição de forma por *scanning* é imprescindível para interpretar as informações disponíveis a priori e geradas durante a avaliação do processo de medição, permitindo realizar um eficiente planejamento da medição e propor melhorias eficazes aos processos de medição. No Capítulo 2 é realizada uma revisão do conhecimento em estado da arte sobre medições de forma por *scanning*, objetivando evidenciar a relação entre as causas dos erros de medição e os parâmetros de medição associados.

O Capítulo 3 apresenta um método para avaliação e melhoria dos processos de medição de forma por *scanning* com MMC utilizando um ambiente computacional de análise. O método para avaliação do desempenho metrológico apresentado é uma extensão da especificação técnica ISO/TS 15530-3 [22], a qual orienta a avaliação da incerteza de medição utilizando artefatos padrão calibrados. O ambiente foi desenvolvido com o objetivo de automatizar a avaliação do desempenho metrológico e de obter informações detalhadas sobre o comportamento dos processos de medição de forma por *scanning* a partir da análise de perfis integrais extraídos. Além disso, o ambiente conta com rotinas para processamento de perfis desenvolvidas e/ou implementadas para minimizar a influência de problemas típicos da aquisição de perfis por *scanning*.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados de dois estudos de caso envolvendo empresas fornecedoras do segmento automotivo e um laboratório de referência. Os estudos de caso envolveram experimentos realizados nas MMC de suporte à produção, a partir de medições em peças de linha de produção contendo desvios de forma conhecidos mediante calibração. Os resultados obtidos mostram o potencial do ambiente de análise para uma eficiente adequação do processo de medição às exigências metrológicas através da geração de conhecimento.

O Capítulo 5 sintetiza o conhecimento em estado da arte e gerado durante o desenvolvimento do trabalho na forma de um guia de recomendações práticas para auxiliar o planejamento das tarefas de medição de forma por *scanning* em MMC.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta discussões e conclusões sobre os resultados obtidos de forma geral, bem como propostas para trabalhos futuros.

2 ESTADO DA ARTE SOBRE MEDIÇÃO DE FORMA POR SCANNING EM MMC

O modelo de casca (*skin model*) introduzido pela ISO 14660-1 [23], define os elementos geométricos nominais disponíveis para o projeto de uma peça como: ponto, linha, plano, círculo, esfera, cilindro, cone e tóro. Em peças reais, os elementos apresentam imperfeições geométricas impostas pelos processos de fabricação. De acordo com o modelo de casca, os elementos de peças reais são denominados de *elementos integrais reais*, e superfície da peça como um todo, de *superfície real da peça*.

Nos processos de medição de forma por contato contínuo (aquisição dinâmica), o sinal de entrada são os elementos integrais reais sendo avaliados, limitados, contudo, ao percurso de varredura executado pelo apalpador. O elemento integral real, sendo um sinal analógico, deve ser adquirido, transmitido, discretizado e armazenado em formato digital para posterior processamento. Esse conjunto de operações é aqui denominado *processo de aquisição*.

Durante o processo de aquisição, os efeitos combinados de características inerentes do sistema de medição (e.g. desvios geométricos da MMC), das características das superfícies sob avaliação (e.g. rugosidade) e dos parâmetros de aquisição utilizados (e.g. velocidade de medição) provocam transformações não desejáveis no sinal. Desse modo, o sinal de saída do processo de aquisição constitui uma representação distorcida (além de limitada) do elemento integral real sob investigação. O conjunto de sinais adquiridos pelo sistema de medição (nuvens de pontos) para representar um elemento integral real é denominado *elemento integral extraído*.

Após a aquisição, o sinal pode ser intencionalmente modificado com o objetivo de minimizar os efeitos de algumas transformações indesejadas ocorridas no processo de aquisição (e.g. eliminar *outliers*). O conjunto de operações utilizadas para o tratamento dos sinais adquiridos é aqui denominado *processo de pré-processamento*.

Por fim, os parâmetros geométricos definidos na especificação são obtidos do sinal, fornecendo ao avaliador a informação requerida para qualificar o elemento integral real de acordo com as propriedades funcionais sob investigação. Esse conjunto de operações é aqui denominado *processo de avaliação*.

O modelo do processo de medição completo, o qual inclui todas as três etapas descritas, e os parâmetros de medição associados, se encontram sintetizados na Figura 5.

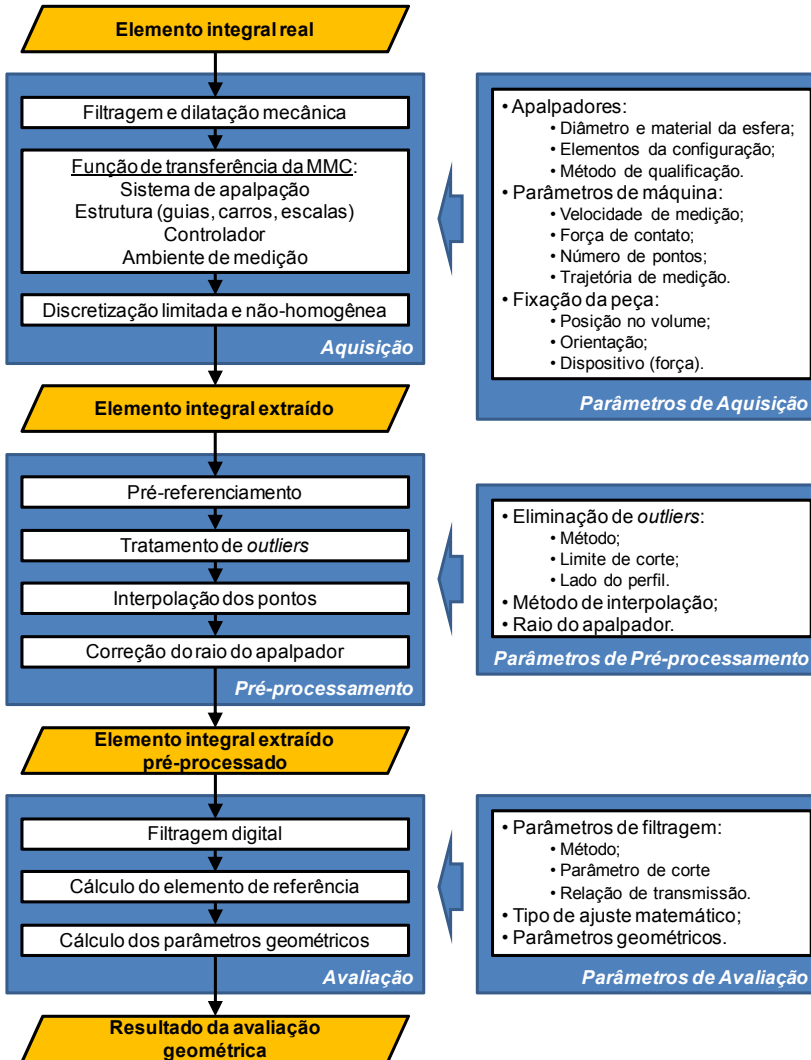


Figura 5 – Modelo de aquisição, pré-processamento e avaliação de um sinal de medição de forma. Termo *elemento integral extraído pré-processado* não é padronizado. Fonte: Adaptada de [24].

A influência das operações de aquisição, processamento e avaliação das superfícies sobre os resultados de medição pode ser controlada (direta ou indiretamente, e em maior ou menor grau) pelo planejador dos processos de medição através dos parâmetros de medição. Os parâmetros de medição associados a essas operações devem ser selecionados de acordo com as especificações de projeto (e.g. tipo de ajuste matemático), com os requisitos metrológicos existentes sobre o sistema de medição (e.g. incerteza máxima permissível) e com o tempo necessário para a execução da medição. Da definição desses parâmetros resulta o procedimento de medição⁴.

Nas seções seguintes será apresentada uma síntese sobre o conhecimento em estado da arte da tecnologia de medição por *scanning* em máquinas de medir por coordenadas, envolvendo aspectos metrológicos e os parâmetros de medição associados, com foco na avaliação de desvios de forma.

2.1 ANÁLISE DE SINAIS EM MEDIÇÕES DE FORMA

Todo perfil contido em uma superfície real de uma peça pode ser modelado como uma sobreposição de senóides, com cada comprimento de onda tendo sua própria fase e amplitude [25]. A Figura 6 mostra o efeito da soma de duas senóides com comprimentos de onda e amplitudes distintos. A senóide resultante é a representação do sinal no domínio do espaço.

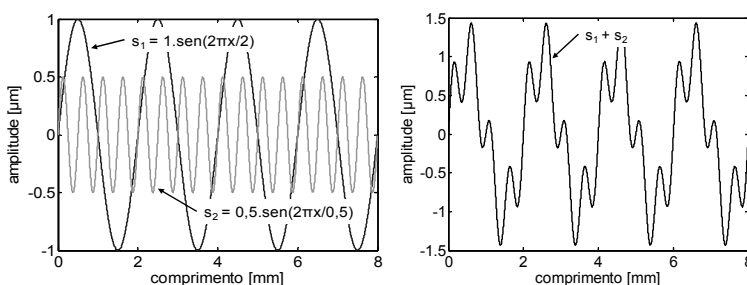


Figura 6 – Sobreposição de duas senóides (s_1 com amplitude $A = 1 \mu\text{m}$ e comprimento de onda $\lambda = 2 \text{ mm}$; s_2 com amplitude $A = 0,5 \mu\text{m}$ e comprimento de onda $\lambda = 0,5 \text{ mm}$; ambos com fase $\varphi = 0$). Fonte: Adaptada de [25].

⁴ Além das etapas mencionadas, fazem parte do processo de medição as atividades de preparação da medição, tais como estabilização térmica das peças, limpeza dos apalpadores, manuseio, limpeza e fixação das peças, etc.

Utilizando a transformada de Fourier para sinais discretos (DFT) na análise de um sinal, é possível obter novamente os parâmetros (comprimento de onda, amplitude e fase) das senóides originárias. A Figura 7 mostra o gráfico das amplitudes dos comprimentos de onda presentes (periodograma) no sinal apresentado na Figura 6. As informações de amplitude e fase de cada comprimento de onda determinam o conteúdo harmônico de um sinal. O conteúdo harmônico é a representação de um sinal no domínio da frequência.

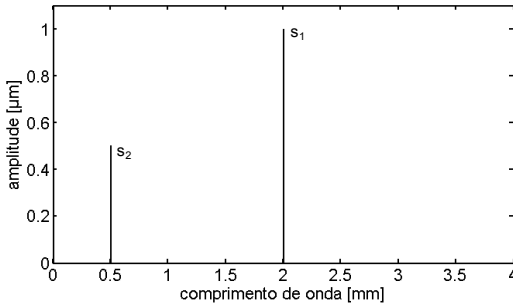


Figura 7 – Gráfico das amplitudes dos comprimentos de onda presentes na senóide da Figura 6. Fonte: Adaptada de [25].

Análise de perfis circulares

Para medições de perfis retilíneos, a análise é realizada em função do comprimento de onda (como nos exemplos anteriores). Para medições de perfis circulares, a análise é usualmente feita em função do número de ondas contidas em uma revolução (OPR). Desse modo, as senóides que compõem um perfil circular são determinadas em termos de sua fase, amplitude e frequência. A Equação 1 mostra a relação entre o número de ondas por revolução e o comprimento de onda para um elemento circular (onde ω é a frequência em OPR, λ é o comprimento de onda em mm, e d é o diâmetro nominal do elemento circular em mm).

$$\omega = \frac{\pi \cdot d}{\lambda} \quad (\text{Equação 1})$$

Um artefato utilizado para avaliar características metrológicas de sistemas de medição de forma é o padrão de múltiplas ondas (MWN) [26]. O perfil deste padrão é composto por um conjunto de senóides sobrepostas, obtidas por usinagem de alta exatidão. A Figura 8 mostra um perfil circular externo medido em um padrão de múltiplas ondas,

com diâmetro nominal $d = 80$ mm e frequências dominantes de 5, 15, 50, 150 e 500 OPR, cada qual com amplitude nominal $A = 2$ μm .

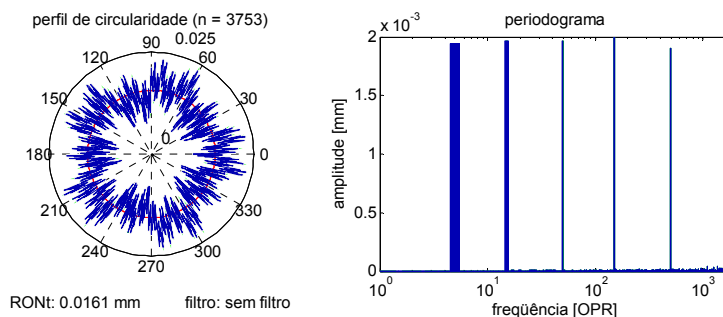


Figura 8 – Perfil medido em um padrão de múltiplas ondas representado no domínio do espaço (à esquerda) e da frequência (à direita). Fonte: Autor.

A Tabela 1 apresenta a representação de cada componente do conteúdo harmônico com relação às características que podem ser encontradas em um perfil circular. Normalmente são classificados como lóbulos os componentes harmônicos de 2 a 15 OPR [27].

Tabela 1 – Relação entre as componentes harmônicas e as características de um perfil circular. Fonte: Autor.

Frequência (OPR)	Característica do perfil
0	Diâmetro
1	Excentricidade
2	Ovalização (2 lóbulos)
3	Trilobulação

2.2 ESTRUTURA DA MMC

2.2.1 Desvios geométricos da MMC

As fontes de erro associadas à geometria em uma máquina de medição por coordenadas são geralmente constituídas por aspectos estruturais mecânicos, construtivos e de montagem, envolvendo os elementos da máquina (guias, mancais, escalas).

O modelo mais amplamente utilizado para descrever os erros de medição resultantes dos desvios geométricos da estrutura de uma MMC é o modelo de corpo rígido [28]. Esse modelo descreve três erros de

translação e três erros de rotação para cada guia, conhecidos como erros paramétricos. Além dos erros paramétricos descritos pelo modelo de corpo rígido, há os desvios de ortogonalidade entre guias, de modo que para uma MMC de três eixos lineares e nominalmente ortogonais, podem ser identificados 21 erros derivados da geometria da estrutura. A Figura 9 mostra exemplos de um erro de rotação (à esquerda) e de um erro de ortogonalidade (à direita).

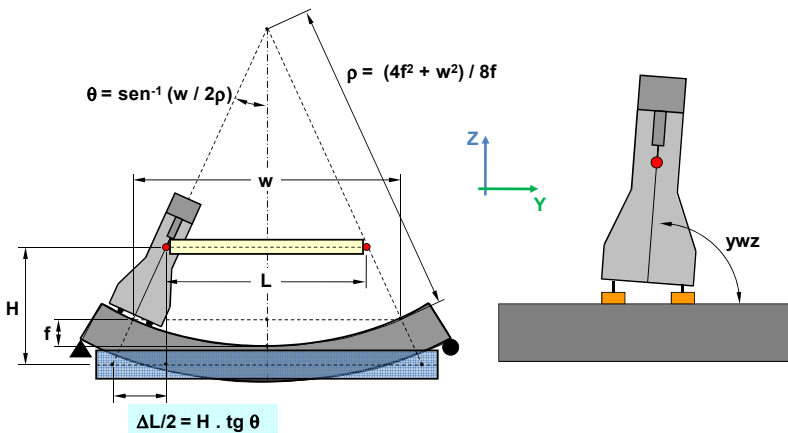


Figura 9 – Exemplos de um erro de rotação (γ_{rx} , à esquerda) causado pelo empenamento da guia Y e de um erro de ortogonalidade (γ_{wz} , à direita) causado por um ajuste mecânico deficiente nos mancais. Fonte: Autor.

As maiores influências relacionadas aos desvios geométricos sobre os resultados de medição (para MMC tipo portal) têm sido atribuídas aos desvios de ortogonalidade e erros de escala (ou posicionamento) [29-31]. Entretanto, como apontou um estudo realizado em máquinas tipo portal móvel [20], os demais erros paramétricos não devem ser considerados como não significativos a priori, sendo recomendável uma investigação criteriosa anterior à aceitação de tal hipótese.

Os desvios geométricos podem ser minimizados por ajuste de hardware (mecânico), ou por correção via software a partir do mapeamento de erros, método conhecido como *Computer Aided Accuracy* (CAA) [32,33]. O mapeamento dos erros é realizado pela verificação da geometria da MMC utilizando-se padrões de comprimento unidimensionais (blocos padrão, padrões escalonados ou laser), bidimensionais (placas de esferas ou furos) ou tridimensionais, em algumas posições e orientações dentro do volume da máquina,

usando procedimentos específicos. Para grande parte das MMC de aplicação industrial, apenas os erros de posicionamento e ortogonalidade são de fato periodicamente corrigidos [34]. Os erros de rotação e retitude da máquina são minimizados ou pelo uso de guias de precisão ou pela correção via software em um ensaio mais refinado [33,34].

Os erros de ortogonalidade e a diferença do erro de posicionamento entre escalas têm considerável importância na medição de perfis circulares. O erro de ortogonalidade irá produzir uma ovalização no perfil circular inclinada a 45° com relação aos eixos [35]. A diferença nos erros de posicionamento entre escalas (e.g. diferença de temperatura média entre as escalas no intervalo de medição) também pode ser relevante, produzindo uma ovalização com diâmetro maior orientado na direção do eixo com menor temperatura [35]. Os erros de ortogonalidade e de escala devido à temperatura são proporcionais ao tamanho do elemento sendo avaliado (erros de ganho). A Figura 10 mostra o efeito destes dois erros sobre uma medição de circularidade⁵.

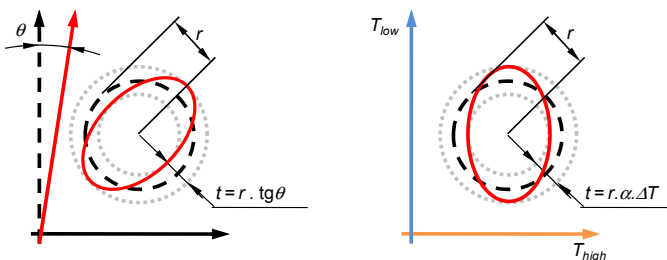


Figura 10 – Efeito do erro de ortogonalidade (à esquerda) e do erro devido à diferença de temperatura média entre escalas no intervalo de medição (à direita) sobre um perfil circular. Fonte: Autor.

Para avaliações de especificações de forma em MMC de modo geral, erros de translação e de rotação (provocados pelos desvios de retitude das guias) podem ser fatores influentes. Os erros de translação são particularmente importantes nas medições de retitude e planeza, onde são diretamente transmitidos ao mensurando. Os erros de rotação são proporcionais à distância entre o mensurando e as escalas (erro de Abbé). Devido ao efeito integrativo produzido pelos mancais

⁵ Para noção da ordem de grandeza, em um perfil circular com 80 mm de diâmetro, uma máquina com erro ortogonalidade de $20 \mu\text{m/m}$ produziria uma ovalização com amplitude $t \approx 0,8 \mu\text{m}$; e uma diferença de temperatura média de 1°C entre as escalas (cristal, $\alpha = 7,8 \mu\text{m/m} \cdot ^\circ\text{C}$) no intervalo de medição, uma ovalização com amplitude $t \approx 0,3 \mu\text{m}$.

aerostáticos [36], esses erros geralmente introduzem distorções nas frequências mais baixas dos perfis adquiridos.

2.2.2 Efeitos dinâmicos sobre estrutura da MMC

A aquisição de perfis no modo *scanning* ocorre de forma não-estática. A estrutura da MMC está sempre em movimento (salvo quando realizando algumas operações com sistemas de apalpação mais modernos [37], ou quando se utiliza a mesa rotativa disponível em alguns equipamentos), e sujeita a acelerações em boa parte das medições.

Na medição de perfis retilíneos, uma aceleração tangencial à trajetória ocorre no início e no fim da aquisição. Essa aceleração tangencial não é tão influente sobre os resultados de medição, pois provoca erros de segunda ordem⁶. A influência das acelerações é mais crítica nas medições de perfis que apresentam curvatura significativa (e.g. perfis de circulares, helicoidais, ou com forma livres), onde as guias têm sua velocidade continuamente alterada durante o processo de aquisição dos dados. A Equação 2 descreve a aceleração na direção do eixo X (a_x , em mm/s²) para uma trajetória curvilínea percorrida em um plano (XY ou ZX):

$$a_x = -\frac{S^2}{r_{eff}} \cdot \left(\frac{x - x_0}{r_{eff}} \right) \quad (\text{Equação 2})$$

onde S é a velocidade de medição (tangencial à trajetória, em mm/s), r_{eff} é o raio de curvatura efetivo da trajetória (percorrido pelo centro do apalpador, em mm) e $x - x_0$ é a posição do centro do apalpador em relação ao centro de curvatura (em mm). Para perfis circulares, o raio de curvatura é constante ao longo da trajetória, enquanto que para perfis adquiridos em superfícies livres, o raio de curvatura pode variar significativamente ao longo da mesma.

Ao se analisar a Equação 2, pode-se notar que a máxima aceleração absoluta em uma direção ortogonal qualquer ocorrerá no momento da inversão do sentido da projeção da velocidade tangencial sobre a direção em questão (no exemplo, quando $|x - x_0| / r_{eff} = 1$). Também é possível inferir que, do ponto de vista dinâmico-estrutural, raios de curvatura maiores poderão ser medidos com velocidades

⁶ Mesmo assim, em medições de retitude e rugosidade, geralmente são eliminados do perfil os extremos adquiridos em regime transitório.

maiores (mantendo-se em mente que a aceleração aumenta com o quadrado de velocidade).

Na aquisição de perfis curvilíneos, as acelerações resultantes das variações na trajetória de aquisição são impostas à estrutura. Como a estrutura das MMC geralmente apresenta distribuição de massas heterogênea (e variável), são geradas forças inerciais com sentido e magnitude variáveis ao longo da trajetória. Além da distribuição de massas, a estrutura apresenta anisotropia na rigidez, de modo que estará sujeita a distintos estados de tensão e deformação ao longo da trajetória (mesmo que as forças inerciais apresentem magnitude constante). Dessa maneira, perfis circulares adquiridos em diferentes planos de medição e/ou em diferentes posições no volume de medição apresentarão diferentes níveis de distorção. Essa situação é ilustrada na Figura 11.

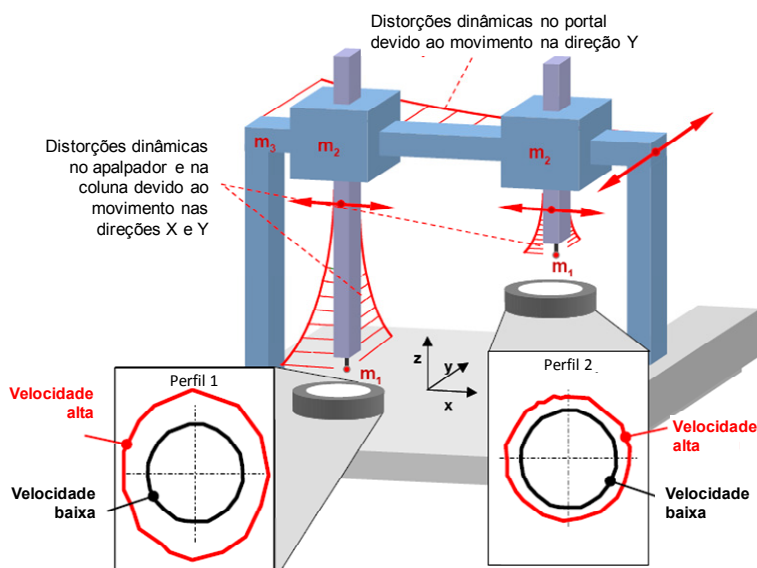


Figura 11 – Efeitos da medição em diferentes posições do volume da MMC.
Fonte: Adaptada de [38].

Considerando o exemplo da Figura 11 (medição de um perfil circular no plano XY), o módulo da aceleração é o mesmo nas duas direções ortogonais sobre o plano. Com relação ao tipo construtivo da MMC ilustrada⁷, dois elementos estruturais podem ser analisados. No caso da coluna (eixo vertical), a massa em deslocamento é a mesma nas

⁷ Diferentes tipos construtivos de MMC requerem distintas análises.

duas direções ortogonais, entretanto a rigidez da seção transversal varia de acordo com a direção sobre o plano. No caso do portal, o efeito combinado de maior inércia com menor rigidez da estrutura na direção do eixo Y provoca uma ovalização do perfil na direção do mesmo. De modo geral, as distorções estruturais devido aos efeitos dinâmicos introduzem distorções nas frequências mais baixas dos perfis.

Um experimento realizado [39] mostra o efeito da aquisição de perfis circulares em um mesmo artefato⁸ disposto em duas posições no volume de medição (L1 próxima e L2 afastada do desempenho), para diferentes velocidades de medição. A Figura 12 mostra os resultados desse experimento, onde se pode observar que para velocidades abaixo de 20 mm/s não é possível distinguir a amplitude encontrada entre posições. Entretanto com o aumento da velocidade (e por consequência das acelerações), as amplitudes obtidas nas medições próximas ao desempenho tornam-se maiores que as obtidas nas medições afastadas do mesmo, devido à menor rigidez da coluna no caso do primeiro.

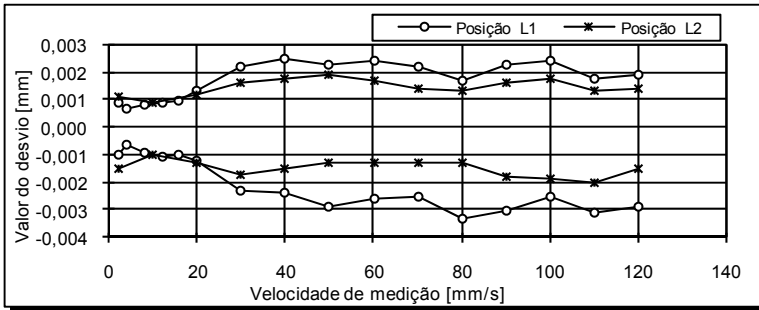


Figura 12 – Comparação dos desvios obtidos em duas posições distintas (L1 próxima ao desempenho e L2 afastada do desempenho) para distintas velocidades de medição. O valor zero na escala vertical representa o elemento de referência, e os pontos acima e abaixo são respectivamente o maior e o menor afastamento observados com relação ao elemento de referência, para cada perfil extraído.

Fonte: Adaptada de [39].

O comportamento dinâmico da estrutura é um dos maiores obstáculos a serem vencidos (juntamente com a resposta dinâmica dos sistemas de apalpação) para que altas velocidades de aquisição possam ser obtidas. Para compensar os efeitos dinâmicos sobre a estrutura das

⁸ Cilindro externo retificado, diâmetro de 150 mm. Cabeçote de cinemática serial ativo. Força de medição de 0,2 N, diâmetro do apalpador de 6 mm, elemento de referência definido pelo método de mínimos quadrados, sem filtragem digital.

MMC, alguns métodos e tecnologias têm sido propostos por pesquisadores e/ou introduzidos pelos fabricantes.

Um dos métodos apresentados propõe utilizar anéis padrão de diferentes diâmetros, medidos com diferentes velocidades de aquisição, para compensar erros em medições de perfis de circularidade [40]. Os experimentos realizados mostraram que o erro de forma varia de modo aproximadamente linear com respeito ao módulo da aceleração, independente do diâmetro ou da velocidade utilizados (para um mesmo plano de medição e uma mesma posição no volume da MMC). Foi verificado que a variação da aceleração atua principalmente sobre a componente de 2 OPR, tornando possível uma redução de aproximadamente 30% no erro de medição pela correção apenas desta componente.

Uma tecnologia utilizada pela empresa Renishaw (Renscan DC) [41] se baseia na hipótese de que em velocidades suficientemente baixas, os erros de caráter dinâmico podem ser considerados desprezíveis. O método utiliza uma peça real, a qual é fixada em sua posição usual, e medida duas vezes seguidas, uma com baixa e outra com alta velocidade. A diferença entre perfis é considerada o perfil de erro dinâmico, o qual é utilizado para compensar as medições em alta velocidade das próximas peças (desde que sejam medidas na mesma posição e orientação da peça utilizada para obter o perfil de erro). A tecnologia é incorporada ao controlador, podendo ser utilizada com vários sistemas de apalpação.

Outra tecnologia, introduzida pela empresa Carl Zeiss, é conhecida como *Dynamic Bending Computer Aided Accuracy* (D-CAA) [42]. Esse método descreve o comportamento dinâmico-estrutural da máquina para cada localização dentro do volume de medição. É desenvolvido individualmente para cada tipo e tamanho de máquina e integrado ao controlador, não sendo necessários ajustes periódicos como os CAA utilizados para compensação dos desvios geométricos.

2.3 SISTEMA DE APALPAÇÃO

Esta subseção irá tratar de alguns aspectos importantes relativos aos sistemas de aquisição por contato contínuo (conhecidos também como apalpadores analógicos ou cabeçotes medidores) para MMC. A seguir será realizada uma revisão sobre os tipos de sistemas de apalpação analógicos para MMC e as fontes de erro relacionadas. Uma

revisão sobre diversas tecnologias de sistemas de apalpação para MMC (e metrologia dimensional de modo geral) pode ser encontrada em [43].

2.3.1 Princípio de medição

De forma geral, os sistemas de apalpação são constituídos por três elementos básicos: molas, amortecedores e transdutores de deslocamento. As molas servem como suspensão e/ou para geração da força nominal de contato, os amortecedores são necessários para minimizar oscilações durante a aquisição e os transdutores para medir os deslocamentos entre o apalpador e a base do sistema de medição.

Os cabeçotes medidores podem adquirir dados de uma superfície em dois modos: aquisição de pontos individuais e aquisição por contato contínuo (*scanning*). No modo por pontos individuais, a medição é realizada apenas pelas escalas da MMC. A aquisição é feita quando o transdutor do sistema de apalpação atinge um deslocamento predeterminado, normalmente correspondente a uma força de contato nominal (configurada pelo operador) e à constante da mola, ocorrendo de forma praticamente estática (Figura 13, à esquerda).

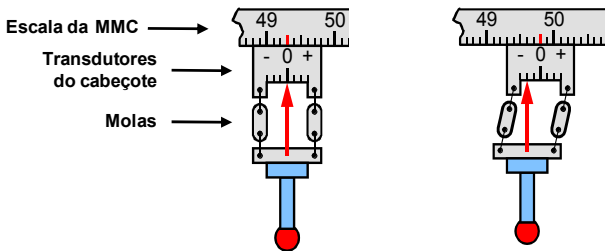


Figura 13 – Comparação entre o modo de aquisição ponto a ponto (à esquerda) e o modo de aquisição por *scanning* (à direita). Fonte: Adaptada de [44].

No modo de medição por *scanning*, o cabeçote de medição atua como uma pequena MMC, efetivamente medindo os deslocamentos das molas. As coordenadas do centro da esfera do apalpador, que representam a superfície da peça, resultam da combinação entre as coordenadas lidas nas escalas da MMC e os deslocamentos medidos pelos transdutores do cabeçote de medição (Figura 13, à direita).

Para melhor compreender os fatores que influenciam a exatidão das medições por *scanning*, pode-se associar o comportamento dinâmico dos sistemas de apalpação ao de um sistema mecânico linear de segunda ordem [45]. A Figura 14 apresenta o modelo de um sistema mecânico linear, representando um dos eixos de um cabeçote medidor fixo à

coluna da MMC (ou a um cabeçote indexador), com um apalpador acoplado⁹.

Nos sistemas de apalpação analógicos a força de contato nominal entre a esfera do apalpador e a superfície da peça (F_p) é um parâmetro definido pelo operador. Para geração dessa força, um deslocamento estático nominal é aplicado entre a coluna da MMC e a superfície da peça ($x_{s,0} - x_{q,0}$), sendo a magnitude deste deslocamento proporcional à constante de mola equivalente do conjunto sistema de apalpação/apalpador (k_p e k_s em série). A força nominal de contato é, portanto, uma força passiva.

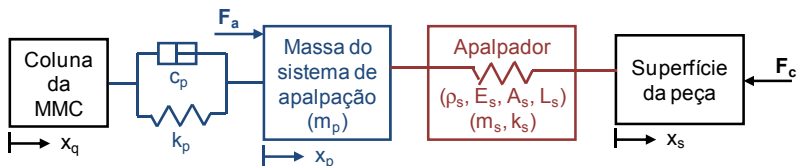


Figura 14 – Modelo de um sistema mecânico linear representando um dos eixos de um sistema de apalpação com cinemática serial e um apalpador acoplado.

Fonte: Adaptada de [45].

Em uma aquisição por contato contínuo, o sistema de apalpação deve medir as variações no deslocamento entre a esfera do apalpador e a coluna ($x_s - x_q$), em torno do deslocamento estático nominal $x_{s,0} - x_{q,0}$, provocadas pelos desvios da superfície da peça. Na prática, o deslocamento efetivamente medido pelos transdutores é o deslocamento entre a base do apalpador e a coluna ($x_p - x_q$). Quando variações no deslocamento relativo $x_s - x_q$ ocorrem, o sistema massa-mola-amortecedor do cabeçote medidor é solicitado além da condição nominal, provocando variações da força de contato efetiva entre a esfera do apalpador e a superfície da peça. De acordo com o modelo utilizado, existem três combinações que podem provocar variação da força de contato efetiva: o produto entre o deslocamento $x_s - x_q$ e as constantes de mola do sistema (k_p e k_s); o produto entre a taxa de variação do deslocamento $x_s - x_q$ (velocidade) e a constante de amortecimento do sistema (c_p); e o produto entre a taxa de variação da velocidade (aceleração) e as massas do sistema (m_p e m_s).

⁹ Para fins analíticos o apalpador deve ser modelado como um sistema contínuo (com infinitos graus de liberdade), e não como um sistema massa-mola discreto. Uma análise de vibrações em vigas pode ser encontrada em [46], e uma discussão sobre a dinâmica de sistemas de apalpação mecânicos em [27].

Se a rigidez do apalpador (k_s) pudesse ser considerada infinita, o deslocamento medido pelos transdutores seria, para todos os efeitos práticos¹⁰, o deslocamento percorrido pelo centro do apalpador ($x_p = x_s$). Entretanto, para a boa parte das medições, essa condição não pode ser assumida. O deslocamento relativo entre as extremidades do apalpador insere um erro na medição, e por essa razão, a força de contato entre a esfera do apalpador e a superfície da peça deve ser mantida o mais constante possível.

Historicamente os sistemas de apalpação analógicos foram classificados pelo modo como eles tratam a variação da força de contato. Com respeito a essa classificação, dois tipos podem ser distinguidos: os sistemas ativos e os sistemas passivos. Os sistemas de apalpação ativos possuem atuadores que geram uma força (F_a) proporcional e no mesmo sentido do deslocamento relativo $x_p - x_q$ detectado pelos transdutores, retirando a variação da sollicitação mecânica sobre o apalpador. Desse modo, a força de contato é controlada pelo cabeçote medidor. Os sistemas passivos não possuem atuadores. Dependendo do modo de geração da trajetória de *scanning*, a força gerada pelo deslocamento relativo $x_s - x_q$ ou é transmitida integralmente pelo apalpador, ou é controlada pela movimentação de estrutura (pela variação do deslocamento x_q).

Sistemas de apalpação analógicos ativos

Os cabeçotes ativos foram introduzidos em 1973 pela empresa Carl Zeiss. São compostos por um sistema de molas tipo paralelogramo, montadas em série e orientadas nas três direções ortogonais (paralelamente às escalas da MMC), capazes de transformar movimentos curvilíneos em movimentos lineares. Cada um dos três eixos é equipado como um atuador eletromagnético linear para controle ativo da força de contato e um transdutor indutivo linear para medição dos deslocamentos. A cinemática serial aliada aos atuadores permite um controle independente da força nos três eixos. São relativamente grandes (ocupando volume de medição) e pesados [43,45]. Atualmente, o modelo comercializado pela empresa Zeiss é conhecido como VAST (*Variable Accuracy and Speed Probing Technology*) [48]. A Figura 15 mostra o esquema de um cabeçote ativo de cinemática serial, e de forma qualitativa, a faixa de controle da força de acordo com a deflexão das molas.

¹⁰ A despeito da elasticidade da estrutura do cabeçote e dos erros de segunda ordem relacionados ao deslocamento das molas.

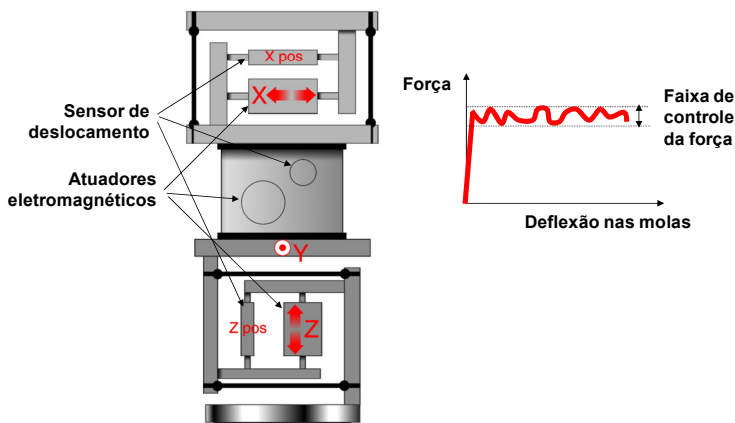


Figura 15 – Esquema de um cabeçote ativo com cinemática serial (VAST) e modo de controle da força de medição. Fonte: Adaptada de [45].

Uma nova geração de sistemas de apalpação ativos (cabeçote REVO utilizando tecnologia Renscan5, da Renishaw [37]) utiliza indexação contínua do cabeçote para geração de trajetórias circulares e da força de contato. Esse sistema permite que o portal permaneça estático para medição em trajetórias circulares e em movimento linear medição em trajetórias helicoidais (Figura 16), diminuindo consideravelmente a sollicitação dinâmica sobre a estrutura da MMC.

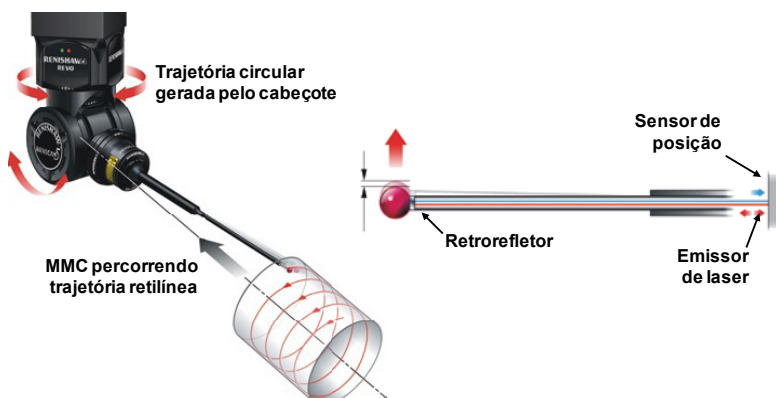


Figura 16 – Sistema de apalpação com indexação contínua (à esquerda) e sistema de compensação da flexão do apalpador (à direita).

Fonte: Adaptada de [37].

Outra inovação trazida por esse sistema é o uso de um sistema óptico (semelhante a um auto-colimador) no interior da haste (fibra de carbono), o qual permite compensação da deflexão durante as medições em tempo real, além de fornecer realimentação para o controle da força. A Figura 16 mostra um exemplo de medição utilizando esse sistema e um esquema do sistema de compensação da flexão. Esse sistema promete reduzir drasticamente os tempos de medição (com velocidades de até 500 mm/s) e ao mesmo tempo manter a exatidão com relação às tecnologias correntes (quando medindo a velocidades de 15-20 mm/s) [37,43]. Embora já disponível comercialmente, não foram encontrados estudos sobre o desempenho metrológico desse sistema na literatura.

Sistemas de apalpação analógicos passivos

Os cabeçotes passivos são mecanismos relativamente mais simples e baratos. Não possuem atuadores no interior do cabeçote, o que reduz a geração de temperatura e a massa dos mesmos. Nos cabeçotes passivos com cinemática serial (Figura 17), a força de medição varia com a deflexão das molas, porém de forma relativamente linear e altamente reproduzível. De modo geral, são mais leves e compactos que os cabeçotes ativos com cinemática serial [43,45].

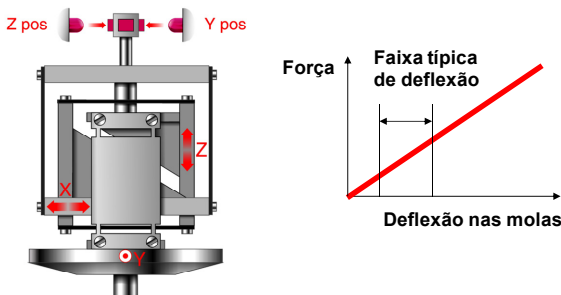


Figura 17 – Esquema de um cabeçote passivo com cinemática serial (SP80) e da faixa típica de deflexão as molas. Fonte: Adaptada de [45].

Entre os cabeçotes passivos, existem alguns tipos construtivos. O modelo mais antigo (introduzido em 1974 pela empresa Leitz) é construtivamente parecido com o cabeçote ativo da empresa Zeiss, apresentando cinemática serial com molas tipo paralelogramo e transdutores indutivos. Atualmente, os cabeçotes da Leitz são comercializados em vários modelos pertencentes à série LSP [49]. Outro modelo que apresenta o mesmo tipo construtivo, porém utiliza sensores ópticos para medir os deslocamentos, é o SP80 da Renishaw [50]. É

bastante leve e compacto (o mecanismo tem aproximadamente 50 mm de comprimento em cada direção ortogonal), e apresenta resolução de 20 nm. A Figura 17 mostra o esquema de um cabeçote passivo, e de forma qualitativa, a faixa de variação da força de acordo com a deflexão das molas.

O modelo SP25M da Renishaw [51] é um sistema passivo, mas com construção utilizando cinemática híbrida (um eixo linear e dois eixos rotativos paralelos entre si e em série com o eixo linear). É extremamente leve e compacto, com poucas partes móveis, podendo ser acoplado a cabeçotes indexáveis, o que confere grande flexibilidade ao conjunto. As molas são tipo membrana, uma permitindo rotações em torno do seu centro e translação na direção perpendicular ao plano da mola (criando um pivô), e a outra permitindo movimentos em todas as direções. As medições são realizadas por triangulação, a partir da emissão de radiação infravermelha sobre dois espelhos refletores. O sistema apresenta comportamento fortemente não-linear (compensado por algoritmos polinomiais de 3ª ordem utilizados na qualificação), exigindo diferentes módulos para diferentes faixas de comprimento dos apalpadores (para minimizar a perda de sensibilidade do sistema). A Figura 18 mostra o esquema do SP25M e o detalhe do sistema de molas.

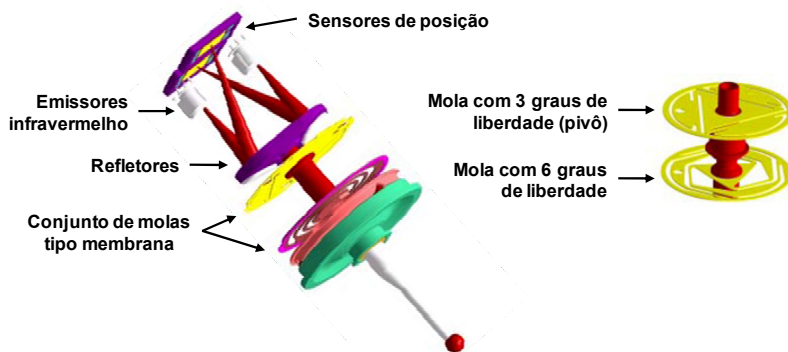


Figura 18 – Esquema de um cabeçote passivo com cinemática híbrida (SP25M) e detalhe o sistema de molas. Fonte: Adaptada de [51].

Outros sistemas analógicos que merecem menção são os cabeçotes MPP-100 e MPP-300 da Mitutoyo [52]. Infelizmente, a falta de informação disponível sobre o princípio de funcionamento desses sistemas não permite aqui uma apresentação detalhada.

2.3.2 Geração da trajetória de *scanning*

Na medição de elementos de geometria conhecida (planos, círculos, etc.), o controle da trajetória de *scanning* pode baseado em uma trajetória nominal predefinida [53]. Para definir uma trajetória nominal, os parâmetros do elemento a ser medido (tipo, posição e orientação relativas ao sistema de coordenadas e tamanho), bem como as coordenadas de início e fim da trajetória, devem ser informados. A estrutura da MMC percorrerá então a trajetória nominal definida, deixando para o cabeçote a tarefa de acompanhar os desvios em relação à trajetória nominal¹¹. A Figura 19 ilustra uma aquisição no modo de geometria conhecida.

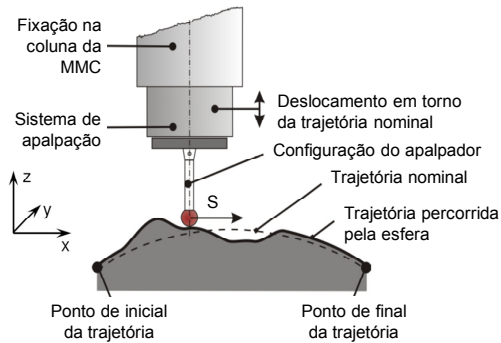


Figura 19 – Medição de um perfil curvilíneo utilizando o modo de aquisição de geometria conhecida. Fonte: Adaptada de [39].

Para medição de elementos com geometria desconhecida, como superfícies complexas (e.g. uma pá de turbina), a trajetória é gerada através de um laço de controle em malha fechada [53], tendo como informação de entrada as deflexões das molas do cabeçote. Devido à grande inércia da estrutura da MMC, com conseqüente limitação na resposta dinâmica da mesma, as molas do sistema de apalpação podem ser sujeitas a deflexões relativamente elevadas (principalmente em medições a altas velocidades), efeito que é minimizado nos cabeçotes ativos.

O uso de CAD integrado aos softwares de medição permite uma medição mais apurada de superfícies livres. Para engenharia reversa,

¹¹ A menos que a superfície real da peça se afaste significativamente da trajetória nominal predefinida, por exemplo, além do curso do sistema de apalpação (ou de uma fração predeterminada). Nesse caso, a correção da trajetória é necessariamente realizada pela estrutura da MMC [45].

alguns softwares disponibilizam a opção de realizar a medição duas vezes: a primeira para uma aproximação da trajetória real, e a segunda, para aquisição efetiva [54-56].

Com respeito à trajetória de medição, cabe também mencionar a necessidade do uso de pré e pós-curso, para eliminar efeitos da aceleração tangencial no início e no fim da trajetória de *scanning*. Em medições de perfis abertos, os pontos adquiridos nos intervalos de pré e pós-curso são eliminados posteriormente, o que pode representar um problema caso o comprimento a ser avaliado seja relativamente curto. Em medições de perfis circulares fechados, o uso de pré e pós-curso não representa tal problema. A tecnologia Navigator da Zeiss [57] utiliza aproximação tangencial à superfície na velocidade de medição, permitindo reduzir os comprimentos de pré e pós-curso (mas não eliminá-los completamente, pois o impacto no momento do contato pode induzir vibrações no sistema de apalpação).

2.3.3 Força de contato efetiva

Efeito da força centrífuga

Nas medições de perfis curvilíneos, a alteração do vetor velocidade de medição provoca acelerações também sobre os componentes do sistema de apalpação. O produto dessas acelerações com a massa dos componentes induz a geração de forças centrífugas. Nas medições de perfis curvilíneos, a força de contato média efetiva (\mathbf{F}_m , em mN) será a soma vetorial das forças aplicadas pelo sistema de apalpação e da força centrífuga gerada¹² (Equação 3):

$$\mathbf{F}_m = \mathbf{F}_a + \mathbf{F}_p - m_{eff} \frac{S^2}{r_{eff}} \mathbf{u}_n \quad (\text{Equação 3})$$

onde \mathbf{F}_a é a força vetorial (em mN) gerada pelos atuadores (quando cabeçote ativo), \mathbf{F}_p é a força vetorial (em mN) gerada pela compressão das molas do conjunto sistema de apalpação/apalpador, m_{eff} é a massa do conjunto sistema de apalpação/apalpador (em kg), S é a velocidade de medição (em mm/s) e r_{eff} é o raio de curvatura efetivo da trajetória (percorrido pelo centro do apalpador, em mm) e \mathbf{u}_n é o vetor unitário normal à trajetória que define o sentido da aceleração centrífuga.

Para cabeçotes com cinemática serial, a massa é cumulativa entre partes sucessivas da cadeia cinemática. Desse modo, a força centrífuga

¹² Equação válida para cabeçotes de cinemática serial.

gerada varia de acordo com a direção, podendo produzir ovalização do perfil alinhada a um dos eixos (efeito semelhante ao apresentado na Figura 10, à direita). Nos cabeçotes de cinemática serial ativos, os efeitos devido à variação da força centrífuga são minimizados pelos atuadores. Os cabeçotes passivos (e o cabeçote com indexação contínua), em contrapartida, possuem massa substancialmente menor, reduzindo a força centrífuga gerada [43,45].

Para elementos internos, a força centrífuga tende a pressionar o apalpador contra a superfície, aumentando a força de contato média efetiva. Para elementos externos, a tendência é que o apalpador se afaste da superfície, diminuindo a força de contato média efetiva. Dependendo do diâmetro externo medido e da massa do conjunto sistema de apalpação/apalpador, existe uma velocidade de *scanning* crítica na qual a força centrífuga supera as forças aplicadas pelo conjunto sistema de apalpação/MMC, anulando a força de contato, fazendo com que o sensor se separe definitivamente da peça [39].

Força de contato instantânea

Os componentes harmônicos presentes na superfície a ser medida provocam variações no deslocamento do conjunto sistema de apalpação/apalpador na direção normal trajetória percorrida, e por conseqüência, acelerações sobre o conjunto. Essas acelerações associadas à massa do conjunto geram forças inerciais, que irão provocar variações na força de contato em torno de força de contato média efetiva (\mathbf{F}_m conforme Equação 3). A força de contato efetiva instantânea (\mathbf{F}_c em mN) é a soma vetorial da força de contato média efetiva com as variações provocadas em torno da mesma (Equação 4)¹³:

$$\mathbf{F}_c(t) = \mathbf{F}_m(t) - m_{eff} A \left(\frac{2\pi S}{\lambda} \right)^2 \text{sen} \left(\frac{2\pi S}{\lambda} t \right) \mathbf{u}_n(t) \quad (\text{Equação 4})$$

onde m_{eff} é a massa do conjunto sistema de apalpação/apalpador (em kg), A é a amplitude (em mm) da senóide de comprimento λ (em mm) avaliada, S é a velocidade de medição (em mm/s) e \mathbf{u}_n é um vetor unitário normal à trajetória que define a direção aceleração normal.

¹³ Adaptada de [58]. Considera somente componentes harmônicos individuais. Não considera o amortecimento do sistema de apalpação, que tende a aumentar a variação da força de contato efetiva em função da variação da velocidade normal. Não considera efeito de vibrações (aquisições próximas à frequência de ressonância).

2.3.4 Rigidez dos apalpadores

A necessidade de avaliar elementos de difícil acesso pode exigir o uso de extensões e juntas, e/ou de apalpadores longos nas configurações. Estes dispositivos provocam simultaneamente queda da rigidez média e aumento da anisotropia da rigidez da configuração.

A Figura 20 (à esquerda) mostra uma configuração de apalpador utilizando uma extensão e uma junta, com o apalpador montado perpendicularmente à coluna. Para a medição de um perfil circular, esta configuração estará sujeita não somente à flexão (apalpador e extensão), mas também à torção (extensão). Este tipo de configuração não é incomum, principalmente em cabeçotes montados diretamente na coluna (Figura 20, à direita).

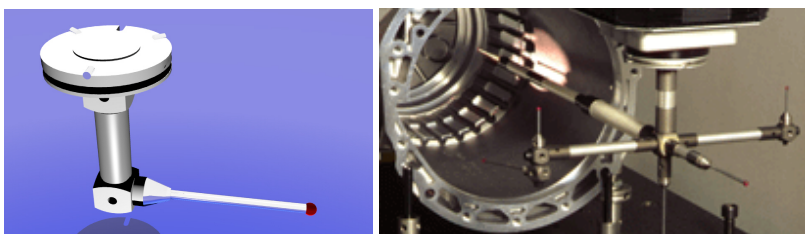


Figura 20 – Configurações de apalpador com extensões e juntas. Fonte: [24].

A anisotropia da rigidez ocorre mesmo em um apalpador simples, quando considerada aplicação da força no sentido transversal (apalpador sujeito à flexão pura) e no sentido longitudinal (apalpador sujeito à compressão pura). A sollicitação do sistema de apalpação nesse modo é comum em medições integrais de componentes (e.g. para engenharia reversa). A Figura 21 ilustra essa situação, mostrando de maneira qualitativa a variação do módulo da deflexão do apalpador.

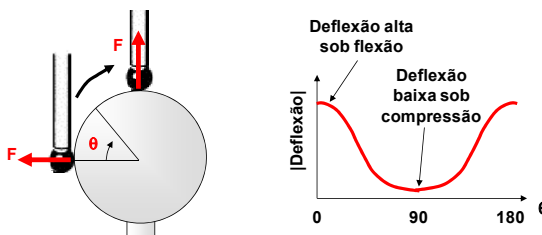


Figura 21 – Efeito da anisotropia da rigidez em um apalpador simples. Fonte: Adaptada de [45].

Tanto os cabeçotes passivos quanto os ativos estão sujeitos à influência da anisotropia da rigidez. Nos cabeçotes ativos, o controle da força ocorre no cabeçote, e não na esfera do apalpador. Desse modo, mesmo que a força de contato seja mantida constante, a variação da rigidez provocará distorções no perfil [45].

Além da anisotropia da rigidez, a rigidez média das configurações é também um fator de importância. Uma questão relativa à rigidez média das configurações envolve a divergência entre a trajetória de *scanning* predefinida e a superfície real da peça (que apresenta desvios de tamanho, posição e forma), a qual irá provocar uma variação da deflexão das molas do cabeçote. Como visto, as variações em torno da força de contato média efetiva provocam variações da força de contato efetiva instantânea, e os erros decorrentes serão tão maiores quanto menor a rigidez dos apalpadores.

A Equação 5 descreve a rigidez estática transversal ($k_{s,t}$, em N/mm) de uma viga com seção transversal circular constante, simplesmente engastada, sob carregamento concentrado na extremidade livre, que pode ser utilizada para estimar rigidez transversal de um apalpador simples (sem uso de juntas e/ou extensões e sem escalonamento da seção transversal):

$$k_{s,t} = \frac{3.E.(\pi.d_s^4/64)}{L_s^3} \quad (\text{Equação 5})$$

onde E é o módulo de elasticidade do material da haste (N/mm²), d_s é o diâmetro da haste (em mm) e L_s é o comprimento da haste (em mm).

Pela equação, se pode notar que a rigidez estática do apalpador diminui rapidamente com o aumento (ao cubo) do comprimento. Embora o aumento do diâmetro da haste eleve a rigidez estática transversal à quarta potência, existe um limite prático para esta variável, que é o máximo diâmetro permissível da esfera de contato (ver subseção 2.5.5), fazendo com que apalpadores longos se tornem mais suscetíveis a variações na força de contato efetiva.

2.3.5 Qualificação dos apalpadores

A qualificação dos apalpadores é necessária para definir os parâmetros das configurações dos apalpadores (tamanho das esferas e posição relativa entre configurações), e, mais importante para medições de forma por *scanning*, definir a matriz de compensação dos efeitos sistemáticos relacionados à flexão dos apalpadores. Praticamente todos

os fabricantes de sistemas de apalpação analógicos possuem implementadas em seus sistemas mais modernos rotinas de qualificação dinâmica utilizando esferas padrão [37,48-52]. Este tipo de qualificação permite mapear e minimizar simultaneamente a influência de efeitos relacionados à rigidez e às massas do conjunto apalpador/sistema de apalpação, para uma determinada faixa de velocidades de *scanning* a serem empregadas nas medições [45].

Em cabeçotes passivos, o mapeamento deve ser realizado para compensar os erros resultantes da variação da força de contato efetivo, uma vez que a mesma não é controlada. Os efeitos a serem compensados são relacionados à rigidez e à variação das massas do sistema de apalpação, e à rigidez (e anisotropia da rigidez) dos apalpadores. Para cabeçotes com cinemática serial, normalmente é assumida linearidade da rigidez das molas do cabeçote medidor [45]. O modelo com cinemática paralela não apresenta problemas significativos com relação à massa, porém apresenta comportamento não-linear, o qual necessita algoritmos especiais de compensação (a linearização é obtida por ajustes polinomiais de 3ª ordem) [51].

Em cabeçotes de cinemática serial ativos, o mapeamento deve ser realizado para compensar principalmente os efeitos da anisotropia da rigidez, pois o controle da força já minimiza os efeitos da rigidez média dos apalpadores e da diferença das massas de cada eixo. A Figura 22 mostra as trajetórias utilizadas para qualificação dos apalpadores em cabeçotes de cinemática serial ativos [57].

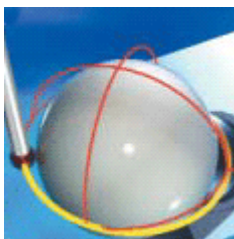


Figura 22 – Trajetórias utilizadas na qualificação dinâmica dos apalpadores em um cabeçote de cinemática serial ativo. Fonte: [57].

O sistema com indexação contínua utiliza uma rotina especial de qualificação, objetivando principalmente mapear os erros dos dois eixos do cabeçote indexador. A rotina de qualificação completa leva aproximadamente 20 minutos para ser executada [37].

2.3.6 Resposta dinâmica dos sistemas de apalpação

A resposta dinâmica dos sistemas de apalpação é um ponto chave para obtenção de medições a alta velocidade com alta exatidão. Os efeitos provocados pela limitação da resposta dinâmica dos sistemas de apalpação não podem ser compensados pelas rotinas de qualificação, pois dependem das características da superfície a ser avaliada (como será discutido).

Para aquisição de sinais harmônicos, a resposta dinâmica é usualmente avaliada pela análise da resposta em frequência do sistema de aquisição. A resposta em frequência é a função que relaciona o sinal de entrada e o sinal de saída do sistema de aquisição, para um intervalo de frequências de interesse [59]. Em sistemas de aquisição por contato, podem ser apontados dois principais problemas relativos à resposta em frequência: a perda de contato entre apalpador e superfície; e a aquisição em frequências próximas à frequência de ressonância [27].

Contato com a superfície

A capacidade de um sistema de aquisição se manter em contato com a superfície é usualmente denominada *trackability* [27,58]. O parâmetro que define essa capacidade é a máxima velocidade (ou amplitude) para a qual o apalpador manterá contato com a superfície para um determinado comprimento de onda. A condição para que o apalpador mantenha contato com a superfície é que o módulo da força de contato efetiva seja maior que zero. A Equação 6 descreve a máxima velocidade tangencial¹⁴ (S_{\max} , em mm/s) para a qual o apalpador permanecerá em contato com a superfície de acordo com a amplitude de cada comprimento de onda considerado:

$$S_{\max} = \frac{\lambda}{2\pi} \sqrt{\frac{F_m}{m_{\text{eff}} \cdot A(\lambda)}} \quad (\text{Equação 6})$$

onde F_m é o módulo da força de contato média efetiva (em mN), m_{eff} é a massa do conjunto sistema de apalpação/apalpador (em kg), e $A(\lambda)$ é a amplitude (em mm) da senóide de comprimento λ (em mm) avaliada.

Um estudo realizado¹⁵ [39] mostrou que o aumento da força de contato nominal pode diminuir os efeitos da variação da força de contato

¹⁴ Obtida da Equação 4 para a condição $F_c > 0$. Mesmas considerações se aplicam.

¹⁵ Medições em um mesmo artefato (cilindro externo torneado, diâmetro de 62 mm) realizadas com forças de contato nominais distintas ($F_{p,1} = 0,1$ N e $F_{p,2} = 0,5$ N). Cabeçote de

efetiva, principalmente a perda de contato entre apalpador e superfície em altas velocidades (Figura 23).

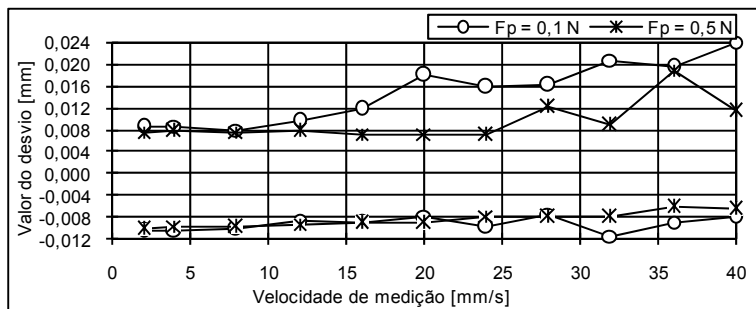


Figura 23 – Comparação dos desvios obtidos com duas forças de contato nominais distintas, para diferentes velocidades de medição. O valor zero na escala vertical representa o elemento de referência, e os pontos acima e abaixo são respectivamente o maior e o menor afastamento observados com relação ao elemento de referência, para cada perfil extraído. Fonte: Adaptado de [39].

A perda de contato entre apalpador e superfície pode ser verificada pelo aumento unilateral (no sentido normal à superfície) dos desvios observados. Portanto, para medições de perfis circulares externos, e/ou de superfícies com amplitudes dos componentes harmônicos elevadas, o aumento da força nominal de contato pode minimizar os efeitos causados pela variação da força de contato efetiva. Porém, a força de contato nominal não pode ser aumentada indefinidamente, como será discutido adiante (seções 2.5.2-2.5.4).

Frequência de ressonância

Um dos parâmetros mais importantes obtidos em uma análise da resposta em frequência é a frequência de ressonância do sistema. Em valores próximos à frequência de ressonância, os deslocamentos, as velocidades e as acelerações do sistema de apalpação tornam-se elevados, provocando sobre deslocamentos dos componentes do sistema de apalpação, resultando na amplificação das amplitudes observadas. Além disso, as acelerações de elevada magnitude irão provocar variações excessivas da força de contato efetiva, levando a sucessivas perdas de contato entre apalpador e superfície [27]. Em muitos casos, a resposta dinâmica de sistemas de aquisição será significativamente

degradada para aquisição com frequências de excitação acima de 0,4 vezes a frequência de ressonância [59]. A Figura 24 mostra a curva de ganho em amplitude de um sistema massa-mola linear com um grau de liberdade.

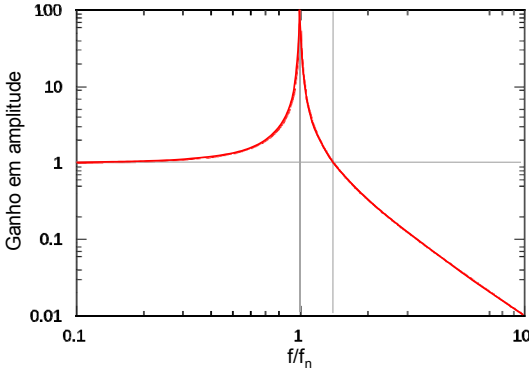


Figura 24 – Curva de ganho em amplitude com relação à frequência normalizada, típica de um sistema massa-mola linear com um grau de liberdade.

Fonte: Autor.

As frequências em que o sistema de apalpação será excitado (f , em Hz) dependem dos comprimentos de onda (λ , em mm) presentes na superfície da peça e da velocidade de aquisição (S , em mm/s) utilizada (Equação 7). Além das ondas presentes na peça, o sistema pode ser excitado por vibrações externas e por vibrações geradas na interface superfície/apalpador (ver subseção 2.5.3).

$$f = \frac{S}{\lambda} \quad (\text{Equação 7})$$

A Equação 8 pode ser utilizada para estimar a frequência de ressonância (f_n , em Hz) de um sistema linear com um grau de liberdade sem amortecimento, onde k é a rigidez do sistema (em N/m) e m a massa (em kg). O conjunto cabeçote de medição/apalpador é composto, respectivamente, de um sistema discreto e um sistema contínuo acoplado, este último possuindo infinitos graus de liberdade.

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (\text{Equação 8})$$

A equação acima apresentada não é adequada, a rigor, para estimar a frequência de ressonância do conjunto cabeçote de

medição/apalpador¹⁶. Com a adição das configurações de apalpadores ao sistema de apalpação, a frequência de ressonância fundamental do conjunto será menor do que a frequência de ressonância original do cabeçote. Além disso, outras frequências de ressonância serão introduzidas, correspondendo aos demais modos de vibração do conjunto. A redução da frequência de ressonância fundamental será tão maior quanto menor for a rigidez relativa do apalpador [46].

Considerações relacionadas à resposta em frequência

Todos os sistemas de apalpação analógicos, sejam eles passivos ou ativos, apresentam algum grau de amortecimento [43]. O amortecimento melhora o desempenho dos sistemas de apalpação quando adquirindo frequências próximas à frequência de ressonância. Entretanto, o amortecimento viscoso provoca queda na frequência de ressonância, redução da capacidade do sistema de apalpação manter contato com a superfície e histerese no sistema de apalpação [60].

Nos sistemas ativos, o coeficiente de amortecimento pode ser relativamente baixo, pois este possui sistema ativo de controle da força de contato. Em contrapartida, os atuadores elevam a massa do sistema, diminuindo a frequência de ressonância. Nesses sistemas, a resposta em frequência não depende apenas das características dos componentes passivos (massas, molas e amortecedores), mas também dos componentes ativos (atuadores eletromagnéticos e sistema de controle).

Os sistemas passivos tendem a ser mais leves (menor massa), e nesse aspecto, apresentam vantagem sobre os sistemas ativos. Contudo, utilizam molas com menor rigidez, com conseqüente redução na frequência de ressonância. É importante lembrar que em sistemas com cinemática serial, cada eixo coordenado do sistema de apalpação possui sua própria massa, e para constantes de mola semelhantes, apresentará distintas frequências de ressonância na direção de cada eixo.

¹⁶ Contudo, caso seja possível assumir que a rigidez do apalpador é consideravelmente maior que a rigidez das molas do cabeçote medidor ($k_s \gg k_p$), pode-se reduzir o conjunto a um sistema discreto com um grau de liberdade, considerando somente a rigidez do cabeçote ($k = k_p$) e a soma das massas ($m = m_s + m_p$) para uma análise aproximada da frequência de ressonância fundamental do conjunto. Para noção de ordem de grandeza, o cabeçote SP80 apresenta uma constante de mola $k_p \approx 1,8$ N/mm [50]. Uma haste de metal duro a base de carboneto de tungstênio (módulo de Young $E \approx 500.000$ N/mm²) com seção transversal $d_s = 3,5$ mm e comprimento $L_s = 50$ mm apresenta rigidez transversal $k_s \approx 88,4$ N/mm.

Avaliação da resposta dinâmica dos sistemas de apalpação

Para avaliar a resposta dinâmica do sistema de apalpação, pode-se fazer uso de padrões com superfície estruturada, como os padrões de múltiplas ondas [26]. A Figura 25 mostra dois padrões de múltiplas ondas com distintas superfícies estruturadas [24], permitindo avaliar o desempenho do sistema de apalpação para medições de perfis circulares internos e externos e de perfis planos circulares (padrão à esquerda); e de perfis circulares externos e perfis retilíneos (padrão à direita).

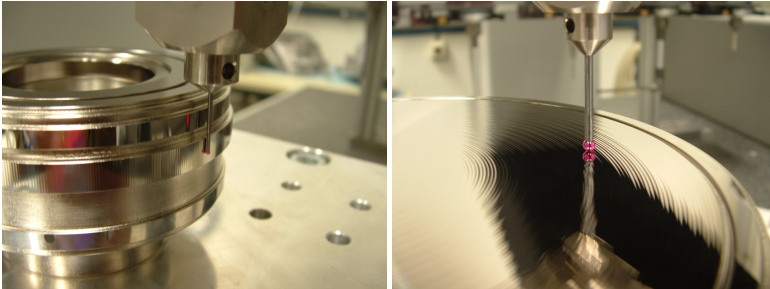


Figura 25 – Padrões de múltiplas ondas contendo estruturas senoidais sobrepostas. O padrão à esquerda apresenta evolução das estruturas da direção angular (cilindros interno e externo e superfície superior), e o padrão à direita, direção angular (cilindro externo) e radial (plano superior). Fonte: [24].

Na literatura encontram-se algumas propostas para avaliação da resposta dinâmica do sistema de apalpação. Um modelo linear de três graus de liberdade, considerando os três eixos coordenados de um cabeçote de cinemática serial passivo e as tensões de contato (mas não os apalpadores acoplados), foi apresentado por [61]. Outras propostas incluem o uso de geradores de sinais harmônicos com cristais piezelétricos [62] e modelos lineares unidimensionais de sistemas de apalpação [63].

2.4 AMBIENTE DE MEDIÇÃO

2.4.1 Temperatura

Para medições de forma, uma diferença absoluta em relação à temperatura de referência (20°C) não é crítica para os resultados de

medição¹⁷. Uma variação cíclica da temperatura absoluta, porém, pode provocar distorções na estrutura, uma vez que os distintos elementos da MMC (com distintas geometria e massa) apresentam diferentes repostas às variações de temperatura [64].

Outra condição térmica que pode influenciar os resultados de medição é a existência de gradientes significativos (acima dos limites especificados pelo fabricante) no ambiente, provocando distorções não-lineares na estrutura, considerando que a maioria dos CAA corrige apenas erros de ortogonalidade e posição. Por exemplo, o empenamento ilustrado da Figura 9 (à esquerda) pode ser provocado pela diferença de temperatura entre o ar sob e sobre o desempenho. Mesmo nos equipamentos que possuem correção dos 21 erros geométricos, existe ainda a possibilidade de ocorrer variação dos gradientes de temperatura de forma cíclica ou sazonal, alterando as condições em que foram realizados os ensaios de ajuste da matriz de correção do CAA.

Por fim, em medições realizadas com velocidades relativamente baixas, flutuações de temperatura de curto prazo podem levar ao erro de fechamento de perfis de circularidade (ou empenamento de perfis de retitude). O erro de fechamento também pode ocorrer quando não é dado à peça tempo suficiente para sua estabilização térmica antes da realização da medição.

2.4.2 Vibrações

O excesso de vibrações provenientes de ambiente também é um fator importante em medições por coordenadas, sendo crítico em medições por *scanning*. Vibrações podem aparecer no perfil como ondulações, e, dependendo das frequências presentes no espectro, não serem atenuadas pelo filtro digital [43].

Idealmente, as vibrações deveriam ser controladas na própria fonte ou durante a transmissão, antes de atingir a sala de medição [65]. Em ambientes industriais, entretanto, essa situação pode não ser praticável. Muitas vezes, por questões de logística e de realimentação dos processos produtivos com informações, a sala de medição fica próxima à produção (ou mesmo os equipamentos de medição integrados à linha de produção), de forma que a solução remanescente é realizar o controle de vibrações no próprio equipamento de medição. Nesse caso, o uso de sistemas compostos por bases inerciais e molas e/ou

¹⁷ Por exemplo, para o aço ($\alpha = 11,5 \mu\text{m}/\text{m.K}$), em um ambiente a 30°C, o erro de ganho provocado é de 0,35 nm/ μm .

amortecedores pneumáticos (passivos ou ativos) para isolar o desempenho da MMC da fundação torna-se imprescindível [65].

2.5 INTERFACE PEÇA/APALPADOR

Na interface entre a superfície da peça sob avaliação e o elemento de contato utilizado para aquisição ocorrem importantes combinações de efeitos, cuja influência sobre os resultados de medição é dependente inclusive do procedimento de medição adotado. Esta seção apresentará questões inerentes à aquisição de perfis por contato contínuo que ocorrem na interface superfície/apalpador.

2.5.1 Influência do acabamento superficial

Como visto na subseção 2.3.6, os comprimentos de onda presentes na superfície avaliada associados às características dinâmicas do sistema de apalpação e aos parâmetros de medição utilizados têm forte influência sobre os resultados de medição gerados. Os diferentes processos de fabricação geram distintos padrões de acabamento superficial, com diferenças que vão desde os comprimentos de onda mais baixos (rugosidade) até os mais altos (desvios de forma)¹⁸. Desse modo, superfícies provenientes de diferentes processos de produção irão solicitar o sistema de medição de maneira distinta, e distintos erros de medição serão gerados.

Como exemplo das diferenças entre superfícies geradas por diferentes processos de fabricação, a Figura 26 apresenta perfis circulares (e seus respectivos conteúdos harmônicos) adquiridos em superfícies geradas por dois processos de usinagem distintos: retificação e torneamento. No perfil obtido por torneamento, pode-se observar componentes dominantes¹⁹ nas frequências de 2 a 5 OPR, um conjunto componentes significativos entre 6 e 50 OPR (aproximadamente). No perfil obtido por retificação, podem ser observadas amplitudes dominantes em 2 e 3 OPR (com um pico ocorrendo em 170 OPR).

¹⁸ Uma discussão sobre os tipos de acabamento resultantes de diferentes processos de fabricação pode ser encontrada em [27].

¹⁹ Métodos matemáticos para determinação e separação dos componentes harmônicos dominantes de perfis são apresentados em [24] e [66].

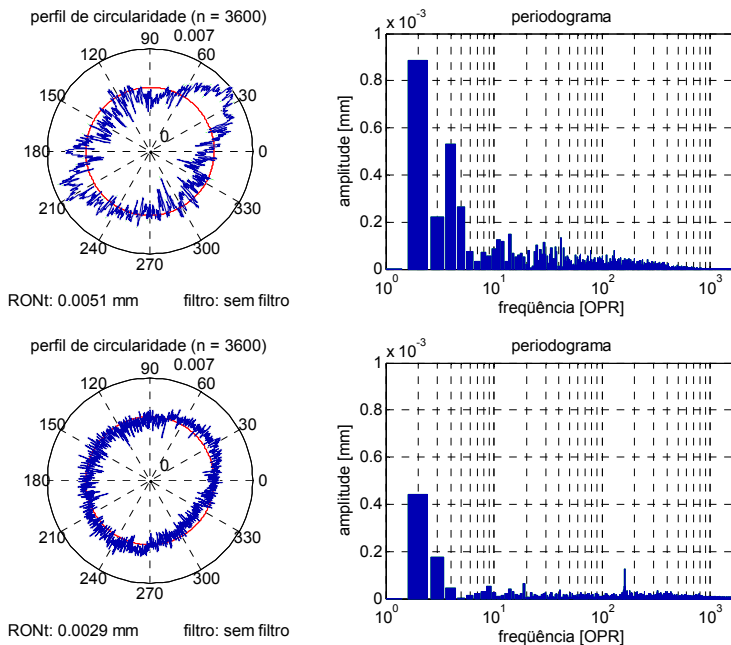


Figura 26 – Gráficos da linha circular extraída (e respectivos periodogramas) de duas superfícies cilíndricas internas obtidas por diferentes operações de usinagem: torneamento (acima) e retificação (abaixo).

Fonte: Autor.

A influência de distintos acabamentos superficiais sobre os erros de medição em aquisições por *scanning* foi estudada por [39], através de um experimento envolvendo medições de superfícies cilíndricas externas fabricadas por processos de usinagem distintos²⁰. Diferentes velocidades de medição foram utilizadas no experimento. A Figura 27 mostra os resultados desse experimento, onde se pode observar um aumento dos desvios com o aumento da velocidade. O aumento mais significativo ocorre para os perfis torneados, que apresenta amplitudes maiores quando comparado ao perfil retificado nas mesmas frequências.

²⁰ Cilindro externo retificado, com diâmetro de 50 mm. Cilindro externo torneado, com diâmetro de 62 mm. Cabeçote de cinemática serial ativo. Força de medição de 0,2 N, diâmetro do apalpador de 6 mm, elemento de referência definido pelo método de mínimos quadrados, sem filtragem digital.

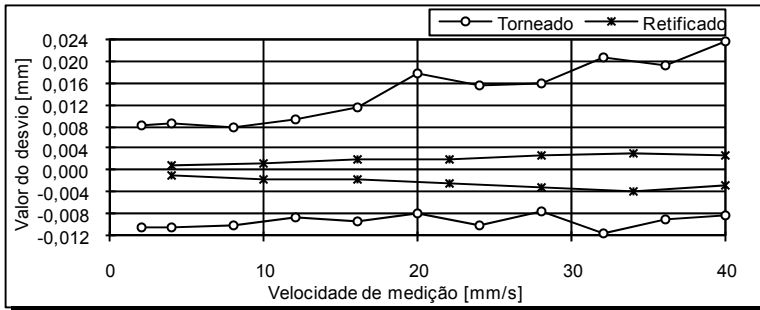


Figura 27 – Comparação dos desvios obtidos na medição duas superfícies cilíndricas externas (torneado e retificado) para distintas velocidades de medição. O valor zero na escala vertical representa o elemento de referência, e os pontos acima e abaixo são respectivamente o maior e o menor afastamento observados com relação ao elemento de referência, para cada perfil extraído.

Fonte: Adaptada de [39].

As características das superfícies também podem ter influência sobre os métodos de filtragem a serem utilizados de acordo como tipo de propriedade funcional sendo avaliada (ver subseção 2.10.4).

2.5.2 Deformações de contato

Além da deformação dos apalpadores, a força de contato provoca deformação (achatamento) dos elementos na interface superfície/apalpador. O achatamento provocado é dependente dos materiais e geometria dos elementos em contato e da força de contato. A Figura 28 mostra a deformação ocorrida no contato entre um apalpador esférico e uma superfície plana.

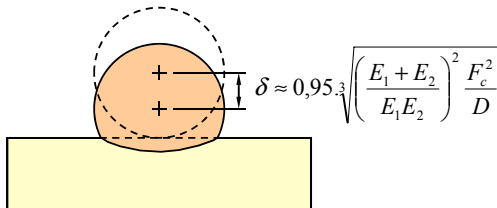


Figura 28 – Achatamento no contato entre esfera e plano (δ , em mm), onde E é o módulo de elasticidade dos materiais (em N/mm²), D é o diâmetro da esfera (em mm) e F_c a força de contato efetiva (em N). A equação considera coeficiente de Poisson dos materiais igual a 0,3. Fonte: Adaptada de [43].

Para medição de forma, o achatamento médio devido à força de contato média efetiva não é crítico. Entretanto, as variações em torno desta força podem gerar variações no achatamento, provocando distorções nos perfis observados²¹. Ainda mais importante é o fato de que os achatamentos dos picos dos componentes de mais alta frequência da superfície (e.g. ondulação) podem ser significativamente superiores quando comparados aos achatamentos estimados para uma superfície como geometria ideal [43]. Essa problemática se torna mais crítica no caso de materiais pouco rígidos (e.g. plásticos), ou no caso de medições com micro-MMC [68,69], onde os diâmetros das esferas dos apalpadores são inerentemente reduzidos (tipicamente inferiores a 1 mm, com forças nominais variando entre 0,5 e 2 mN).

2.5.3 Efeito *stick-slip*

Efeitos em alta frequência também podem ser gerados em baixas velocidades de medição, como é o caso do efeito de *stick-slip*, encontrado em diversos sistemas em que ocorre deslizamento entre superfícies [70]. Este efeito consiste na alternância entre aderência e deslizamento em superfícies de componentes mecânicos em contato e sujeitos a movimento relativo, devido ao atrito na interface, a elasticidade dos componentes e a força de contato. O efeito *stick-slip* gera vibrações na interface com intervalo de frequências razoavelmente estreito. As velocidades e acelerações tangenciais são altas na fase de deslizamento, podendo inclusive provocar perdas de contato entre as superfícies [70].

A distância de deslizamento entre dois pontos na fase de aderência (Δx_s) depende da diferença entre o atrito estático (μ_s) e o atrito dinâmico (μ_k), da rigidez equivalente dos componentes (k) e da força de contato. A Figura 29 descreve a distância de deslizamento de um sistema massa-mola, e de forma qualitativa, a variação da diferença entre atrito estático e dinâmico em função da velocidade²².

Os coeficientes de atrito não dependem apenas das superfícies, e em regime de *stick-slip*, não são independentes entre si. De modo geral,

²¹ Considerando uma superfície de aço ($E \approx 210.000 \text{ N/mm}^2$) e um apalpador de rubi ($E \approx 380.000 \text{ N/mm}^2$ e $D = 2 \text{ mm}$), uma força de contato de $F_c = (0,20 \pm 0,15) \text{ N}$ provoca uma variação no achatamento de $\Delta\delta \approx 0,1 \text{ }\mu\text{m}$.

²² De fato, a distância de deslizamento depende de outros fatores além dos citados. O coeficiente ψ da equação na Figura 29 é função da rigidez, da constante de amortecimento e da massa do sistema, da taxa de variação do coeficiente de atrito dinâmico com a velocidade e da força de contato [71]. No caso dos sistemas de apalpação, a rigidez corresponde à rigidez do conjunto sistema de apalpação/apalpador (k_p e k_s em série).

o coeficiente de atrito estático aumenta com o tempo de aderência entre as superfícies (t_s), e o coeficiente de atrito dinâmico geralmente diminui (embora possa aumentar) com o aumento da velocidade relativa entre os componentes (S). Em regime de *stick-slip*, o tempo de aderência entre as superfícies diminui com o aumento a velocidade relativa entre os componentes [70,71].

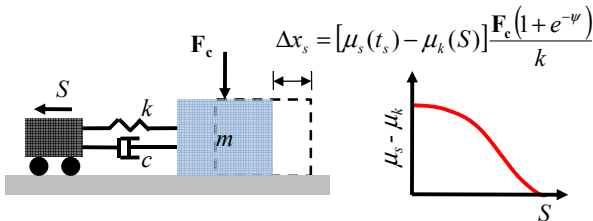


Figura 29 – Distância de deslizamento (Δx_s) para um sistema massa-mola-amortecedor em contato com uma superfície, conduzido a uma velocidade S .
Fonte: Adaptada de [71].

Dessa forma, o aumento da velocidade relativa entre componentes leva a uma convergência nos valores dos coeficientes de atrito, e a uma conseqüente redução na distância de deslizamento. A redução da força de contato e o aumento da rigidez dos componentes também reduzem a distância de deslizamento. Uma distância de deslizamento igual a zero significa um deslizamento contínuo (eliminação do efeito *stick-slip*).

O efeito *stick-slip* tem sido freqüentemente observado em medições por *scanning* em micro-MMC [69], onde as medições são realizadas em velocidade relativamente reduzidas (< 1 mm/s) e a rigidez dos apalpadores é inerentemente baixa.

2.5.4 Desvios de forma e deterioração dos apalpadores

Os desvios de forma dos elementos de contato influenciam diretamente os desvios de forma observados em medições de perfis circulares e superfícies livres. Os apalpadores utilizados em MMC geralmente utilizam esferas de grau 5 (desvio de forma máximo de $0,13 \mu\text{m}$) ou melhor (grau 3, desvio máximo de $0,08 \mu\text{m}$) [72].

Apalpadores de rubi (óxido de alumínio) são os tipos mais comumente utilizados em MMC, devido à alta dureza e aos acabamentos obtidos na fabricação dessas esferas. Entretanto, existem dois mecanismos de deterioração que degradam a geometria das esferas,

reduzindo significativamente a vida útil dos apalpadores: adesão por afinidade química e desgaste por abrasão.

Na medição de superfícies de alumínio com apalpadores de rubi, ocorre adesão de partículas da peça sobre o apalpador devido à afinidade química entre os materiais. Após a varredura de apenas alguns metros (dependendo da velocidade de medição e da força de contato efetiva), a superfície do apalpador fica coberta com uma camada de partículas arrancadas da superfície da peça, degradando severamente a geometria do apalpador. A Figura 30 (à esquerda) mostra a adesão de partículas de alumínio em um apalpador de rubi. Para realizar medições por *scanning* em alumínio, é recomendado o uso de esferas de metal duro (geralmente à base de carboneto de tungstênio) ou nitreto de silício [72].

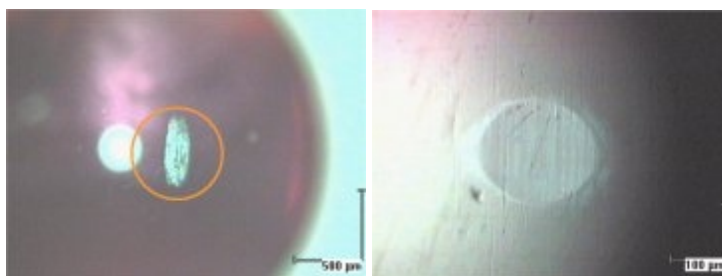


Figura 30 – Desgaste por adesão (à esquerda) e por abrasão (à direita) de apalpadores de óxido de alumínio. Fonte: [72].

Outro problema com o uso de apalpadores de rubi ocorre na medição de superfícies altamente abrasivas (exemplo típico é o ferro fundido). Na medição dessas superfícies, partículas residuais microscópicas produzem sulcos na superfície do apalpador, podendo com o tempo gerar regiões planas (ou anulares), comprometendo a geometria do apalpador. A Figura 30 (à direita) mostra o desgaste por abrasão de um apalpador de rubi. Para medições dessas superfícies, é recomendado o uso de esferas de zircônia [72].

2.5.5 Filtragem mecânica

No processo de aquisição, a geometria e a dimensão dos apalpadores utilizados têm grande influência sobre os elementos integrais extraídos resultantes. O apalpador funciona como um filtro passa-baixas não linear, com efeito dependente dos comprimentos e das amplitudes das ondas presentes na superfície real da peça [73,74]. A Figura 31 ilustra essa situação.

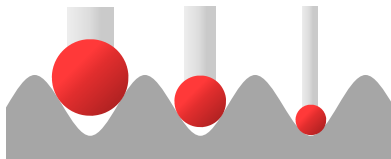


Figura 31 – Apalpadores com diferentes diâmetros irão produzir distintos níveis de filtragem mecânica, dado um mesmo comprimento de onda contendo uma mesma amplitude. Fonte: Autor.

Esse efeito pode ser propositadamente causado, para atenuar frequências ou eliminar componentes estruturais da superfície que não façam parte da propriedade funcional sob investigação (e.g. rugosidade, ver seção 2.7), minimizar o efeito do *aliasing* (ver subseção 2.6.1) e reduzir a solitação dinâmica sobre o sistema de apalpação. Entretanto, a filtragem mecânica não deve atenuar frequências (ou estruturas da superfície) de interesse para avaliação das propriedades funcionais sob investigação.

2.5.6 Dilatação mecânica

Em máquinas de medir por coordenadas, as coordenadas adquiridas correspondem ao centro do raio do apalpador. A aquisição de pontos por contato contínuo realiza mecanicamente uma operação morfológica chamada dilatação (mais detalhes na subseção 2.7.3, filtros morfológicos), a qual distorce o perfil real [75]. Essa distorção será tão mais acentuada quanto menor a relação comprimento de onda/amplitude das frequências presentes no perfil real e quanto maior o diâmetro do apalpador. A Figura 32 (à esquerda) mostra o perfil extraído a partir das coordenadas do centro do apalpador.

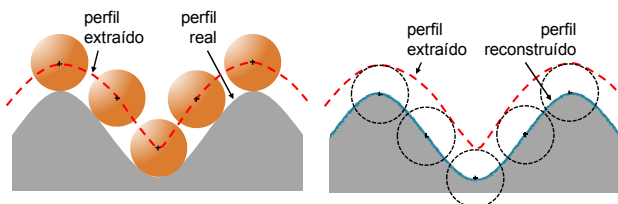


Figura 32 – Dilatação mecânica do perfil real resultando em um perfil distorcido (à esquerda) e reconstrução do perfil distorcido utilizando a operação de erosão.

Fonte: Autor.

Para realizar a correção da dilatação mecânica, a operação morfológica chamada erosão (inversa à dilatação) pode ser aplicada,

definindo como elemento estruturante uma esfera com mesmo raio do apalpador utilizado na aquisição. Um requisito para que a reconstrução seja efetiva é que não tenha ocorrido filtragem mecânica dos comprimentos de onda de interesse [75]. A Figura 32 (à direita) mostra a operação de erosão para reconstruir o perfil distorcido por dilatação mecânica.

2.6 DISCRETIZAÇÃO

2.6.1 *Aliasing* e o teorema da amostragem

Amostragem é o processo de redução de um sinal contínuo a um sinal discreto. O critério para uma boa amostragem é que a informação contínua possa ser satisfatoriamente reconstituída após a discretização [76]. A discretização do sinal nas MMC é realizada no controlador, que converte os sinais contínuos gerados nos transdutores do sistema de apalpação e das escalas da MMC em um único sinal.

Se o sinal original é limitado em sua largura de banda, então existe uma frequência máxima (ou comprimento de onda mínimo) presente no sinal. Nesse caso, o teorema da amostragem de Nyquist-Shannon define um limite mínimo para a frequência de amostragem²³ (f_s), igual ao dobro da máxima frequência (f_{max}) contida no sinal [76], conforme Equação 9. A frequência de Nyquist (f_N) é definida como metade de frequência de amostragem.

$$f_s \geq 2f_{max} \quad (\text{Equação 9})$$

Se uma frequência de amostragem menor que aquela definida pelo teorema da amostragem for utilizada, o sinal digitalizado sofrerá uma distorção denominada de *aliasing* (Figura 33). O *aliasing* faz com que uma senóide com um comprimento de onda curto (alta frequência) pareça ser uma onda com comprimento de onda mais longo (baixa frequência). Frequências acima da frequência de Nyquist serão “espelhadas” em torno desta.

Um ponto importante a ser considerado é que os sinais geralmente apresentam energia acima da maior frequência de interesse e/ou contém ruído (que invariavelmente apresenta ampla largura de

²³ Em perfis retilíneos, o teorema da amostragem pode ser adaptado ao intervalo de amostragem (ou passo), que deve ser menor ou igual à metade do mínimo comprimento de onda presente no perfil.

banda). Além disso, os sistemas de medição apresentam, de modo geral, limitação na taxa de amostragem. Dessa forma, para evitar o *aliasing*, é necessário limitar artificialmente a banda do sinal antes de sua discretização.

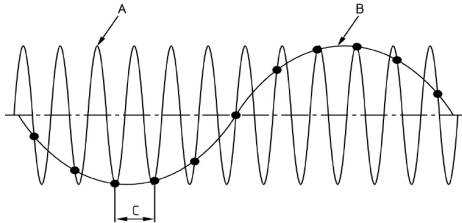


Figura 33 – Aliasing (onde A é o sinal original, B é o sinal com *aliasing*, C é o intervalo de amostragem). Fonte: [77].

As especificações técnicas que definem os operadores de especificações de forma (ISO/TS 12780-2 [77], ISO/TS 12781-2 [78], ISO/TS 12180-2 [79] e ISO/TS 12181-2 [80]) mencionam haver muitas maneiras de conseguir essa limitação de banda, sendo as mais comuns através da filtragem mecânica, do uso de filtros analógicos, do uso de filtros digitais; ou uma combinação desses. Na prática, a filtragem mecânica não impede a presença de ruídos eletrônicos originados no sistema de aquisição ou vibrações provenientes do ambiente. Com relação aos filtros digitais, estes somente podem atuar após a aquisição, quando o *aliasing* já ocorreu. Assim, o único modo de efetivamente evitar a ocorrência do *aliasing* é passando o sinal por um filtro analógico (denominado filtro *anti-aliasing*) antes da amostragem [76,81].

A especificação técnica ISO/TS 12780-2 (e demais) assume que frequências acima do ponto de transmissão de 0,02% de um filtro Gaussiano linear podem ser desprezadas. Desse modo, a frequência mínima de amostragem seria de sete vezes a frequência de corte do filtro digital (f_c) para se considerar que não ocorre *aliasing*. Entretanto, para que essa condição se verifique, o sinal deve estar limitado em sua banda de modo que não carregue nenhuma frequência acima da frequência de Nyquist ($f_{max} < f_N = 3,5f_c$). Caso os filtros *anti-aliasing* tivessem característica de transmissão ideal tipo degrau (*brick-wall*), a frequência de corte do mesmo poderia ser igual à frequência de Nyquist ($f_{ca,ideal} = 3,5f_c$).

Como os filtros analógicos possuem característica de transmissão que se afastam da ideal, a frequência de Nyquist efetiva deveria ser

deslocada para valores acima da frequência de rejeição (*stopband frequency*, f_{stop}) do filtro *anti-aliasing* [76]. Entretanto, como o filtro digital também irá atenuar algumas frequências espelhadas em torno da frequência de Nyquist, esta última pode ser definida como a média entre a frequência de rejeição do filtro *anti-aliasing* e a frequência $3,5f_c$. A Figura 34 ilustra essa situação.

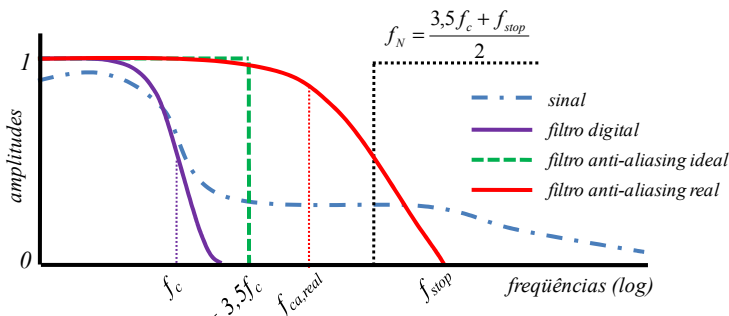


Figura 34 – Aumento da frequência de Nyquist devido ao comportamento não ideal de um filtro *anti-aliasing* real, e o uso do filtro digital. Fonte: Autor.

Para definir a frequência de rejeição, devem ser determinados a mínima atenuação requerida nessa frequência (de modo que as frequências acima da mesma não sejam detectáveis de acordo com a resolução do conversor A/D), e o valor da frequência de corte do filtro *anti-aliasing* ($f_{ca,real}$). Quanto mais íngreme for a característica de transmissão do filtro *anti-aliasing*, mais próximas serão as duas frequências. A frequência de corte do filtro *anti-aliasing*, por sua vez, depende do nível de *aliasing* que será aceito (geralmente, se considera que deva ser menor que o erro de quantização do conversor A/D), e da maior frequência de interesse, a qual não deve ser significativamente atenuada [76].

Um estudo realizado procurou avaliar a ocorrência do *aliasing* em máquinas de medir por coordenadas [82]. O estudo utilizou um padrão de múltiplas ondas²⁴, o qual foi medido em equipamentos de um mesmo fabricante. A frequência de corte do filtro digital²⁵ foi definida a priori ($\omega_c = 50$ OPR), e a partir disso, o padrão de múltiplas ondas foi medido com duas frequências de amostragem (número de pontos) distintas: $\omega_{s,1} = 3368$ OPR e $\omega_{s,2} = 458$ OPR. Ambas as estratégias

²⁴ Diâmetro externo $d = 150$ mm, contendo frequências dominantes de 5, 15, 50, 150 e 500 OPR, cada qual com amplitude nominal $A = 2,5$ μm .

²⁵ Filtro Gaussiano linear, com 50% de transmissão na frequência de corte.

satisfazem a condição de sete pontos por onda na frequência de corte, de acordo com as especificações ISO/TS 12780-2 (e demais). Os resultados são apresentados na Figura 35.

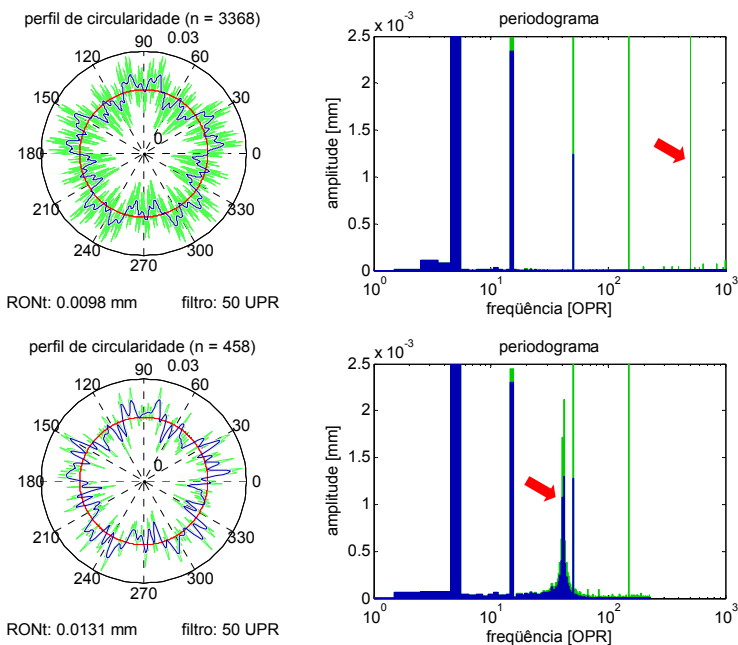


Figura 35 – Medição de um padrão de múltiplas ondas em uma MMC. Perfis extraídos em verde, perfis filtrados em azul. Perfil acima medido com 3368 pontos ($\omega_N = 1684$ OPR), e abaixo, com 458 pontos ($\omega_N = 229$ OPR), para o qual se pode verificar a ocorrência de *aliasing*. Fonte: Adaptada de [82].

Pelos resultados, pode-se perceber que as MMC avaliadas não possuem filtro *anti-aliasing* para limitação da largura de banda, e dessa forma, no segundo caso, o critério definido pelo teorema da amostragem não foi atendido. Como se pode notar, o uso do filtro digital na frequência de corte predefinida não foi capaz de eliminar os efeitos provocados pelo *aliasing*. Desse modo, pode-se concluir que o critério de um mínimo de sete pontos por onda na frequência de corte pode não ser condição suficiente para evitar os erros provocados pelo *aliasing*, principalmente quando não houver um filtro *anti-aliasing* prévio à etapa de amostragem no controlador.

2.6.2 Discretização não uniforme

Na medição de perfis por *scanning* em MMC, o intervalo de amostragem pode ser definido de dois modos: diretamente, com base espaço (de acordo com a posição do sistema de apalpação em relação às escalas); ou indiretamente, com base no tempo (de acordo com o tipo de trajetória e a velocidade de medição).

A complexa cinemática envolvida na aquisição de perfis que exijam o movimento de dois ou mais eixos da MMC para geração das trajetórias, aliada às limitações dos controladores em termos de discretização temporal e/ou de processamento, resulta em efeitos não desejáveis, entre eles, o espaçamento não uniforme entre pontos amostrados [3,83,84]. A Figura 36 mostra o espaçamento angular não uniforme (e sua distribuição multimodal) resultante da aquisição de um perfil circular real.

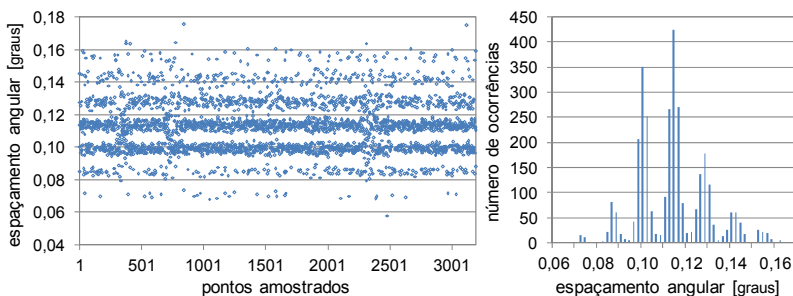


Figura 36 – Espaçamento angular não uniforme resultante da medição de um perfil circular em uma MMC (à esquerda) e sua distribuição multimodal (à direita). Fonte: Adaptada de [84].

Esse efeito é observado com maior intensidade em altas taxas de amostragem, situação na qual o controlador é altamente solicitado. A taxa de amostragem ($1/\Delta t$, em s^{-1}) em função dos parâmetros de medição é dada pela Equação 10:

$$\frac{1}{\Delta t} = \frac{N \cdot S}{C} \quad (\text{Equação 10})$$

onde S é a velocidade de medição (em mm/s), C é o comprimento da trajetória²⁶ (em mm) e N é o número de pontos a serem amostrados. Desse modo, quanto maior o número de pontos requeridos, e/ou maior a

²⁶ Sem considerar pré e pós-cursos. Para perfis circulares, é igual ao comprimento de arco da circunferência ($C = \alpha \cdot r$), onde α é o ângulo do arco em radianos.

velocidade de medição utilizada, maior será a dispersão da distribuição do espaçamento entre pontos, e mais modos poderão ser observados na distribuição [3,84].

Uma consequência direta da amostragem não uniformemente espaçada é a atenuação e espalhamento das frequências quando avaliadas pela transformada discreta de Fourier (DFT) (Figura 37). Devido a esse efeito, a comparação entre perfis pelo conteúdo harmônico será prejudicada. Do mesmo modo, em uma comparação entre perfis no domínio de espaço, a diferença entre os perfis poderá ser severamente superestimada. Outra consequência direta na avaliação de forma é que os perfis filtrados por métodos que utilizam a DFT (convolução no domínio da frequência), função peso com espaçamento homogêneo (convolução no domínio do espaço), ou operações morfológicas, apresentarão distorções [82].

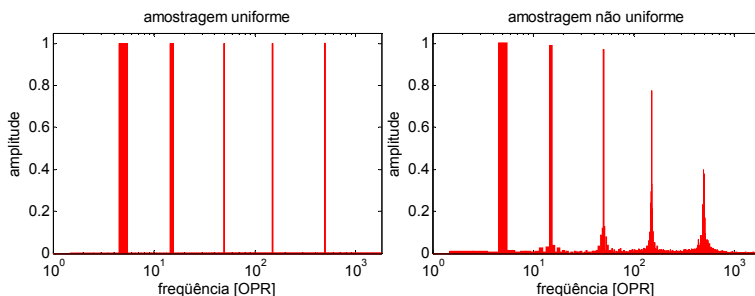


Figura 37 – Conteúdo harmônico de um sinal estruturado simulado (360.000 pontos) contendo cinco componentes de frequência (5, 15, 50, 150 & 500 OPR, amplitudes unitárias), extraído com duas estratégias de amostragem (ambas com 3600 pontos): amostragem uniforme (à esquerda) e amostragem não uniforme (à direita). Fonte: [84].

No intuito de minimizar os efeitos do espaçamento não uniforme em medições por *scanning* com MMC, um estudo utilizou interpolação linear dos perfis [3]. Entretanto, os resultados obtidos com o uso desse método de interpolação não se mostraram satisfatórios.

2.7 FILTRAGEM DIGITAL

O objetivo da filtragem digital é separar os componentes estruturais de uma superfície de modo a manter uma relação unívoca entre os parâmetros de avaliação da superfície e suas propriedades

funcionais [85]. A Figura 38 mostra a classificação dos componentes estruturais das superfícies de engenharia, divididos em rugosidade, ondulação e forma, conforme a diretriz DIN 4760 [86]. A motivação para essa classificação vem do fato de que os componentes estruturais têm diferentes origens no processo de fabricação e afetam o desempenho funcional das superfícies de maneira distinta [25,27]. Uma discussão sobre o conceito de filtragem funcional é realizada na subseção 2.10.4.




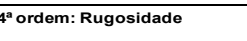

Desvios de forma (representado numa seção de perfil)	Exemplo para os tipos de desvio	Exemplo para causa da origem do desvio
1ª ordem: Desvio de forma 	Não plano Ovalização	Defeito em guias de máquinas-ferramentas, deformação por flexão em máquinas-ferramentas, fixação errada da peça, deformações devido à 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, velocidade de avanço ou profundidade de corte
4ª ordem: Rugosidade 	Estrias Escamas Ressaltos	Processo de deformação de cavaco (cavaco arrancado ou cisalhado, gume postiço), deformação do material por jato de areia, ressaltos por tratamento galvânico
5ª ordem: Rugosidade Não mais representável graficamente de forma simples	Estrutura	Processo de cristalização, modificação da superfície por ação química, corrosão
6ª ordem: Não mais representável graficamente de forma simples	Estrutura reticulada do material	Processo físicos e químicos da estrutura do material, tensões e deslizamentos da rede cristalina
Sobreposição dos perfis de 1ª a 4ª ordem 		

Figura 38 – Classificação dos componentes estruturais e suas origens nos processos de fabricação. Fonte: Adaptada de [86].

2.7.1 Breve histórico da filtragem digital

Os primeiros filtros utilizados com o intuito de separar componentes estruturais de superfícies foram os eletrônicos, utilizados para avaliação de rugosidade. Esses filtros eram compostos de uma rede formada por dois capacitores e dois resistores (denominados 2RC), e eram capazes de separar os componentes do perfil com base no seu conteúdo harmônico. Por possuírem memória, introduziam uma distorção de fase distinta para cada comprimento de onda, com conseqüente distorção do perfil filtrado. Com o intuito de estudar a distorção de fase introduzida pelos filtros 2RC, surgiram os filtros 2RC digitais (implementados via software), e logo em seguida, os filtros 2RC digitais com correção de fase (2RC-PC) [87]. Com o aumento da capacidade de processamento, os filtros 2RC-PC rapidamente ganharam

o mercado. O filtro 2RC é um filtro do tipo linha média²⁷ centrada no perfil (*M system*), com característica de transmissão linear. Com a introdução do filtro Gaussiano, o filtro 2RC tem caído em desuso²⁸.

Paralelamente, uma técnica alternativa vinha sendo estudada [88], a qual buscava separar os componentes estruturais por meio da simulação do deslizamento de uma esfera sobre a superfície, resultando em uma linha média que representava o envelope do perfil original. Diferente da premissa de que diferentes faixas de frequências são responsáveis por distintos comportamentos funcionais da superfície, a hipótese para o uso desses filtros é que estruturas da superfície, como reentrâncias e ressaltos, são quem afeta o desempenho funcional da mesma [25]. Durante mais de uma década deixou de ser utilizado na prática por limitações computacionais. Esse filtro é do tipo envelope (*E system*), com característica de transmissão não-linear. O interesse por essa classe de filtros para metrologia de superfícies vem sido retomada com os filtros morfológicos [89].

2.7.2 Filtro Gaussiano linear

Um significativo avanço no campo da filtragem digital foi dado com a introdução do filtro Gaussiano. Esse filtro, de linha média e linear, não apresenta distorção de fase relativa entre componentes do conteúdo harmônico. Outra característica importante do filtro Gaussiano diz respeito à relação de transmissão. O filtro Gaussiano padronizado [90,91] transmite 50% da amplitude no comprimento de onda de corte, enquanto o 2RC transmite 75%. Desse modo, para um mesmo comprimento de onda de corte, o filtro Gaussiano passa-altas é complementar do passa-baixas, não havendo a necessidade da implementação de dois algoritmos distintos. O filtro Gaussiano é o filtro mais utilizado atualmente [25], sendo padronizado tanto pela ISO (ISO 11562 [91]) quanto pela ASME (ASME B46.1 [90]).

A função peso (definição do filtro no domínio do tempo ou do espaço) do filtro Gaussiano passa-baixas é apresentada na Equação 11:

$$S(x) = \frac{1}{\alpha\lambda_c} \exp\left[-\pi\left(\frac{x}{\alpha\lambda_c}\right)^2\right] \quad (\text{Equação 11})$$

²⁷ Termo usual para o perfil resultante do processo de filtragem.

²⁸ Embora o filtro 2RC seja padronizado pela ASME (ASME B46.1:2002 [90]), devido às desvantagens em relação ao filtro Gaussiano, foi eliminado das normas ISO [25].

onde $\alpha = \sqrt{\ln 2 / \pi} = 0,4697$ para uma relação de transmissão de 50% no comprimento de onda de corte, x é a posição à partir da origem da função peso e λ_c é o comprimento de onda de corte (em mm).

A característica de transmissão (definição do filtro no domínio da frequência, Equação 12) do filtro Gaussiano passa-baixas é obtida pela transformação de Fourier da função contínua $S(x)$.

$$Sf(\lambda) = \exp \left[-\pi \left(\alpha \frac{\lambda_c}{\lambda} \right)^2 \right] \quad (\text{Equação 12})$$

A Figura 39 mostra as características de transmissão dos filtros Gaussianos utilizados para separação de rugosidade, ondulação e forma (ou forma com ondulação).

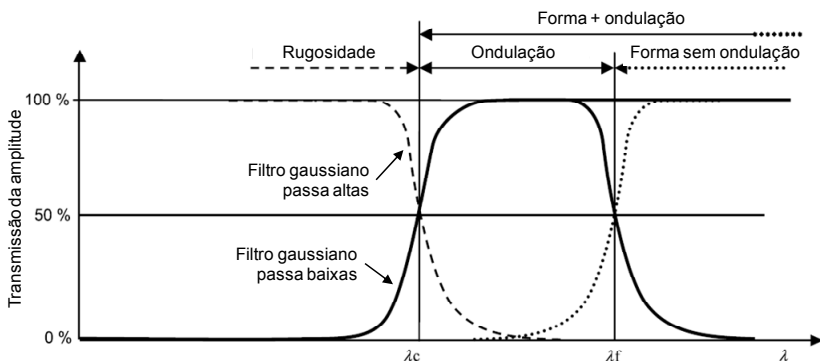


Figura 39 – Características de transmissão do filtro Gaussiano para perfis retilíneos utilizado para separação de rugosidade, ondulação e forma.

Fonte: Adaptado de [74].

No caso de medições de perfis circulares, é usual expressar os parâmetros de filtro em frequência (de acordo com a Equação 1). A característica de transmissão do filtro Gaussiano passa-baixas para perfis circulares é descrita pela Equação 13:

$$S(\omega) = \exp \left[-\pi \left(\frac{\alpha \cdot \omega}{\omega_c} \right)^2 \right] \quad (\text{Equação 13})$$

onde ω_c é a frequência de corte do filtro (em OPR). A Figura 40 mostra características de transmissão do filtro Gaussiano passa-baixas para várias frequências de corte normalizadas.

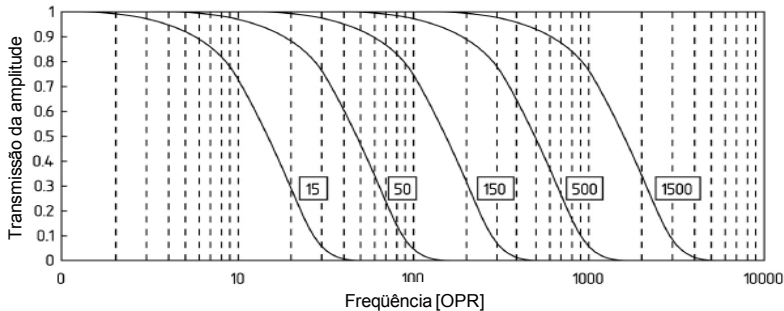


Figura 40 – Características de transmissão do filtro Gaussiano passa-baixas para várias frequências de corte padronizadas. Fonte: Adaptada de [80].

O filtro Gaussiano linear, apesar de representar um avanço sobre o filtro 2RC-PC, conserva alguns problemas deste, tais como [92]:

- Distorção nos extremos para perfis retilíneos e circulares abertos (Figura 41, à esquerda);
- Afastamento da linha média em perfis com desvios de forma grandes (e.g. superfícies livres, côncavas ou convexas);
- Sensibilidade à presença de *outliers*²⁹ (Figura 41, à direita) e/ou estruturas em superfícies com distribuição assimétrica (e.g. com propriedades funcionais estratificadas [93], ver subseção 2.10.4 para mais detalhes).

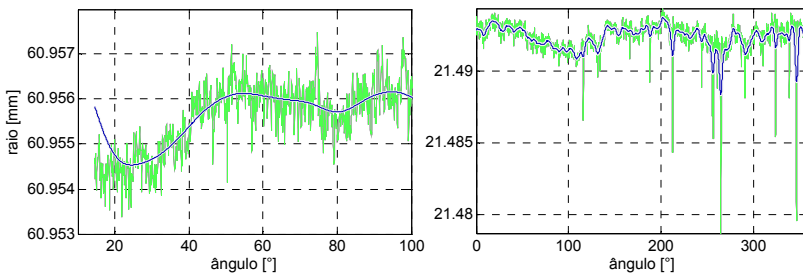


Figura 41 – Dois problemas do filtro Gaussiano linear: distorção nos extremos de perfis abertos (frequência de corte de 15 OPR, à esquerda) e distorção devido a reentrâncias presentes no perfil (frequência de corte de 50 OPR, à direita).

Fonte: Autor.

²⁹ Definição de *outlier* pode ser encontrada na seção 2.8.

2.7.3 Métodos alternativos de filtragem

Métodos alternativos de filtragem têm sido desenvolvidos por pesquisadores para lidar com problemas relacionados aos filtros lineares (sobretudo o Gaussiano), enquanto outros trazem uma abordagem distinta, centrada na temática filtragem funcional. Alguns desses métodos alternativos têm sido transformados em especificações técnicas pelo comitê técnico 213 da ISO. A série regida pela ISO/TS 16610-1 [94] (com algumas partes recentemente publicadas) prevê um conjunto com três classes de filtros (linear, robusto e morfológico) para perfis (Tabela 2) e para superfícies.

Tabela 2 – Série ISO/TS 16610 para perfis (partes ainda não publicadas em itálico). Fonte: Adaptada de [94].

General	Part 1:2006 - Overview and general terms		
	Linear (2)	Robust (3)	Morphological (4)
Basic Concepts	Part 20:2006 - Basic Concepts	Part 30:2009 - Basic Concepts	Part 40:2006 - Basic Concepts
Particular Filters (1-5)	Part 21 - <i>Gaussian filters</i> Part 22:2006 - Spline filters	Part 31 - <i>Gaussian regression filters</i> Part 32:2009 - Spline filters	Part 41:2006 - Disk and horizontal line segment filters Part 42 - <i>Motif filters</i>
How to filter (6-8)	Part 26 - <i>Nominally orthogonal grid planar data sets</i> Part 27 - <i>Nominally orthogonal grid cylindrical data sets</i> Part 28 - <i>End effects</i>	-	-
Multiresolution (9)	Part 29:2006 - Spline wavelets	-	Part 49:2006 - Scale space techniques

Filtro *spline* linear

O filtro *spline* linear [95-97] foi desenvolvido para lidar com dois problemas relacionados ao filtro Gaussiano linear: afastamento da linha média para perfis com desvios de forma grandes e distorções nos extremos de perfis abertos. Além disso, o filtro *spline* linear apresenta característica de transmissão mais íngreme que o filtro Gaussiano linear, se aproximando melhor da característica de transmissão ideal (Figura 42, à direita).

A função peso do filtro *spline* não pode ser descrita por uma equação simples, embora possa ser estimada com boa aproximação (Figura 42, à esquerda) caso o número de pontos adquiridos seja suficientemente grande. A implementação é realizada, portanto, por meio de equações de filtragem, sendo que as matrizes das equações são diferentes para perfis abertos fechados (periódicos) e para perfis abertos (não-periódicos) [98].

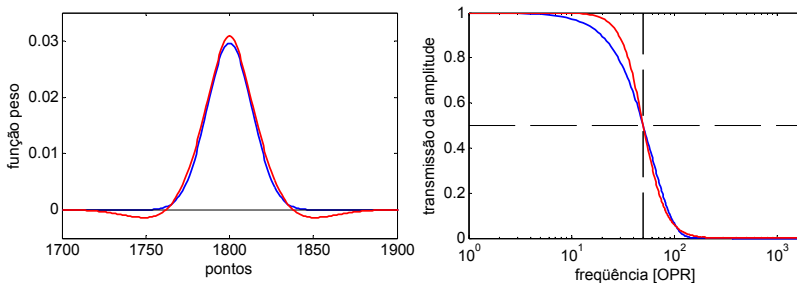


Figura 42 – Comparativo entre funções peso (à esquerda) e características de transmissão (à direita) dos filtros Gaussiano linear (em azul) e *spline* linear (em vermelho), para uma frequência de corte $\omega_c = 50$ OPR. Fonte: Autor.

O filtro *spline* para avaliação de perfis é padronizado pela especificação técnica ISO/TS 16610-22 [98], e alguns softwares de medição de MMC dispõem de sua implementação [56,99]. Embora o filtro *spline* linear represente um avanço em relação ao filtro Gaussiano linear em diversos aspectos, apresenta praticamente a mesma sensibilidade à presença de *outliers* e/ou estruturas em superfícies com distribuição assimétrica (como na Figura 41, à direita).

Filtros robustos

Os filtros robustos foram desenvolvidos para permitir a avaliação de superfícies com propriedades funcionais estratificadas sem a distorção da linha média tipicamente produzida pelos filtros lineares. Por serem não-lineares, os filtros robustos não apresentam função peso definida [25]. Atualmente existem duas propostas de filtros robustos para metrologia de superfícies: o filtro Gaussiano regressivo robusto [100] e o filtro *spline* robusto [101].

O filtro Gaussiano regressivo robusto é um aprimoramento do filtro Gaussiano regressivo de dois estágios (filtros Rk , conforme definidos pela ISO 13565-1 [93]), o qual utiliza múltiplos passes (iterações) para a remoção de estruturas da superfície não interessantes para avaliação da propriedade funcional sob investigação. A definição da função peso é gerada ao longo de todo o perfil (considera espaçamento entre pontos), e diferenciada nos extremos (praticamente eliminando distorções em perfis abertos). O critério de convergência é baseado na mediana dos perfis obtidos em cada iteração [100]. Encontra-se em estágio final de aprovação para especificação técnica

(ISO/PRF TS 16610-31 [102]), e alguns softwares de medição de rugosidade o apresentam implementado [103].

O filtro *spline* robusto é uma modificação do *spline* linear, utilizando uma ponderação sobre os valores da linha média gerada, em um processo iterativo. É padronizado pela especificação técnica ISO/TS 16610-32 [104], e encontra-se implementado em alguns softwares de medição [105].

Filtros morfológicos

Os filtros morfológicos são uma classe diferenciada de filtros para metrologia de superfícies [89], onde a linha média obtida pela filtragem representa um envelope da superfície. Os filtros morfológicos utilizam elementos estruturantes discretos (tipicamente esfera ou plano), a partir do qual a linha média é gerada. Existem duas operações primárias na filtragem morfológica: a *dilatação*, operação na qual o elemento estruturante percorre a superfície externamente (fora do material, Figura 43); e a *erosão*, operação na qual o elemento estruturante percorre a superfície internamente.

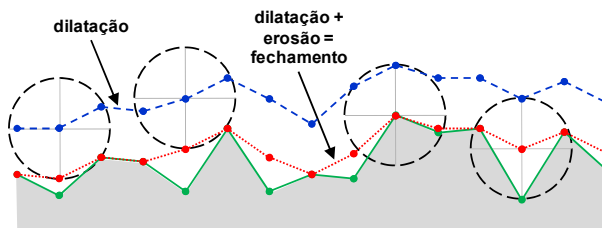


Figura 43 – Operação morfológica de dilatação seguida de erosão, denominada fechamento, resultando em uma linha média tipo envelope. Fonte: Autor.

A filtragem morfológica pode ser realizada por uma sucessão de operações primárias. Uma dilatação seguida de uma erosão (utilizando o mesmo elemento estruturante) é denominada *fechamento* (Figura 43). Uma erosão seguida de uma dilatação é denominada *abertura*. Estas duas últimas são operações morfológicas secundárias.

As operações secundárias filtram seletivamente os picos e vales do perfil. A operação de fechamento elimina somente os vales do perfil (Figura 43), e a de abertura, os picos. Esta seletividade é interessante do ponto de vista da filtragem funcional, pois pode ser utilizado para filtragem de perfis com distribuição assimétrica sem que ocorra deslocamento da linha média. Dependendo da propriedade funcional sob avaliação, pode-se utilizar um fechamento seguido de uma abertura

(e/ou vice-versa), de modo a equilibrar a atenuação de picos e vales da superfície [25].

Embora os filtros morfológicos representem uma alternativa promissora do ponto de vista da filtragem funcional e de estarem publicados na especificação técnica ISO/TS 16610-41 [106], são desconhecidos softwares de medição por coordenadas comerciais que o tenham implementado.

Filtragem multi-escala

A filtragem multi-escala (ou multi-resolução) é utilizada para particionar um perfil em uma série de faixas de componentes estruturais (escalas). Não é um filtro em si, mas utiliza métodos de filtragem para realizar a partição. A partição pode ser realizada em escalas de frequências ou de tamanhos de elementos estruturantes (e.g. filtros morfológicos). A filtragem multi-escala permite realizar uma análise simultânea das várias faixas de componentes presentes no perfil, e também da evolução das mesmas ao longo do perfil [25]. Essa análise é fortemente ligada ao conceito de filtragem funcional [92].

Para poder realizar uma partição em faixas estreitas, é importante que a característica de transmissão seja suficientemente íngreme, para não haver excessiva distribuição das frequências entre faixas adjacentes. Portanto, filtros como o Gaussiano e o *spline* não são recomendados [25]. Para a realização de filtragem multi-escala, são geralmente utilizadas funções *wavelet* (*spline wavelets*) ou operações morfológicas alternadas (*scale-space techniques*), ambos os métodos padronizados pelas especificações técnicas ISO/TS 16610-29 [107] e ISO/TS 16610-49 [108], respectivamente.

2.8 TRATAMENTO DE *OUTLIERS*

Um dos mais críticos problemas na medição de desvios de forma é a presença de *outliers* nos perfis extraídos, pois os mesmos degradam o desempenho de algumas classes de filtros (conforme visto). Esse fato é particularmente crítico em medições por *scanning* em MMC, pois esses equipamentos muitas vezes estão sujeitos a severas condições relacionadas ao ambiente de produção (altos níveis de vibrações, partículas residuais sobre a superfície, etc.). Os *outliers* devem, portanto, ser matematicamente eliminados do perfil antes da realização da filtragem, sempre que possível.

Cabe aqui diferenciar (embora na literatura essa distinção nem sempre seja feita) um *outlier*, que é gerado pelo processo de medição, não pertencendo à superfície avaliada; das estruturas tipo reentrâncias e ressaltos de superfícies com distribuição assimétrica (ou que são esporadicamente geradas pelo processo de fabricação). A diferenciação é necessária, pois a eliminação de *outliers* pode implicar na eliminação de estruturas pertencentes à superfície, e a decisão entre eliminar ou não essas estruturas deve estar ligada às propriedades funcionais da superfície sendo avaliadas.

Pouca literatura existe sobre a eliminação de *outliers* na medição de superfícies. A especificação técnica ISO/TS 16610-1 [94] define *outlier* como “*Porção local em um conjunto de dados não representativo ou não típico do elemento integral particionado, e caracterizado por sua magnitude e escala*”. Menciona também em nota no mesmo parágrafo que “*nem todos os outliers podem ser detectados usando somente o perfil ao qual pertencem, a não ser aqueles fisicamente inconsistentes com a geometria do apalpador*”. Em outras palavras, não é possível diferenciar, a priori, um *outlier* de uma estrutura pertencente à superfície (a não ser que apresente, por exemplo, profundidade incompatível com a filtragem mecânica realizada pelo apalpador). Todavia, existem métodos propostos (alguns implementados em softwares comerciais) com o objetivo de reconhecer e eliminar *outliers* de perfis extraídos, os quais serão discutidos a seguir.

2.8.1 Métodos convencionais

Os métodos para reconhecimento e eliminação de *outliers* implementados em softwares comerciais geralmente se baseiam em limites de corte definidos em torno do elemento de referência ajustado ao perfil (ou superfície). Os pontos que se estendem além destes limites são considerados *outliers* e retirados do perfil.

Para definição do afastamento em relação ao elemento de referência, dois métodos principais podem ser identificados: afastamento predeterminado, e avaliação estatística do perfil [109]. O primeiro método é extremamente empírico, as pequenas perturbações no processo de produção podem exigir definição de novos limites. O segundo método utiliza o desvio padrão da nuvem de pontos do perfil com relação ao elemento de referência, multiplicado por um coeficiente de expansão, definido empiricamente pelo avaliador. Este método é mais comumente encontrado em softwares de medição por coordenadas

[56,99], e apresenta a vantagem de não requerer a constante interferência do avaliador na definição de parâmetros.

Os dois métodos descritos apresentam limitações, como por exemplo, a não eliminação (ou eliminação parcial) de *outliers* que se encontrem abaixo de picos (ou acima de vales) do perfil, e que poderão prejudicar o desempenho da filtragem digital subsequente (Figura 44).

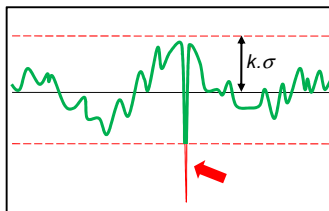


Figura 44 – Filtro de *outliers* pelo método da avaliação estatística (onde k é o coeficiente de expansão para o desvio padrão dos pontos com referência ao elemento de referência, e as linhas tracejadas em vermelho são os limites de corte). Nesse exemplo, o *outlier* não foi completamente eliminado.

Fonte: Autor.

Para contornar essa situação, alguns softwares permitem eliminar pontos em torno daqueles que ultrapassaram os limites, e/ou utilizar um filtro passa-altas antes da eliminação (atenuando as frequências baixas de modo a evidenciar o *outlier*) [99].

2.8.2 Métodos utilizando filtragem multi-escala

Os métodos mais recentemente propostos para reconhecimento e eliminação de *outliers* fazem uso das técnicas de filtragem multi-escala [25,109]. Esses métodos utilizam o mesmo conceito de análise estatística do perfil utilizado nos métodos convencionais, contudo os limites de corte são definidos e aplicados em cada faixa de componentes do perfil particionado. O propósito de utilizar múltiplas escalas é de segregar os *outliers* à faixa (ou faixas) de frequências (ou de tamanhos de elementos estruturantes) que deram origem ao mesmo, sem alterar os componentes das demais faixas, e minimizando o problema da eliminação incompleta do *outlier* (Figura 44). Apesar de ser um método promissor, não foram encontrados estudos na literatura sobre o desempenho desse método para reconhecimento e eliminação de *outliers* gerados no processo de aquisição de superfícies.

2.9 CÁLCULO DOS ELEMENTOS DE REFERÊNCIA E PARÂMETROS GEOMÉTRICOS

As especificações técnicas ISO/TS 12780-1 [110], ISO/TS 12781-1 [111], ISO/TS 12180-1 [112] e ISO/TS 12181-1 [113] definem termos, métodos de ajustes matemáticos e parâmetros geométricos específicos para avaliações de retitude, planeza, cilindricidade e circularidade, respectivamente.

Os elementos de referência em medições de forma são definidos pela associação (ajuste matemático) do próprio elemento extraído a ser avaliado. Os métodos padronizados pelas especificações técnicas ISO para associação dos elementos (de acordo com a avaliação) estão listados abaixo.

- Para avaliação de retitude: linha por mínimos quadrados (LSLI) e linha por mínima zona (MZLI);
- Para avaliação de planeza: plano por mínimos quadrados (LSPL) e plano por mínima zona (MZPL);
- Para avaliação de cilindricidade: cilindro por mínimos quadrados (LSCY), cilindro por mínima zona (MZCY), maior cilindro inscrito (MICY) e menor cilindro circunscrito (MCCY);
- Para avaliação de circularidade: círculo por mínimos quadrados (LSCI), círculo por mínima zona (MZCI), maior círculo inscrito (MICI) e menor círculo circunscrito (MCCI);

O parâmetro geométrico para medição de forma adotado como padrão pela norma ISO 1101 [1] é o desvio pico-vale, definido como o maior desvio local positivo somado ao valor absoluto do maior desvio local negativo³⁰, e representado pelo índice 't'. O elemento de referência para avaliação desse parâmetro pode ser obtido por qualquer um dos métodos de ajuste matemáticos padronizados.

Outros parâmetros geométricos definidos (apenas para elementos de referência calculados pelo método dos mínimos quadrados) são:

- Desvio pico-referência (valor do maior desvio local positivo com relação ao elemento de referência), representado pelo índice 'p';

³⁰ De acordo com a convenção adotada pela especificação técnica ISO 12181-1 (e demais), o desvio local é negativo quando, partindo do elemento de referência, o ponto se localiza no sentido do material.

- Desvio referência-vale (valor absoluto do maior desvio local negativo com relação ao elemento de referência), representado pelo índice ‘v’;
- Desvio RMS (raiz da média quadrática), representado pelo índice ‘q’.

A Figura 45 mostra como exemplo a definição dos parâmetros geométricos para avaliação de circularidade (menos o parâmetro $RONq$). Além desses, as especificações técnicas ISO/TS 12781-1 e ISO/TS 12180-1 (para planeza e cilindricidade, respectivamente) definem parâmetros para avaliação de forma dos elementos derivados extraídos (e.g. retitude da linha média derivada extraída de um cilindro).

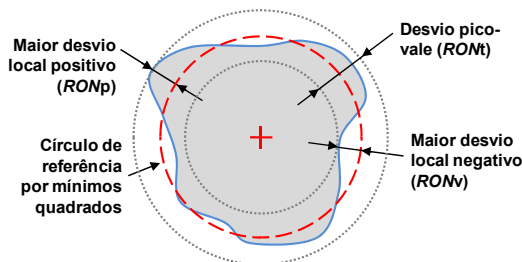


Figura 45 – Termos utilizados para definição dos parâmetros geométricos para avaliação de circularidade (RON) conforme ISO/TS 12181-1. Outros métodos de ajuste matemático podem ser utilizados. Fonte: Autor.

A especificação técnica ISO/TS 12181-1 define ainda o parâmetro denominado *conteúdo dinâmico* como os componentes harmônicos que constituem uma linha circunferencial extraída (obtidos pela transformação de Fourier do perfil). O parâmetro é constituído pela amplitude e pela fase de cada componente, e pode ser especificado como um ou mais componentes harmônicos, e/ou como a soma dos mesmos.

2.10 FONTES DE INCERTEZA RELACIONADAS À DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO

A especificação técnica ISO/TS 17450-2 [114] apresenta um conjunto de princípios e definições básicas que se aplica a toda a cadeia de especificação e verificação de características geométricas de produto. A seguir será feita uma apresentação desses conceitos.

2.10.1 Divergência entre operadores de especificação e verificação

De acordo com a especificação técnica ISO/TS 17450-2, o conjunto de operações ordenadas para definir uma especificação geométrica constitui o *operador de especificação*. Por exemplo, para uma especificação da circularidade em uma peça, o seguinte operador pode ser definido:

- Operação de extração:
 - Local: -5 mm da referência |A|;
 - Intervalo de amostragem: 3600 pontos em 360°;
 - Apalpador: Esférico com de 5 mm de diâmetro;
- Operação de filtragem:
 - Método: Gaussiano linear;
 - Frequência de corte: 50 OPR;
- Operação de associação: círculo por mínima zona;
- Operação de avaliação: desvio de circularidade pico-vale (*RONt*);

Um *operador de especificação completo* contém todas as operações necessárias para uma definição inequívoca da característica. Caso alguma operação necessária esteja faltando, tem-se um *operador de especificação incompleto*, o qual implica na geração de uma fonte de incerteza denominada *incerteza de especificação*.

De forma similar, o conjunto de operações ordenadas para verificar uma especificação geométrica constitui o *operador de verificação*. Um *operador de verificação perfeito* utiliza ordenadamente todas as operações definidas pelo operador de especificação. Caso um operador de verificação divirja do respectivo operador de especificação (por divergência ou omissão nas operações de verificação com relação às operações de especificação, ou pela alteração na ordem de execução das mesmas), tem-se um *operador de verificação simplificado*, o qual implica na geração de uma fonte de incerteza denominada *incerteza do método*.

Todos os processos de medição apresentam desvios nas características metrológicas (e.g. erros de medição). Os erros de medição implicam na geração de uma fonte de incerteza denominada *incerteza de implementação*. De acordo com a especificação técnica ISO/TS 17450-2, a *incerteza de medição* é a combinação da incerteza do método com a incerteza de implementação.

A incerteza de especificação é derivada de toda a gama de decisões que podem ser tomadas na definição de operações de verificação quando um operador de especificação necessário a uma definição inequívoca da característica é omitido (e.g. se a frequência de corte do filtro não é definida na especificação). A incerteza do método é derivada de decisões tomadas de forma deliberada (por razões técnicas ou operacionais) que levam à divergência entre o operador de especificação e o operador de verificação (e.g. a utilização de um ajuste matemático distinto do especificado).

Algumas normas e especificações técnicas ISO definem os denominados *operadores de especificação padrão*. São conjuntos de operações de especificação padrão definidas de acordo com características geométricas específicas. Os operadores de especificação padrão podem ser completos ou incompletos. Na definição dos operadores de especificação padrão, a ISO geralmente adota a filosofia “a não ser que especificado de outra maneira” [115], deixando aberto o uso de operadores de especificações que possam ser mais adequados à avaliação funcional da superfície (ver subsecção 2.10.4).

As especificações técnicas ISO/TS 12780-2 (e demais [77-80]), e as diretrizes VDI/VDE 2617-2.2 [73] e VDI/VDE 2631-3 [74], definem operadores para especificações de forma. Os operadores (com valores padrão quando definidos) abordados nesses documentos técnicos são listados abaixo.

- Operação de extração:
 - Intervalo de amostragem: menor que sete vezes o comprimento de onda de corte;
 - Geometria do apalpador: esférica;
 - Diâmetro do apalpador³¹;
 - Força de medição³²: 0 N;
- Operação de filtragem:
 - Método³³: Gaussiano linear (ISO 11562 [91]);

³¹ As diretrizes mencionadas apresentam um método para determinar o máximo diâmetro admissível do apalpador (ver subsecção 2.10.2).

³² As especificações técnicas ISO mencionadas consideram que efeitos elásticos em artefatos de metal com geometria adequada são desprezíveis, o que não pode ser assumido como fato para todas as situações em medições por *scanning* com MMC.

³³ As especificações (e diretrizes) citadas, por terem sido elaboradas anteriormente à publicação da série regida pela especificação técnica ISO 16610-1 [94], consideram o filtro Gaussiano linear como padrão para medição de forma. Mencionam, contudo, que caso algum método alternativo de filtragem deva ser utilizado, que seja especificado sem ambigüidade.

- Parâmetro (frequência ou comprimento de onda) de corte;

As especificações técnicas ISO acima mencionadas apontam (na introdução) que não definem valores padrão³⁴ para os parâmetros de corte de filtros, diâmetro do apalpador e método de cálculo do elemento de referência, e considera, portanto, que devem ser explicitamente definidos nas especificações do produto. Mencionam ainda que caso não sejam definidos nas especificações, a definição dos mesmos fica a critério do fornecedor.

Atualmente, não é comum encontrar nos desenhos técnicos informações que vão além da simples definição da especificação a ser avaliada (tipo da especificação e valor da zona de tolerância). Parte disso se deve à falta de uma padronização por parte das normas de especificações de produto para o uso dessas informações nos desenhos técnicos, embora se encontre algumas propostas nesse sentido [116,117], como no exemplo da Figura 46. Dessa maneira, é deixada uma ampla abertura para definição dos operadores de verificação por parte do metrologista, gerando incertezas relativas à especificação.

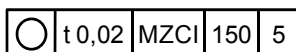


Figura 46 – Exemplo de uma especificação de circularidade, com valores para diâmetro do apalpador (5 mm), frequência de corte (150 OPR), método de associação (círculo por mínima zona) e método de avaliação (desvio de circularidade pico-vale). Fonte: Adaptado de [116] e [117].

2.10.2 Recomendações e métodos para definição de operadores de especificação de forma

Esta subseção apresenta recomendações e métodos encontrados na literatura técnica para definição de alguns operadores de especificação de forma.

Parâmetro de corte dos filtros

As especificações técnicas ISO/TS 12780-2 [77] e ISO/TS 12781-2 [78] definem um conjunto de valores para o comprimento de onda de corte (0,08; 0,25; 0,8; 2,5 e 8 mm) do filtro para perfis retilíneos, mas não fornece recomendações para seleção entre um dos valores. Contudo, a norma internacional ISO 13565-1 [93] define o comprimento de onda de corte $\lambda_c = 0,8$ mm para separação do perfil de

³⁴ Contudo, fornecem conjuntos de valores recomendados para parâmetros de corte e raios máximos de apalpadores (ver subseção 2.10.2).

rugosidade do perfil de forma com ondulação (Figura 39). O comprimento de onda de corte $\lambda_f = 2,5$ mm é sugerido [118] para a separação do perfil de ondulação do perfil de forma.

Tabela 3 – Frequências de corte recomendadas para filtragem de perfis circulares. Fonte: Adaptada de [118].

Diâmetro da peça [mm]	< 8	8 a 25	25 a 80	80 a 250	> 250
Frequência de corte para perfil de forma com ondulação (ω_c) em OPR	15	50	150	500	1500
Frequência de corte para perfil de forma somente (ω_f) em OPR	15		50	150	500

As especificações técnicas ISO/TS 12181-2 [79] e ISO/TS 12181-2 [80] definem um conjunto de valores para a frequência de corte (15, 50, 150, 500 e 1500 OPR) do filtro para perfis circulares, mas não fornece recomendações para seleção entre um dos valores. Caso essas frequências de corte sejam calculadas com base no comprimento de onda de corte $\lambda_c = 0,8$ mm e no diâmetro nominal do elemento a ser avaliado (utilizando com a Equação 1), o perfil resultante da filtragem será o perfil de forma com ondulação. De modo similar, mas com base no comprimento de onda de corte $\lambda_f = 2,5$ mm, o perfil resultante será o perfil de forma somente. A Tabela 3 apresenta valores de frequências de corte sugeridas [118] para os dois casos.

As diretrizes VDI/VDE 2617-2.2 [73] e VDI/VDE 2631-3 [74] orientam à seleção da frequência de corte com base no conteúdo harmônico da superfície, com o objetivo de não eliminar frequências significativas, para os casos em que a mesma não seja especificada.

A VDI/VDE 2631-1 [119] chama a atenção para a alteração do parâmetro de corte do filtro com o objetivo de eliminar ruídos, pois comprimentos de onda de interesse do ponto de vista funcional podem ser atenuados.

Raio do apalpador

As diretrizes VDI/VDE 2617-2.2 [73] e VDI/VDE 2631-3 [74] orientam à seleção da dimensão dos apalpadores de modo que os efeitos da filtragem mecânica não sejam significativos com relação às frequências de interesse para medição de perfis retilíneos e perfis

circulares internos e externos. O máximo diâmetro admissível (D) pode ser obtido pelas equações ou gráficos fornecidos³⁵.

Para medição de perfis circulares, o máximo diâmetro permissível depende do diâmetro do elemento (d), da frequência de corte do filtro digital para obtenção do perfil de forma com ondulação (ω_c), e da amplitude pico a pico do perfil de ondulação³⁶ (Wt). Para medição de perfis retilíneos, depende do comprimento de onda de corte do filtro digital para obtenção do perfil de forma com ondulação (λ_c), e da amplitude pico a pico do perfil de ondulação (Wt). Como exemplo, a Figura 47 apresenta a equação e os gráficos para a obtenção do máximo diâmetro permissível do apalpador para aquisição de perfis circulares internos.

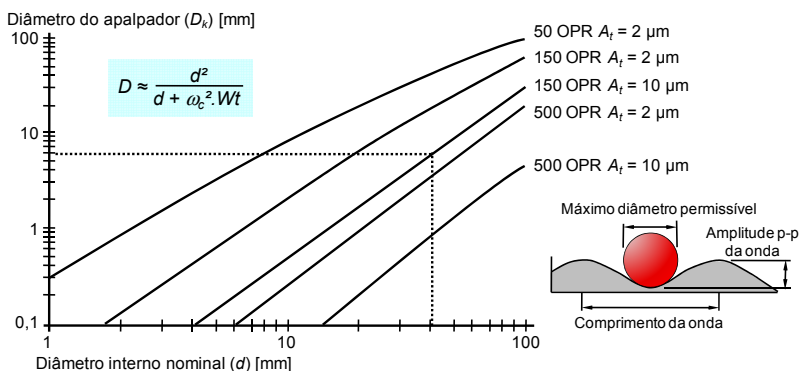


Figura 47 – Máximo diâmetro permissível do apalpador para aquisição de linhas circunferenciais internas. Fonte: Adaptada de [24].

Como o cálculo do parâmetro Wt requer uma análise prévia da superfície (executada com apalpador com o menor diâmetro possível), a diretriz VDI/VDE 2631-3 sugere que seja realizada uma primeira verificação utilizando o limite de especificação (desde que especificado pelo parâmetro $RONt$) no lugar do parâmetro Wt . Caso o valor do máximo diâmetro admissível não resulte crítico (e.g. consideravelmente maior que o apalpador que se pretende utilizar), a filtragem mecânica não deverá representar problemas para a medição. Caso o valor do máximo diâmetro admissível resulte próximo do diâmetro do apalpador que se pretende utilizar, uma análise prévia torna-se necessária.

³⁵ Símbolos representando os parâmetros alterados para manter harmonia com os utilizados ao longo deste trabalho.

³⁶ De acordo com a norma ISO 4287-1 [120], perfil obtido utilizando-se um filtro Gaussiano passa-faixa com comprimentos de corte λ_c e λ_f .

As especificações técnicas ISO/TS 12780-2 (e demais [77-80]) também orientam a seleção do máximo diâmetro permissível para o apalpador. Entretanto, os valores recomendados por essas especificações não consideram a amplitude do perfil de ondulação como fator de influência (somente a relação diâmetro nominal/raio do apalpador), e são bem mais conservativos do que os obtidos segundo a VDI/VDE 2631-3. A adoção dos valores sugeridos pelas especificações técnicas ISO se torna um problema para medição de forma em máquinas de medir por coordenadas, onde há necessidade de utilizar hastes com diâmetros relativamente altos para que a rigidez dos apalpadores seja adequada às tarefas de medição.

2.10.3 Divergência entre operadores funcionais e de especificação

De acordo com a especificação técnica ISO/TS 17450-2 [114], o *operador funcional* é o operador que apresenta perfeita correlação com a propriedade funcional³⁷ pretendida para a superfície (ou peça). Pode ser pensado, conceitualmente, como o conjunto de operações de especificação e/ou verificação que descrevem exatamente os requisitos funcionais da peça. Por exemplo, a especificação técnica cita como propriedade funcional a “*habilidade de um eixo rodar 2000 h em um mancal com vedação sem permitir vazamentos*”. Se a correlação entre o operador de especificação e o operador funcional fosse perfeita, um eixo em conformidade com a especificação iria rodar 2000 h sem permitir vazamentos, e um eixo fora de especificação, não. Contudo, o operador funcional é apenas um conceito idealizado, nem sempre sendo possível expressá-lo formalmente como um conjunto bem definido e ordenado de operações. A incerteza resultante das diferenças entre o operador funcional e os operadores de especificação é definida como *incerteza de correlação*.

A *incerteza total* é a combinação das incertezas de medição, de especificação e de correlação. Em última análise, é a diferença entre o operador funcional e o operador de verificação tal qual empregado na avaliação de uma determinada especificação.

2.10.4 Avaliação funcional das superfícies

A relação entre os operadores funcionais e de especificação sobre os resultados das avaliações geométricas de superfícies vem sendo

³⁷ Uma discussão sobre as propriedades funcionais de superfícies de engenharia pode ser encontrada em [27].

estudada por diversos pesquisadores [85,89,92,100,101,109,115-123]. A seguir serão apresentadas algumas considerações encontradas na literatura.

Filtragem funcional

Como mencionado anteriormente, o objetivo da filtragem digital é separar os componentes estruturais de uma superfície de modo a manter uma relação unívoca entre os parâmetros de avaliação da superfície e suas propriedades funcionais. Essa abordagem, algumas vezes denominada de *filtragem funcional*, procura separar os componentes estruturais das superfícies não somente pela ótica do controle dimensional (e.g. rugosidade, ondulação e forma), mas pelas suas propriedades funcionais [120].

Uma aplicação do conceito de filtragem funcional bastante citada na literatura é a filtragem de superfícies com propriedades funcionais estratificadas, que apresentam estruturas tipo reentrâncias, gerando uma distribuição assimétrica do perfil [93]. Um exemplo desse tipo de superfície (Figura 48) é encontrado nos cilindros de blocos de motor, os quais são obtidos por uma seqüência de operações de usinagem conhecida como *plateau honing* [122].

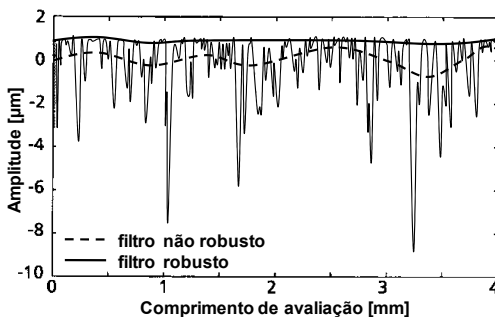


Figura 48 – Exemplo de um perfil extraído de um cilindro de motor fabricado pelo processo tipo *plateau honing*. Fonte: Adaptada de [100].

A seqüência de operações de fabricação é constituída por um brunimento realizado para se obter as reentrâncias necessárias à retenção de óleo lubrificante; seguido de um segundo brunimento (ou retificação) para produzir uma superfície de contato com bom acabamento e resistência ao desgaste adequada para servir de guia aos pistões. As reentrâncias presentes nesse tipo de perfil podem deslocar a linha média obtida por filtros lineares (conforme visto na subseção 2.7.2),

comprometendo a avaliação dos requisitos funcionais da superfície (e.g. capacidade de retenção de óleo, que depende da profundidade média dos vales com respeito à linha média).

Nesse exemplo, a não especificação de um filtro capaz de lidar com as estruturas do perfil (e.g. filtros robustos) provoca incerteza de especificação. A especificação de um filtro que não seja capaz de lidar com as estruturas (e.g. filtros lineares) provoca incerteza de correlação.

Ajustes matemáticos e parâmetros geométricos funcionais

Conforme apontado por [109], para superfícies onde o ajuste entre elementos é importante (e.g. montagem), o uso de ajustes e parâmetros geométricos por zona (e.g. círculo por mínima zona, parâmetro $RONt$) produz melhor correlação com as propriedades funcionais. De maneira similar, para superfícies móveis (e.g. deslizamento), onde são importantes aspectos como área de contato efetiva, espessura média de filme lubrificante, vibrações, etc., o uso de ajustes e parâmetros geométricos por média (e.g. círculo por mínimos quadrados, parâmetro $RONq$) produz melhor correlação com as propriedades funcionais.

Um exemplo do uso do conteúdo harmônico de perfis como parâmetro(s) geométrico(s) ocorre no caso de mancais de rolamento. Nesses mancais, caso a pista de rolamento externa apresente amplitude relevante na frequência igual ao (ou múltipla do) número de esferas do rolamento, vibrações excessivas podem ser geradas, provocando falha prematura do componente [124]. Para o controle dessa propriedade funcional da superfície, portanto, a avaliação deve ser realizada em componentes harmônicos individuais bem definidos.

2.11 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Este capítulo apresentou uma compilação do conhecimento em estado da arte sobre medições de forma por *scanning* em MMC. Uma avaliação do conteúdo permite perceber a complexidade envolvendo o planejamento de uma tarefa de medição de forma por *scanning*, desde a definição dos parâmetros de aquisição, para que os elementos extraídos que se afastem o mínimo possível da superfície real da peça, até a definição dos parâmetros de avaliação, para que os valores obtidos das avaliações geométricas correspondam à propriedade funcional sob investigação.

Por esse motivo, torna-se evidente a necessidade de um método sistematizado que torne possível um planejamento eficiente, uma avaliação consistente e uma melhoria eficaz dos processos de medição de forma por *scanning*, de modo que se possa extrair todo o potencial em termos de eficiência e exatidão que as modernas MMC equipadas com cabeçotes analógicos oferecem.

Cabe destacar que alguns aspectos relacionados ao pré-processamento dos perfis não se apresentam completamente resolvidos, oferecendo espaço para discussões e melhorias.

O capítulo seguinte apresenta uma proposta de solução para a avaliação e melhoria dos processos de medição forma por *scanning* em MMC, a qual inclui o uso de rotinas especiais de processamento para minimização de distorções causados durante a aquisição das superfícies.

3 AVALIAÇÃO E MELHORIA DOS PROCESSOS DE MEDIÇÃO DE FORMA POR *SCANNING* EM MMC

Este capítulo apresenta um conjunto de ferramentas estatísticas e de processamento e análise de sinais que podem ser utilizadas para avaliação do desempenho metrológico e para análise com fins de melhoria dos processos de medição de forma por *scanning* em MMC. Essas ferramentas foram implementadas de modo a compor um ambiente integrado de análise, desenvolvido com o objetivo de automatizar a avaliação do desempenho metrológico e de obter informações detalhadas sobre o comportamento desses processos. No estágio atual de desenvolvimento, o ambiente de análise é capaz de realizar avaliação de perfis circulares. O ambiente foi implementado utilizando a linguagem MATLAB [125].

Como entrada, o ambiente utiliza perfis integrais extraídos a partir de experimentos estruturados de acordo com o método de avaliação do desempenho metrológico desenvolvido neste trabalho. Como saída, o ambiente de análise fornece os indicadores de desempenho metrológico e um conjunto de gráficos gerados a partir de ferramentas de análise de sinais. O ambiente integrado de análise é composto de dois módulos (Figura 49), que podem ser também utilizados de modo independente.

O primeiro módulo realiza as seguintes funções:

- Importação e pré-referenciamento dos perfis integrais extraídos resultantes dos experimentos estruturados, fornecendo perfis pré-referenciados para análise;
- Operações de pré-processamento dos perfis extraídos para minimizar a influência de problemas na aquisição (e.g. presença de *outliers*), fornecendo perfis pré-processados para análise e avaliação geométrica;
- Operações de avaliação geométrica, fornecendo os resultados da avaliação de forma numérica e estruturada (de acordo com o método de avaliação específico), e também os perfis de circularidade (após filtragem e associação) para análise;
- Análises de cada perfil integral extraído utilizando técnicas de processamento de sinais (e.g. análise de Fourier), fornecendo os resultados de forma gráfica e numérica;

- Exportação dos perfis integrais resultantes de cada etapa de processamento a uma base de dados para análises adicionais (fora do escopo deste trabalho).

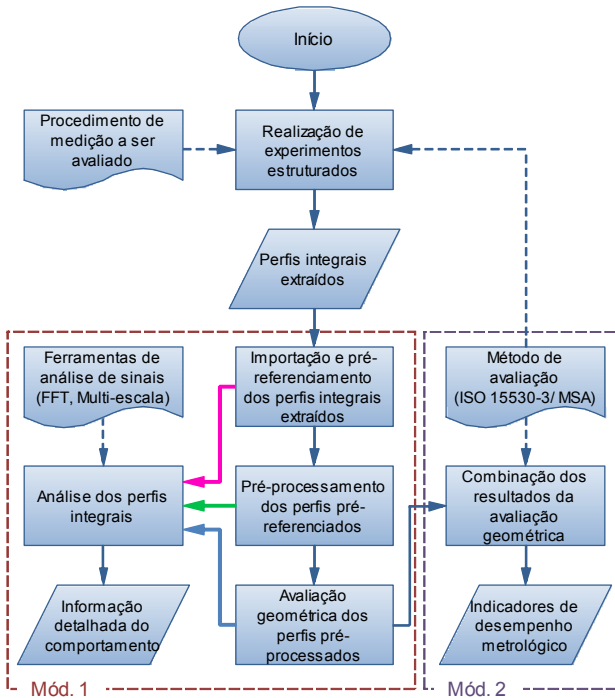


Figura 49 – Avaliação e análise do processo de medição utilizando o ambiente integrado de análise. Fonte: Autor.

O segundo módulo realiza as seguintes funções:

- Importação dos resultados estruturados fornecidos pelo primeiro módulo e dos dados de calibração dos perfis;
- Combinação dos resultados estruturados para obtenção dos parâmetros estatísticos e cálculo dos indicadores de desempenho metrológico, fornecendo resultados de forma gráfica e numérica.

A seção seguinte apresenta o método de avaliação experimental do desempenho metrológico utilizado pelo Módulo 2 do ambiente de análise. Na seqüência, são apresentadas as rotinas de processamento e as ferramentas de análise de perfis que constituem o Módulo 1.

3.1 MÉTODO PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO METROLÓGICO

Em medições por coordenadas, a incerteza de medição deve ser estimada para cada tarefa de medição específica [126]. Para tanto, além dos desvios das características metrológicas do sistema de medição, as interações que possam ocorrer entre as características do processo de medição e as características das peças geradas pelo processo de produção devem ser contempladas. Os métodos para avaliação da incerteza de medição de tarefas específicas de medições por coordenadas podem ser divididos em³⁸:

- Análise de sensibilidade: Avaliação da incerteza de medição de maneira analítica, de acordo com o GUM clássico [15]. Necessita de um modelo matemático bem definido, que relacione todas as grandezas que possam ter influência sobre o processo de medição, permitindo a avaliação da contribuição individual de cada uma a partir da derivação dos respectivos coeficientes de sensibilidade.
- Simulação computacional: Propagação das distribuições utilizando métodos numéricos, de acordo com o Suplemento 1 do GUM [16]. Necessita, do mesmo modo que o método do GUM clássico, de um modelo matemático que descreva o processo de medição. A diferença entre os métodos é que uma função distribuição de probabilidade é atribuída a cada grandeza, e a propagação de incertezas é realizada por simulações de Monte Carlo. A especificação técnica ISO/TS 15530-4 [127] define os requisitos para aplicação do método à avaliação da incerteza em medições por coordenadas e descreve técnicas de simulação que podem ser utilizadas com esse objetivo.
- Parecer de um especialista: Avaliação realizada com base na experiência prática e no conhecimento preestabelecido de um especialista qualificado. Nessa categoria podem-se incluir também sistemas especialistas que utilizam informações de históricos de medições armazenados em bases de dados [128].
- Método experimental: A incerteza de medição é estimada a partir de medições repetidas, sob condições usuais de operação, em

³⁸ Uma revisão recente e abrangente sobre os métodos para avaliação de incerteza em medições por coordenadas pode ser encontrada em [20].

artefatos ou peças que apresentem suficiente similaridade à peça de interesse. A especificação técnica ISO/TS 15530-3 [22] descreve o método experimental por substituição utilizando peças calibradas para avaliação da incerteza em medições por coordenadas.

Devido ao caráter dinâmico dos processos de medição por *scanning*, a definição de um modelo matemático que contemple todas as fontes de incertezas envolvidas pode não ser possível. Recentemente uma proposta para estimar a incerteza de medição na avaliação de especificações geométricas com MMC utilizando o método dos coeficientes de sensibilidade foi apresentada [20]. Contudo, o uso dos modelos geométricos propostos é condicionado a uma série de restrições (considera somente erros estruturais geométricos e apalpação no modo discreto), tornando o método não aplicável a medições de forma por *scanning*.

O método por simulações numéricas é mais amplamente reconhecido para avaliações de incerteza em medições por coordenadas. A confiabilidade das incertezas de medição fornecidas pelo método dependerão de quão abrangente é o modelo implementado, e de quão realista são as estimativas das funções distribuição de probabilidade fornecidas como entrada. Dada a quantidade de fenômenos que influenciam de forma significativa as medições de forma por *scanning*, ambos os requerimentos são difíceis de serem atendidos. De fato, nenhuma das soluções comerciais disponíveis atualmente (e.g. a MMC virtual [18] e o software autônomo PUNDIT/CMM [19]) é capaz de fornecer estimativas de incerteza para medições por *scanning*.

Com relação ao uso de sistemas especialistas utilizando histórico de medições [128], duas grandes barreiras podem ser mencionadas: o método depende de uma base de dados consistente, com número de casos grande o suficiente para contemplar toda a quantidade de variáveis envolvendo medições com MMC (o que se torna mais crítico em medições por *scanning*), e necessita estimativas de incerteza realistas associadas aos casos armazenados na base de dados.

Desse modo, considerando o estado da arte em avaliação de incerteza em medições por coordenadas, o método experimental desponta com a única alternativa plausível para avaliar a incerteza de medições de forma por *scanning* em MMC.

As seguintes subseções apresentam um método experimental baseado na especificação técnica ISO/TS 15530-3 [22], capaz de acessar as mais relevantes fontes de incerteza em medições por coordenadas de

forma estatística, a partir de um único procedimento. Fazendo uso da estruturação de dados empregada pelo método, indicadores de desempenho metrológico complementares à incerteza de medição podem ser estimados, os quais serão também descritos. Aplicações e limitações do método são discutidas.

3.1.1 Avaliação da incerteza de medição pelo método experimental

A especificação técnica ISO/TS 15530-3 orienta a avaliação da incerteza de medições por coordenadas pelo método experimental utilizando peças calibradas, o qual pode ser utilizado para estimar a incerteza na avaliação de especificações geométricas. Esse método apresenta uma abordagem simples do ponto de vista do usuário, considerando basicamente quatro componentes de incerteza, combinadas conforme a Equação 14.

$$U = k \cdot \sqrt{u_{cal}^2 + u_p^2 + u_w^2} + |b| \quad (\text{Equação 14})$$

O componente u_{cal} é a contribuição relativa ao procedimento de calibração das peças padrão, sendo obtido do certificado de calibração. O componente u_p é a contribuição relativa à variação devida ao erro de repetitividade da tarefa de medição específica. O componente u_w engloba a contribuição devida à combinação de efeitos relativos ao processo de medição e às variações inerentes do processo de fabricação. Finalmente, b é a tendência média estimada, a ser adicionada ao balanço de incerteza caso não seja corrigida.

As duas últimas componentes não são independentes entre si, e o modo de avaliar as mesmas (simultânea ou separadamente) em um modelo estatístico para estimativa da incerteza de medição por coordenadas é uma tarefa não completamente resolvida.

As interações entre o processo de medição e as variações do processo de produção provocam variação da tendência entre peças [129,131]. Apesar da especificação técnica ISO/TS 15530-3 reconhecer a importância dessa fonte de variação pela introdução da componente u_w , a mesma não apresenta uma proposta concreta (ferramentas estatísticas ou método específico) para avaliar quantitativamente a contribuição dessa fonte à incerteza de medição.

Outra questão relacionada à especificação técnica mencionada diz respeito à inclusão da tendência no balanço de incerteza. Essa prática não é recomendada, em primeira instância, pelo GUM. Entretanto, existem situações onde, por motivos técnicos ou operacionais, a

correção da tendência pode não ser factível. Como não há uma recomendação específica por parte do GUM para lidar com essas situações, distintas propostas para inclusão da tendência na incerteza de medição são encontradas na literatura [132-137].

A seguir será descrito um método que propõe o uso de múltiplas peças calibradas para avaliação da incerteza de medição em MMC [138,139], o qual permite estimar estatisticamente a contribuição de praticamente todas as fontes de incerteza atuando sobre um processo de medição por coordenadas. De acordo com o método, a influência da interação entre o processo de medição e as variações do processo de produção é estimada a partir da variação da tendência observada entre peças calibradas. Esse conceito não é especificamente novo [130,131], sendo de fato uma extensão de estudos estatísticos padronizados aplicados à análise de sistemas de medição [5]. Contudo, uma descrição criteriosa do modelo estatístico de suporte ao método, a avaliação da probabilidade de abrangência fornecida por este modelo, a aplicação do método a casos reais, e uma análise das interações que provocam a variação da tendência, não foram realizadas.

Um trabalho recentemente publicado [138] apresentou resultados de simulações por Monte Carlo realizadas para verificar a probabilidade de abrangência fornecida pelo modelo estatístico de suporte ao método utilizando múltiplas peças calibradas. Uma revisão sobre distintos modelos propostos na literatura para inclusão da tendência não corrigida ao balanço de incertezas foi também apresentada, e esses modelos foram comparados através das simulações. Outro trabalho [139] realizou uma revisão dos mecanismos que provocam interações entre os processos de medição por coordenadas e as variações do processo de fabricação. Ambos os trabalhos foram publicados durante o desenvolvimento desta dissertação.

Avaliação da incerteza de medição utilizando múltiplas peças calibradas

O método consiste em coletar um número p de peças da linha de produção, em calibrar as características de interesse, e em realizar n_p medições em cada peça com o mesmo procedimento de medição utilizado nas medições de avaliação da produção. A partir dos valores obtidos com os experimentos, uma estimativa de tendência (b_j) e uma estimativa de desvio padrão amostral ($s_{p,j}$) serão obtidas para cada peça. Essas estimativas são calculadas de acordo com a especificação técnica ISO/TS 15530-3. As demais equações que constituem o modelo estatístico de suporte ao método (Figura 50) constam no anexo F.2.4.5

do GUM [15] na forma contínua, e serão aqui apresentadas na forma discreta.

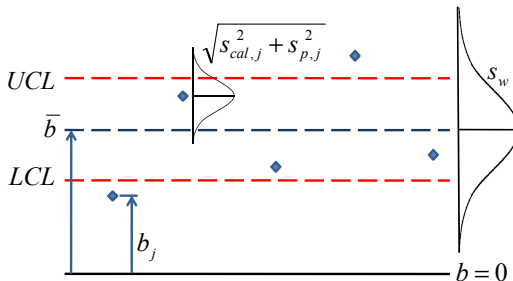


Figura 50 – Modelo estatístico utilizado para avaliação da incerteza de medição de acordo com o método utilizado. Fonte: [138].

A tendência média global (\bar{b}) do processo de medição é estimada pela média das tendências observadas através de cada peça (Equação 15). Essa equação é o caso discreto da Equação F.7a do GUM.

$$\bar{b} = \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p b_j \quad (\text{Equação 15})$$

A contribuição da repetitividade do processo de medição (u_p) é estimada pela raiz da média quadrática (RMS) dos desvios padrão amostrais observados através de cada peça, com ν_p graus de liberdade (Equação 16). Essa estimativa é a forma discreta da Equação F.7c do GUM. A raiz da média quadrática pode ser utilizada como estimativa global da repetitividade de processo de medição, desde que os desvios padrão individuais estejam sob controle estatístico (o mesmo vale para o processo de calibração das peças). O teste para verificação do controle estatístico pode ser realizado com auxílio de uma carta de desvio padrão com limites 3σ (ver subseção 3.1.2).

$$u_p = \hat{s}_p = \sqrt{\frac{1}{p} \sum_{j=1}^p (s_{p,j})^2} \quad ; \quad \nu_p = p(n_p - 1) \quad (\text{Equação 16})$$

A contribuição da variação da tendência observada entre peças (s_w) é estimada pelo desvio padrão amostral das tendências de cada peça, com ν_w graus de liberdade (Equação 17). Essa equação é a forma discreta da Equação F.7b do GUM.

Embora o GUM assuma uma distribuição retangular (uma vez que considera a amplitude dos erros obtidos na curva de calibração do

instrumento no exemplo citado), essa equação pode ser vista, de uma maneira mais genérica, como a expectativa do segundo momento das tendências de cada peça b_j em torno da tendência média \bar{b} . Deste modo, é justificável que o caso particular abordado pelo GUM possa ser generalizado para outras distribuições com forma conhecida.

$$s_w^2 = \frac{1}{p-1} \sum_{j=1}^p (b_j - \bar{b})^2 \quad ; \quad \nu_w = p-1 \quad (\text{Equação 17})$$

Como a variância amostral das tendências observada (s_w^2) está contaminada pela variância da média das medições de avaliação da incerteza (\hat{s}_p^2/n_p) e pela variância da média das medições da calibração (\hat{s}_{cal}^2/n_{cal}), sugere-se uma separação dessas variâncias³⁹ [140]. Depois de realizada essa separação, é obtida a componente u_w (Equação 18).

$$u_w = \begin{cases} \sqrt{s_w^2 - (\hat{s}_p^2/n_p + \hat{s}_{cal}^2/n_{cal})} & \text{se } s_w^2 > (\hat{s}_p^2/n_p + \hat{s}_{cal}^2/n_{cal}) \\ 0 & \text{se } s_w^2 \leq (\hat{s}_p^2/n_p + \hat{s}_{cal}^2/n_{cal}) \end{cases} \quad (\text{Equação 18})$$

O modelo utilizado para combinar a tendência média não corrigida às demais componentes, fornecendo a estimativa final da incerteza de medição, é o mesmo utilizado pela ISO/TS 15530-3 (Equação 19). De acordo com as simulações de Monte Carlo realizadas [138], esse modelo fornece probabilidades de abrangência médias mais estáveis do que os outros modelos avaliados, sempre acima de 95,45%.

$$U = k \cdot \sqrt{u_p^2 + u_w^2 + u_{cal}^2} + |\bar{b}| \quad (\text{Equação 19})$$

O coeficiente de abrangência (k) é calculado considerando-se uma distribuição t de Student com um número de graus de liberdade efetivo calculado de acordo com a equação de Welch-Satterthwaite [15].

O critério conhecido como a *regra de ouro de metrologia* ($U/Tol < 0,1$) pode ser adotado para aceitação do processo de medição com base na incerteza de medição. Contudo, esse critério não considera a aplicação para a qual o processo de medição será utilizado, a criticidade da tarefa de medição, nem tampouco a capacidade do processo de produção.

³⁹ Caso essa informação esteja disponível (e.g. no certificado de calibração). Caso não esteja, deve ser desconsiderada. Considera-se que as variâncias das medições da avaliação da incerteza e das medições da calibração não apresentam correlação expressiva.

Requisitos para o uso de método

Para a obtenção de uma estimativa confiável da incerteza de medição a partir do método utilizando múltiplas peças calibradas, alguns requisitos devem ser observados:

- O número de medições em cada peça (n_p) deve ser uma amostra representativa das variações possíveis dos erros da MMC;
- O processo de medição deve ser estável de acordo com a variação observada na amostragem;
- A repetitividade do processo de medição deve ser consistente entre peças;
- O número de peças calibradas (p) deve ser uma amostra representativa das variações possíveis do processo de produção;
- O padrão de variação do processo de produção deve ser consistente com a variação observada na amostragem;
- As operações de especificação não definidas e os operadores de verificação utilizados na calibração devem ser definidos o mais próximo possível dos operadores funcionais de modo a assegurar uma incerteza total aceitável para a aplicação.

Quando o último requisito é satisfeito, a incerteza do método provocada pelo uso de operadores de verificação simplificados é avaliada juntamente com a incerteza de implementação. Desse modo, a incerteza de medição é estimada de forma completa. Caso não seja satisfeito, algumas fontes de variação da tendência entre peças (e.g. a interação entre uma amostragem limitada e as variações do conteúdo harmônico entre peças) podem não ser devidamente consideradas.

De acordo com as simulações de Monte Carlo realizadas [138], todos os modelos avaliados apresentaram uma alta variação das probabilidades de abrangência nas situações em que um reduzido número de peças e de repetições por peça (graus de liberdade efetivos) foi utilizado para o cálculo dos intervalos de incerteza. Esse fato foi verificado principalmente no uso de um baixo número de peças com variação da tendência entre peças significativa, onde a probabilidade de abrangência resultou inferior a 50% em algumas das iterações.

Portanto, a amostragem de ambos o processos deve ser realizada de maneira sistemática, objetivando-se englobar o máximo das variações esperadas de cada processo. Como mínimo, deve-se utilizar 5 peças quando a variação da tendência for uma contribuição significativa, e um número total de 30 medições (e.g. 5 peças, 6 repetições por peça).

3.1.2 Indicadores adicionais de desempenho metrológico

Estimadores do desempenho metrológico adicionais podem ser obtidos a partir das medições realizadas com o método das múltiplas peças calibradas. Esses estimadores são baseados em ensaios estatísticos padronizados utilizados no contexto industrial, descritos em manuais como o MSA [5].

Análise das fontes de variação do processo de medição

Essa análise baseia-se em uma modificação do estudo de $R\&R$ de um sistema de medição conforme o MSA [5]. Os estatísticos de dispersão, que no MSA são estimadas através da amplitude, podem ser estimadas pelo desvio padrão. Os índices dos estatísticos serão mantidos de acordo com a especificação técnica ISO 15530-3 (apresentados na subseção anterior).

A contribuição da repetitividade do processo de medição à variação total (R_p , VE no MSA) é estimada pela média aritmética dos desvios padrão amostrais observados através de cada peça, corrigidos pelo coeficiente c_4 (Equação 20). O coeficiente c_4 pode ser obtido de tabelas estatísticas [141], e depende do número de repetições por peça.

$$VE \equiv R_p = \frac{\bar{s}_p}{c_4(n_p)} = \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p s_{p,j} \quad (\text{Equação 20})$$

A contribuição da variação da tendência entre peças à variação total (R_w) não é considerada como fonte de variação do processo de medição pelo MSA⁴⁰. Contudo, o MSA considera que variações podem ser encontradas caso uma mesma peça seja medida em locais distintos (denominada *within part variation*, devido aos desvios de forma dos elementos), e procura excluir essa fonte do estudo de $R\&R$.

Com o método utilizando múltiplas peças calibradas é possível estimar a contribuição da variação da tendência entre peças, pois existem valores de referência. Seu valor pode ser estimado pelo desvio padrão amostral das tendências entre peças (s_w), conforme Equação 17, corrigido pelo coeficiente c_4 (com tamanho do subgrupo igual ao

⁴⁰ De fato, dependendo do modo como o estudo é conduzido, essa fonte de variação pode ser introduzida na estimativa da variação observada do processo de produção (VP no MSA), fazendo com que a capacidade do processo de medição estimada através dos dados seja aumentada quando deveria ser diminuída.

número de peças utilizadas no experimento) e pela separação das variâncias das médias⁴¹, de acordo com a Equação 21.

$$R_w = \begin{cases} \sqrt{\frac{s_w^2}{c_4(p)} - \left(\frac{R_p^2}{n_p} + \frac{R_{cal}^2}{n_{cal}}\right)} & \text{se } \frac{s_w^2}{c_4(p)} > \left(\frac{R_p^2}{n_p} + \frac{R_{cal}^2}{n_{cal}}\right) \\ 0 & \text{se } \frac{s_w^2}{c_4(p)} \leq \left(\frac{R_p^2}{n_p} + \frac{R_{cal}^2}{n_{cal}}\right) \end{cases} \quad (\text{Equação 21})$$

A contribuição da variação do processo de produção à variação total (R_m , VP no MSA) pode ser estimada pelo desvio padrão dos valores médios obtidos na calibração (s_m , Equação 22), corrigido pelo coeficiente c_4 (com tamanho do subgrupo igual ao número de peças) e pela separação das variâncias⁴¹ (Equação 23). O MSA recomenda ainda que seja importada de um estudo de capacidade, caso disponível.

$$s_m^2 = \frac{1}{p-1} \sum_{j=1}^p (x_{cal,j} - \bar{x}_{cal,j})^2 \quad (\text{Equação 22})$$

$$VP \cong R_m = \begin{cases} \sqrt{\frac{s_m^2}{c_4(p)} - \frac{R_{cal}^2}{n_{cal}}} & \text{se } \frac{s_m^2}{c_4(p)} > \frac{R_{cal}^2}{n_{cal}} \\ 0 & \text{se } \frac{s_m^2}{c_4(p)} \leq \frac{R_{cal}^2}{n_{cal}} \end{cases} \quad (\text{Equação 23})$$

No MSA, a contribuição da variação combinada do processo de medição à variação total ($R\&R$) é obtida pela combinação das componentes de repetitividade (VE) e reprodutibilidade (VA). No modelo aqui apresentado, a componente de reprodutibilidade não foi considerada⁴². Dessa forma, de acordo com o modelo aqui apresentado,

⁴¹ A variância da média do processo de calibração (R_{cal}^2/n_{cal}), embora não contribua diretamente à variação do processo de medição, influencia as estimativas da variação da tendência entre peças e da variação do processo de produção. Se a informação estiver disponível, pode-se separar sua contribuição de ambas as estimativas.

⁴² No MSA, a reprodutibilidade geralmente é atribuída à influência do operador. Devido à maioria das MMC que permitem realizar medições de forma por *scanning* utilizarem comando numérico, essa contribuição não foi considerada. Contudo, erros de reprodutibilidade podem ocorrer mesmo em uma MMC comandada numericamente. Por exemplo, medições realizadas em diferentes locais dentro do volume de medição da MMC podem apresentar diferentes erros sistemáticos (e mesmo aleatórios). A ISO/TS 15530-3 sugere incluir esse erro de reprodutibilidade específico (caso faça parte do procedimento de medição) na componente u_p , medindo as peças calibradas em diferentes posições no volume da MMC.

a contribuição da variação combinada processo de medição (R_c) é estimada de acordo com a Equação 24.

$$R_c = \sqrt{R_p^2 + R_w^2} \quad (\text{Equação 24})$$

A variação total presente nos dados utilizados para avaliação do processo de produção é resultado da combinação das contribuições do processo de produção e do processo de medição. A estimativa da variação total (R_t , VT no MSA) é calculada com a Equação 25.

$$R_t = \sqrt{R_m^2 + R_c^2} \quad (\text{Equação 25})$$

O estudo de $R\&R$ do MSA apresenta critérios de aceitação bem definidos, com base na aplicação do processo de medição e na criticidade da tarefa de medição. A contribuição percentual da variação combinada do processo de medição à variação total ($\%R_c/R_t$) é um indicador do desempenho metrológico que verifica a aptidão do processo de medição para realização do controle estatístico e avaliação da capacidade do processo de produção. A relação entre a variação combinada do processo de medição e o intervalo de especificação dividido por seis ($\%6R_c/Tol$) é um indicador do desempenho que verifica a aptidão do processo de medição para realização da avaliação da conformidade do produto. Para ambos os casos, a relação deve resultar inferior a 10%. Caso as especificações não sejam críticas (ou o custo para implementação de melhorias no processo de medição se torne proibitivo), uma relação de até 30% para ambos indicadores pode ser aceita.

Cartas de controle das tendências e desvios padrão

O uso de cartas de controle como complemento à avaliação da incerteza de medição de processos de medição por coordenadas foi apresentada em [130,131]. Para verificação da consistência da repetitividade entre peças, uma carta de controle de desvios padrão com limites 3σ pode ser utilizada. Se os desvios padrão observados estiverem sob controle estatístico, a média dos desvios padrão pode ser utilizada como estimador da repetitividade do processo de medição. Os limites de controle superior e inferior da carta de desvios padrão do processo de medição são calculados de acordo com a Equação 26.

Para verificação da significância estatística da interação observada entre o processo de medição e as variações do processo de

produção, pode-se utilizar uma carta de controle das tendências com limites 3σ . Os limites de controle superior e inferior para o gráfico das tendências são determinados pela repetitividade combinada das medições da calibração e das medições de avaliação do desempenho metrológico, de acordo com a Equação 27.

$$CL_{\bar{s}_p} = \bar{s}_p \pm 3R_p \cdot \sqrt{1 - c_4^2(n_p)} \quad (\text{Equação 26})$$

$$CL_{\bar{b}} = \bar{b} \pm 3 \cdot \sqrt{\frac{R_p^2}{n_p} + \frac{R_{cal}^2}{n_{cal}}} \quad (\text{Equação 27})$$

A Figura 51 apresenta um exemplo das duas cartas de controle, construídas a partir de medições reais, onde se pode observar consistência nos desvios padrão entre peças, e variação significativa entre tendências, esta última indicando interação entre o processo de medição e as variações do processo de produção.

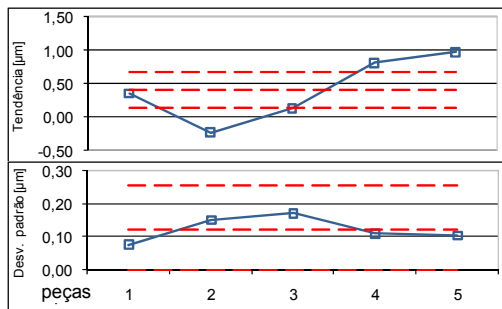


Figura 51 – Gráficos de controle das tendências (acima) e dos desvios padrão das medições (abaixo), obtido a partir de medições de cilindricidade em superfícies de cinco peças calibradas. Fonte: Autor.

Avaliação da estabilidade

De acordo com o MSA, para que um processo de medição demonstre estabilidade, os erros sistemáticos devem permanecer sob controle estatístico ao longo do tempo. Portanto, a estabilidade do processo de medição é requisito para a validade de longo prazo de todos os indicadores de desempenho metrológico descritos anteriormente. A avaliação da estabilidade é normalmente feita através do uso de cartas de controle com limites 3σ [5-8].

A especificação técnica ISO/TS 15530-3 recomenda a medição de uma peça calibrada periodicamente, na forma de uma verificação rápida (*interim check*). De acordo com a especificação técnica, o valor da tendência encontrada em cada medição periódica deve permanecer dentro do intervalo de incerteza estimado. Esse conceito difere do conceito de estabilidade, pois uma redução no valor absoluto da tendência não irá indicar uma situação fora de controle.

3.1.3 Considerações sobre o método

Do ponto de vista da aplicação industrial, o método experimental utilizando múltiplas peças calibradas apresenta algumas limitações. A primeira delas refere-se à viabilidade de calibrar as peças com incertezas conhecidas e baixas o suficiente. Dependendo do tipo de especificação de forma e das características das peças, a calibração pode requerer o uso de uma MMC. Nesse caso, existe a possibilidade de a incerteza relativa à calibração ser da mesma ordem de grandeza da incerteza atribuível ao processo de medição sob avaliação. Entretanto, nos casos onde as peças permitam, a calibração pode ser realizada em equipamentos dedicados, de alta exatidão (e.g. máquinas de medir forma), a custos relativamente baixos. A segunda limitação diz respeito à necessidade de se utilizar cinco ou mais peças calibradas, que devem ser ainda transportadas, catalogadas, armazenadas, etc.

Uma terceira limitação se refere à execução do experimento na própria MMC sob avaliação. Estes equipamentos estão, em geral, dedicados à avaliação da produção e pode ser difícil dispor do tempo necessário para medir as peças calibradas repetidas vezes. Essa questão reforça a importância de um planejamento sistematizado, orientado por um conjunto de recomendações que levem a um processo de medição adequado com o mínimo uso do equipamento de medição com fins de validação dos processos de medição.

Por outro lado, esse método de cunho puramente experimental é bastante direto e simples. Não estando presentes incertezas relativas ao método de avaliação (à exceção da incerteza de calibração dos artefatos) e nem de estimativas do tipo “parecer de um especialista”, fornece estimativas consistentes e realistas da incerteza. Se o experimento é executado de forma tal a abarcar a diversidade de condições em que são medidas as peças de produção, a incerteza estimada poderá ser usada para assegurar a rastreabilidade de medições futuras, sempre que tais condições se mantenham sob controle estatístico.

Assim, o método experimental pode encontrar aplicação em caso de características críticas, com intervalos de tolerância estreitos, onde os custos de falha interna e externa podem superar amplamente os custos de execução do experimento. Além disso, pode ser considerado um método de referência em estudos de caráter acadêmico-científico em medição por coordenadas.

3.2 ROTINAS DE PROCESSAMENTO E AVALIAÇÃO GEOMÉTRICA DE PERFIS INTEGRAIS

Nesta seção são apresentadas as rotinas de processamento e avaliação geométrica que constituem o núcleo do ambiente de análise. A ordem de execução das operações é a mesma descrita na Figura 5.

Durante o desenvolvimento do trabalho, algumas rotinas de processamento foram propostas e avaliadas do ponto de vista da minimização das perturbações provocadas no processo de aquisição. Estas rotinas são descritas ao longo desta seção. A execução de cada uma dessas rotinas é opcional, e uma análise do efeito das mesmas sobre o perfil extraído pode ser realizada com o auxílio dos gráficos implementados.

Além disso, um conjunto de rotinas de filtragem em estado da arte foi implementado. Infelizmente, não existem atualmente dados de referência disponíveis para validação dos algoritmos (com exceção do filtro Gaussiano linear).

No ambiente de análise, todas as transformações de domínio são realizadas com a função FFT (transformada rápida de Fourier) integrada ao MATLAB, implementada conforme [142].

3.2.1 Importação e pré-referenciamento dos perfis extraídos

O ambiente de análise foi desenvolvido para trabalhar diretamente com a linha circunferencial extraída (nuvem de pontos) gerada pelo processo de aquisição. Diferentes softwares de medição utilizam diferentes formatos de exportação de pontos, e por esse motivo foi criada uma rotina de importação dos pontos, que solicita como argumentos o endereço dos arquivos contendo os perfis extraídos e o software de medição com o qual o perfil foi obtido.

Nessa rotina é também realizado um ajuste inicial (pré-referenciamento) dos pontos, de acordo com a seguinte seqüência:

- Eliminação dos pontos pertencentes ao pré e pós cursos (*overlapping*);
- Translação da origem do sistema de coordenadas utilizado na aquisição do perfil para o elemento de referência calculado pelo método dos mínimos quadrados;
- Realocação dos pontos para que o vetor inicie sempre com o ponto de menor coordenada angular positiva.

A segunda operação é realizada para reduzir a influência da excentricidade da aquisição sobre as operações posteriores (sobretudo a interpolação dos pontos e a filtragem digital). O cálculo do elemento de referência é realizado a partir de uma cópia temporária do perfil, a qual é submetida previamente a uma eliminação de *outliers*. A realocação dos pontos é realizada para facilitar a comparação entre perfis no domínio do espaço (e.g. perfis calibrados e perfis medidos na MMC sob investigação).

3.2.2 Tratamento de *outliers*

Para reconhecimento e eliminação dos *outliers* gerados durante o processo de aquisição (ou mesmo as estruturas de superfícies com propriedades funcionais estratificadas), foi implementada uma função que utiliza o método da análise estatística do perfil particionado, com a partição podendo ser realizada por três métodos de filtragem multi-escala distintos. Essa função solicita como argumentos o método de partição e o lado em que será realizada a eliminação (podendo ser em ambos, com exceção do método por operações morfológicas). Detalhes da implementação do método da análise estatística do perfil particionado encontram-se no Apêndice A.

As técnicas de filtragem multi-escala implementadas para realizar a partição do perfil foram:

- Funções *wavelet* (*spline wavelets*), de acordo com a especificação técnica ISO/TS 16610-29 [107];
- Operações morfológicas alternadas (*scale-space techniques*), de acordo com a especificação técnica ISO/TS 16610-49 [108];
- Bancos de filtros passa-faixa com característica de transmissão tipo degrau (ver subseção 3.2.5).

A partição utilizando filtro com característica de transmissão tipo degrau é uma proposta desenvolvida no presente trabalho. O filtro tipo degrau satisfaz um dos principais requisitos para a partição de um perfil: possuir característica de transmissão íngreme o suficiente para evitar distribuição das frequências entre faixas adjacentes.

Uma avaliação comparativa do desempenho do método da análise estatística do perfil particionado com cada um dos três filtros multi-escala (e também de dois filtros robustos) foi realizada, utilizando dados experimentais adquiridos por *scanning* com MMC de empresas fornecedoras do segmento automotivo [144]. Uma amostra dos resultados pode ser vista na Figura 52.

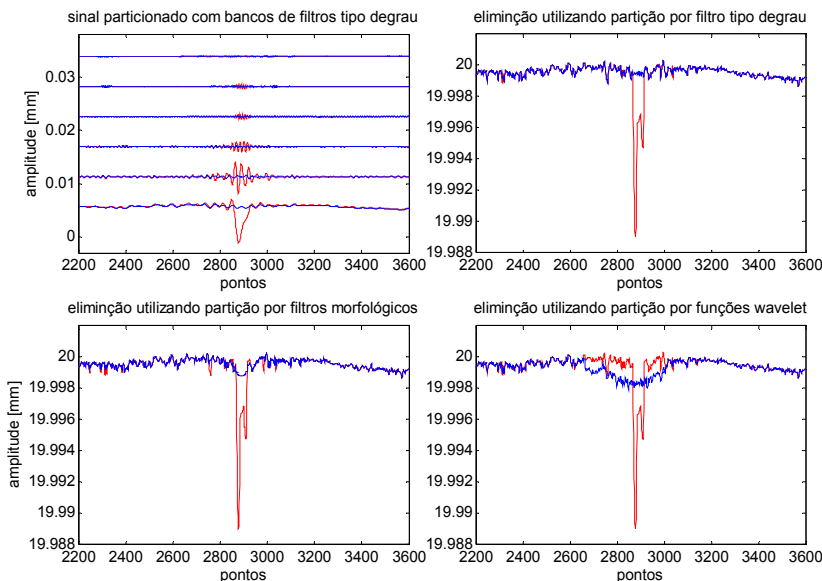


Figura 52 – Resultados da eliminação de *outliers* pelo método da análise estatística do perfil particionado, com partição por três métodos: filtro tipo degrau (acima), morfológico (abaixo e à esquerda) e *wavelet* (abaixo e à esquerda). Perfis antes (vermelho) e após (azul) a eliminação. Fonte: Autor.

De modo geral, o método multi-escala com filtro tipo degrau apresentou resultados satisfatórios para os tipos de *outliers* encontrados nos dados, sendo o melhor método para *outliers* com relação largura/altura elevadas. Os métodos multi-escala com filtro morfológico e por funções *wavelet* apresentaram comportamentos notadamente distintos frente aos diferentes tipos de *outliers* gerados nas medições.

Portanto, o método multi-escala com filtro tipo degrau pode ser considerado como método preferencial nos casos em que não há um padrão definido de *outlier* sendo gerado pelo processo de medição. Além disso, o método multi-escala com filtro tipo degrau tal como implementado (ver Apêndice A) possibilita o uso sem que nenhum parâmetro precise ser definido pelo avaliador, o que representa uma vantagem sobre os demais métodos (principalmente os métodos convencionais). Os resultados completos desse estudo podem ser encontrados em [144].

3.2.3 Interpolação dos pontos

Para minimizar a influência do espaçamento não uniforme típico de medições por *scanning* a altas taxas de aquisição, foi implementada uma função de interpolação dos pontos a partir de um espaçamento nominal uniforme. A função utiliza a rotina de interpolação interna do MATLAB (*interp1*), a qual permite realizar interpolação por vários métodos. A função solicita como argumento o método de interpolação e o método de criação do espaçamento nominal.

Devido a pouca informação encontrada na literatura sobre o espaçamento não uniforme dos pontos em aquisições por *scanning* com MMC, e à ausência de uma solução efetiva para essa questão, foi realizado um estudo utilizando simulações numéricas e medições em um padrão de múltiplas ondas. O estudo buscou avaliar a reconstrução de perfis irregularmente espaçados a partir de quatro métodos de interpolação. Os métodos avaliados estão listados abaixo.

- Vizinho mais próximo (*nearest neighbour*) – Mais simples dos métodos, no qual os pontos sobre o espaçamento nominal adotam a amplitude do vizinho mais próximo.
- Linear – O valor da amplitude atribuído ao ponto sobre o espaçamento nominal se encontra na interseção com linha definida pelos dois vizinhos mais próximos.
- *Splines* cúbicos (*cubic splines*) – Entre cada dois pontos adjacentes é traçado um polinômio de terceiro grau. A primeira e a segunda derivada nos extremos de cada curva adjacente são iguais, resultando em uma segunda derivada contínua [145].
- *Splines* cúbicos hermitianos (*hermit cubic splines*) – Similar ao método anterior, mas com a segunda derivada descontínua, tornando o método menos susceptível à presença de *outliers* e preservando a monotonicidade dos dados [146].

A partir dos resultados obtidos com as simulações realizadas, conclusões relevantes puderam ser obtidas. A relação entre o número de pontos amostrados com as frequências presentes no perfil é extremamente importante no desempenho de qualquer método de interpolação. Quanto maior o número de pontos por onda, melhor o resultado da interpolação. Portanto, mesmo que o aumento da taxa de aquisição deteriore a homogeneidade do espaçamento entre pontos, os resultados obtidos com interpolação para um maior número de pontos, dada uma mesma frequência de interesse, serão melhores.

Entre os métodos avaliados, a interpolação por *splines* cúbicos é a que necessita a menor relação número de pontos/máxima frequência de interesse para obtenção de bons resultados. A Figura 53 mostra o conteúdo harmônico de um perfil simulado com espaçamento angular não uniforme (sem ruído), e posteriormente interpolado por *splines* cúbicos. Pode-se notar que, após a interpolação, os efeitos sobre o conteúdo harmônico são praticamente eliminados (o que se verificou também para sinais simulados com ruído). Os resultados completos desse estudo podem ser encontrados em [84].

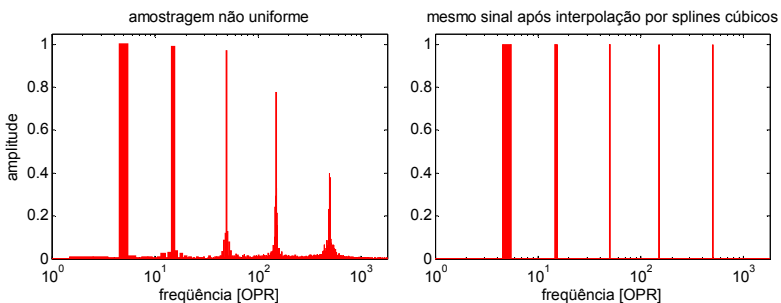


Figura 53 – Conteúdo harmônico de um sinal estruturado simulado (360.000 pontos) contendo cinco componentes de frequência (5, 15, 50, 150 & 500 OPR, amplitudes unitárias), extraído com amostragem não uniforme (3600 pontos, à esquerda), e interpolado por *splines* cúbicos (à direita). Fonte: [84].

Considerações sobre o uso de interpolação

Com relação à criação do espaçamento nominal, existem duas questões importantes a serem consideradas: a excentricidade com a qual o perfil é extraído, e a orientação angular com relação ao espaçamento do perfil extraído. Quando o perfil extraído apresenta excentricidade, os pontos apresentam uma não-uniformidade monotônica no espaçamento, a qual não tem relação com a taxa de aquisição. Antes da criação do

espaçamento nominal, portanto, o perfil deve ser pré-referenciado, de modo que a interpolação corrija também este efeito. No ambiente de análise, o pré-referenciamento por mínimos quadrados é realizado logo após a importação da nuvem de pontos.

Na função de interpolação implementada, a criação do espaçamento nominal pode ser feita de duas maneiras:

- Minimizando a diferença quadrática entre os espaçamentos nominal e real (melhores resultados para perfis individuais);
- Primeiro ponto assume coordenada angular igual a zero (melhores resultados para comparação entre perfis).

3.2.4 Correção do raio do apalpador

Para corrigir o efeito da dilatação mecânica provocada pela distância entre o centro do apalpador e a superfície sendo medida, uma função de correção do raio do apalpador utilizando operações morfológicas primárias foi implementada. A função solicita como argumento o diâmetro da esfera do apalpador utilizado na aquisição.

Essa técnica foi testada na medição de um perfil circular externo de um padrão de múltiplas ondas⁴³ [82]. A Figura 54 (à esquerda) mostra o conteúdo harmônico do perfil bruto, onde se pode observar frequências espúrias próximas a 500 OPR. A Figura 54 (à direita) mostra o conteúdo harmônico do mesmo perfil após a reconstrução utilizando a operação de erosão, onde se verifica a correção das frequências espúrias. A tendência encontrada no desvio de circularidade entre o perfil bruto e o perfil reconstruído (referência) foi de 0,2 μm .

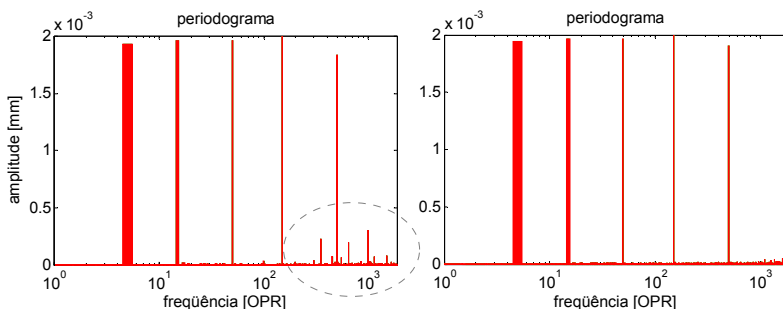


Figura 54 – Conteúdo harmônico de um perfil circular externo de um padrão de múltiplas ondas extraído com apalpador de 5 mm de diâmetro (à esquerda) e reconstruído por erosão (à direita). Fonte: [82].

⁴³ Mesmo padrão da Figura 8.

3.2.5 Filtragem digital

Para realização da operação de filtragem utilizando os distintos métodos publicados pela família ISO 16610-1 foi implementada uma função de filtragem. A função solicita como argumentos o método de filtragem e os parâmetros associados ao método (frequência de corte para todos os métodos, menos para os filtros morfológicos e para o filtro com característica de transmissão tipo degrau). Os métodos implementados serão brevemente descritos a seguir. Uma comparação entre esses métodos, utilizando os mesmos algoritmos implementados no ambiente de análise, foi realizada em [82].

Filtro Gaussiano linear

O filtro Gaussiano linear foi implementado diretamente no domínio da frequência, utilizando a equação da característica de transmissão do filtro Gaussiano linear para perfis de circularidade (Equação 13). A validação da implementação do algoritmo foi realizada com um software de referência [143] (resultados na subseção 3.2.6).

Filtro *spline* linear

O filtro *spline* linear foi implementado de acordo com a especificação técnica ISO/TS 16610-22 [98], através do uso de equações matriciais de filtragem. A implementação foi feita utilizando ambas as matrizes para perfis periódicos e não-periódicos, com o parâmetro de tensão dos splines (β) igual a zero. A Figura 55 mostra um perfil circular aberto filtrado com os filtros Gaussiano linear e *spline* linear.

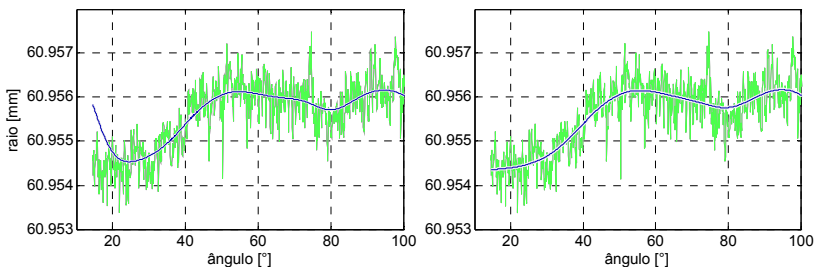


Figura 55 – Perfil aberto filtrado com filtro Gaussiano linear (à esquerda) e com filtro *spline* linear (à direita), com frequência de corte de 15 OPR. Perfis antes (em verde) e após (em azul) a filtragem. Fonte: Autor.

Filtros robustos

No ambiente de análise foram implementados os dois filtros robustos que fazem parte da família de especificações técnicas ISO/TS 16610, sendo:

- O filtro Gaussiano regressivo robusto, de acordo com o projeto de especificação técnica ISO/PRF TS 16610-31 [102];
- O filtro *spline* robusto, de acordo com a especificação técnica ISO/TS 16610-32 [104].

Esses filtros foram inicialmente desenvolvidos para permitir a avaliação de superfícies com propriedades funcionais estratificadas sem que ocorram distorções indesejadas na linha média. Entretanto, uma avaliação da sensibilidade desses métodos para lidar à presença de *outliers* gerados no processo de aquisição, que apresentam características bastante distintas das estruturas encontradas nas superfícies, não foi encontrada na literatura. O mesmo estudo descrito na subseção 3.2.2 buscou avaliar os filtros robustos nesse aspecto [144].

De modo geral, os filtros robustos não obtiveram um bom desempenho para os *outliers* encontrados nos experimentos. O filtro Gaussiano robusto apresentou um comportamento variável de acordo com o tipo de *outlier* gerado na aquisição do perfil. O filtro *spline* robusto apresentou resultados bastante abaixo da expectativa. A Figura 56 mostra o resultado da filtragem de um perfil contendo um *outlier* (mesmo perfil da Figura 52) utilizando os dois filtros robustos.

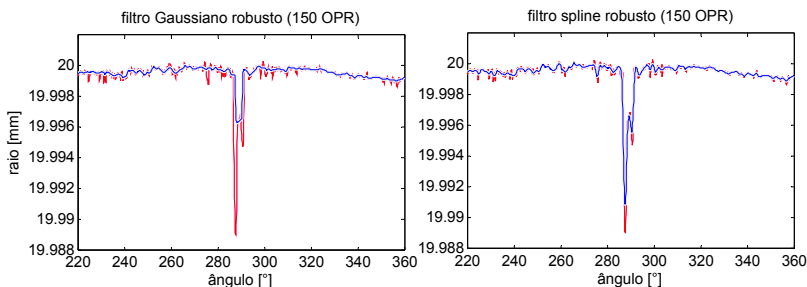


Figura 56 – Resultados da filtragem de um perfil contendo um *outlier* utilizando filtro Gaussiano robusto (à esquerda) e filtro *spline* robusto (à direita), com perfis antes (em vermelho) e após (em azul) a filtragem (frequência de corte de 150 OPR). Fonte: Autor.

O fato de os filtros robustos não terem apresentado resultados satisfatórios para eliminação de *outliers* gerados na medição não

significa que o desempenho dos mesmos não seja consistente para avaliação de superfícies com propriedades estratificadas. Contudo, uma questão relevante levantada no estudo é a dependência do desempenho dos filtros robustos de acordo com a frequência de corte dos filtros. Os resultados completos desse estudo podem ser encontrados em [144].

Filtro morfológico

O conjunto de operações morfológicas foi implementado conforme a especificação técnica ISO/TS 16610-41 [106]. Os argumentos que devem ser fornecidos à função de filtragem para o uso do filtro morfológico são o diâmetro do elemento estruturante e a seqüência de operações morfológicas a serem executadas. As seguintes seqüências de operações foram implementadas:

- Dilatação ou erosão;
- Fechamento ou abertura;
- Fechamento-abertura ou abertura-fechamento;
- Média entre fechamento-abertura e abertura-fechamento (de acordo com [147]).

A Figura 57 mostra o detalhe do perfil de um padrão de múltiplas ondas⁴⁴ após a operação de fechamento.

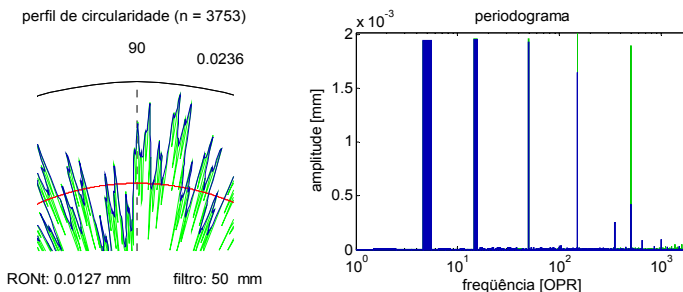


Figura 57 – Detalhe do perfil circular externo de um padrão de múltiplas ondas (e respectivo periodograma) antes (em verde) e após (em azul) operação de fechamento (elemento estruturante com 50 mm). Fonte: Autor.

Filtro com característica de transmissão tipo degrau

O filtro com característica de transmissão tipo degrau (*brick-wall*) não é um filtro normalizado. Foi implementado apenas para análise do

⁴⁴ Mesmo padrão da Figura 8.

processo de medição (e para partição do perfil na eliminação de *outliers*), não sendo utilizado para a avaliação geométrica dos perfis. A implementação do mesmo é feita no domínio da frequência de forma simples e direta, como segue:

- O conteúdo harmônico do perfil é obtido pela transformada rápida de Fourier (FFT);
- Os valores reais e imaginários dos componentes harmônicos que não pertencem conjunto de frequências selecionadas pelo avaliador são multiplicados por zero;
- O perfil no domínio do espaço é obtido pela transformação inversa de Fourier (IFFT) do conteúdo harmônico selecionado.

O argumento que deve ser fornecido à função de filtragem para o uso do filtro tipo degrau pode ser:

- Um valor de frequência (nesse caso o filtro se comporta como um passa-baixas com frequência de corte igual à frequência informada);
- Um intervalo (ou conjunto de intervalos) frequências a serem mantidas no perfil (nesse caso o filtro se comporta como um banco de passa-faixas);
- Valores de frequências individuais a serem mantidas no perfil (nesse caso o filtro funciona como um seletor de frequências).

A Figura 58 mostra um exemplo da seleção de duas componentes do perfil de um padrão de múltiplas ondas⁴⁵.

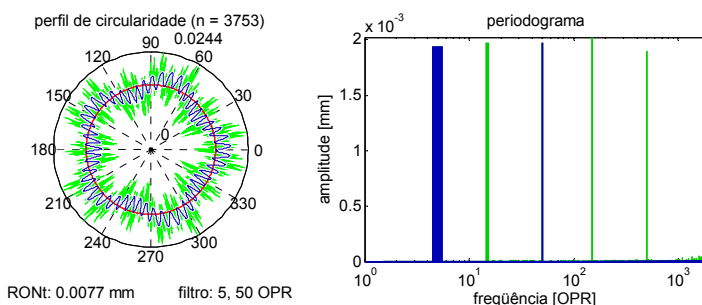


Figura 58 – Perfil circular externo de um padrão de múltiplas ondas antes (em verde) e após (em azul) o uso do filtro tipo degrau como seletor de frequências (frequências selecionadas: 5 e 50 OPR). Fonte: Autor.

⁴⁵ Mesmo padrão da Figura 8.

Uma limitação do filtro tipo degrau é que o mesmo só pode ser implementado no domínio da frequência para perfis fechados. A função peso de um filtro com característica de transmissão tipo degrau como passa-baixas é a função sinc = $\text{sen}(x)/x$, com comprimento teoricamente infinito. Uma aproximação do filtro tipo degrau como passa-baixas para perfis abertos pode ser obtida por convolução no domínio de espaço, após um janelamento da função peso para reduzir os efeitos do truncamento nos extremos [148]. A Figura 59 mostra a função peso e a característica de transmissão de um filtro tipo degrau passa-baixas.

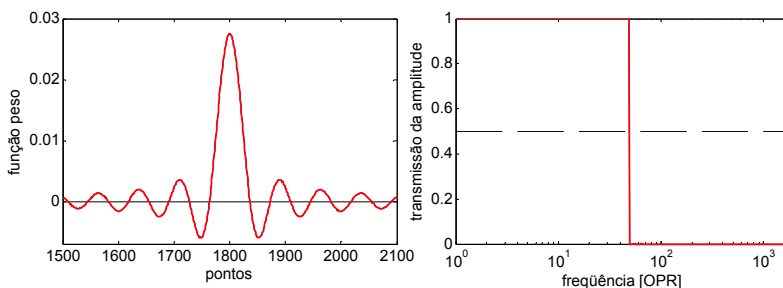


Figura 59 – Detalhe da função peso (à esquerda) e a característica de transmissão (à direita) de um filtro tipo degrau passa-baixas, com frequência de corte de 50 OPR. Fonte: Autor.

3.2.6 Cálculo do elemento de referência e parâmetros geométricos

Para o cálculo do círculo de referência foram implementados algoritmos de ajuste matemático pelo método por mínimos quadrados e pelo método por mínima zona. Uma função com os dois métodos foi criada, a qual solicita como argumento o método a ser utilizado.

O círculo por mínimos quadrados foi implementado pelo método de Gauss-Newton, que apresenta rápida convergência, especialmente se boas estimativas iniciais são definidas [25]. Como estimativa inicial, foi utilizada a média das coordenadas dos pontos em cada direção ortogonal. O critério de convergência do algoritmo foi estipulado como 10^{-10} mm. O círculo por mínima zona foi implementado pelo método da substituição (*exchange method*), pela simplicidade, eficiência (no caso de círculos) e exatidão do ajuste [25].

As Figura 60 e Figura 61 mostram uma comparação entre os resultados obtidos utilizando os algoritmos implementados (ajustes matemáticos e filtragem pelo método Gaussiano linear) e os resultados obtidos com um software de referência [143], para um mesmo perfil.

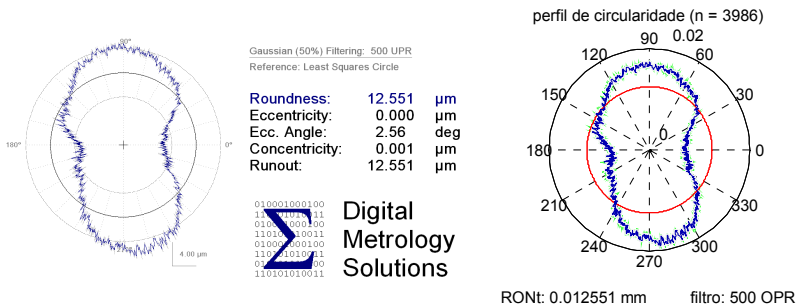


Figura 60 – Resultados para filtragem pelo filtro Gaussiano linear 50% com frequência de corte de 500 OPR e ajuste por mínimos quadrados, utilizando o software de referência (à esquerda) e o ambiente de análise (à direita).

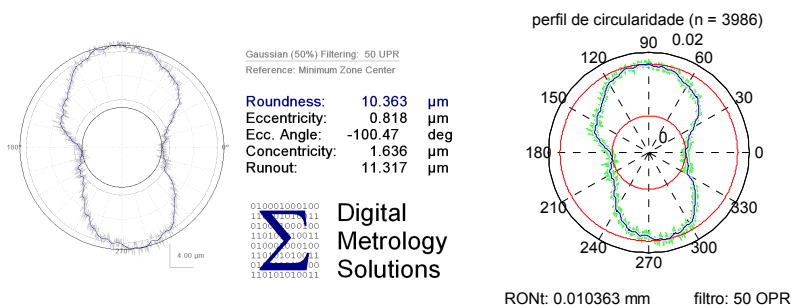


Figura 61 – Resultados para filtragem pelo filtro Gaussiano linear 50% com frequência de corte de 50 OPR e ajuste por mínima zona, utilizando o software de referência (à esquerda) e o ambiente de análise (à direita).

Os seguintes parâmetros geométricos são exportados numericamente de forma automática:

- Desvio de forma RON_t (RON_p , RON_v , RON_q se solicitado);
- Desvio padrão, obliquidade e curtose do perfil de circularidade;
- Raio médio do círculo de referência;
- Coordenadas (e excentricidade) do círculo de referência;
- Amplitudes dos componentes do conteúdo harmônico (2, 3, 4, 5, 15, 50, 150, 500) OPR;
- Número de pontos do perfil.

Para exportação dos dados de modo estruturado (em forma de uma matriz), um dos parâmetros acima deve ser escolhido.

3.3 FERRAMENTAS DE ANÁLISE DE PERFIS INTEGRAIS

Esta seção apresenta um conjunto de ferramentas gráficas de análise de perfis implementadas no ambiente de análise. Essas ferramentas tornam possível avaliar as causas das distorções presentes nos perfis adquiridos por *scanning*, e da influência das operações de processamento sobre esses perfis.

Nos gráficos implementados no ambiente de análise, o seguinte código de cores foi adotado (de acordo com a Figura 49):

- Perfis após pré-referenciamento são plotados em magenta;
- Perfis após pré-processamento são plotados em verde;
- Perfis após filtragem são plotados em azul.

Os gráficos exibidos nessa seção são de um mesmo perfil adquirido por *scanning* em uma MMC.

3.3.1 Análise do perfil no domínio do espaço

A análise do perfil no domínio do espaço pode ser realizada com um gráfico polar de circularidade (Figura 62). Esse gráfico permite avaliar, de modo qualitativo, a magnitude relativa e a orientação das componentes harmônicas dominantes do perfil, e o nível relativo de ruído presente no mesmo.

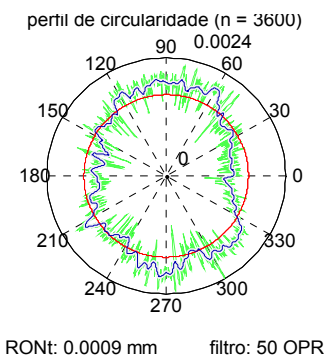


Figura 62 – Gráfico polar centrado de circularidade mostrando um perfil antes e após a filtragem (filtro Gaussiano linear, frequência de corte de 50 OPR), e o elemento de referência (em vermelho, ajustado pelo método dos mínimos quadrados). Fonte: Autor.

Quando perfis conhecidos são avaliados (e.g. padrões geométricos ou perfis calibrados), pode-se extrair informação qualitativa

sobre quais erros geométricos ou dinâmicos da MMC estão atuando sobre as medições. Esse recurso encontra-se disponível na maioria dos softwares de medição de MMC.

No ambiente de análise desenvolvido, são plotados simultaneamente os perfis anterior e posterior à filtragem, o que permite a avaliação da influência do processo de filtragem sobre os perfis de circularidade resultantes. A Figura 62 mostra um exemplo de gráfico polar de circularidade de um perfil real.

3.3.2 Análise do tratamento de *outliers*

A análise do tratamento de *outliers* pode ser realizada com o auxílio de um gráfico do perfil linearizado (Figura 63). O uso desse gráfico permite verificar a presença, as características, a magnitude e a posição angular dos *outliers* resultantes do processo de aquisição. De acordo com as características do *outlier*, é possível inferir sobre as causas do mesmo (e.g. sujeira ou picos de vibração).

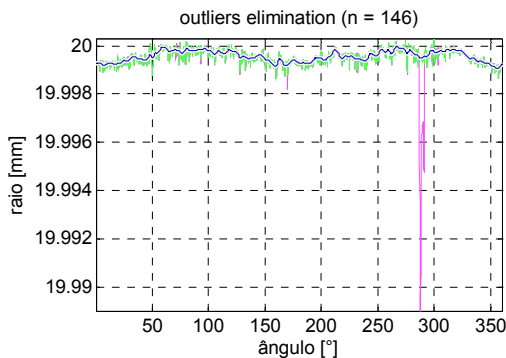


Figura 63 – Gráfico linearizado de um perfil (mesmo da Figura 62) antes e após o pré-processamento; e após a filtragem (filtro Gaussiano linear com frequência de corte de 50 OPR). Fonte: Autor.

No ambiente de análise desenvolvido, são plotados simultaneamente os perfis anterior e posterior ao pré-processamento, e também após a filtragem, permitindo verificar a qualidade do corte do *outlier* para o perfil que será utilizado na avaliação geométrica. Desse modo, na ocorrência de um *outlier*, o avaliador tem subsídio para decidir atuar sobre a causa do mesmo e realizar uma nova aquisição, ou aceitar o perfil após a remoção matemática do *outlier*. Além disso, é possível verificar se o processo de eliminação não provoca distorções não desejadas no perfil.

No caso de uma rotina de eliminação de *outliers* ser utilizada para avaliação de perfis extraídos de superfícies com propriedades funcionais estratificadas [144], o gráfico permite também verificar a qualidade da separação do perfil.

3.3.3 Análise do conteúdo harmônico

A análise do conteúdo harmônico de perfis pode ser realizada com o auxílio de um gráfico conhecido como periodograma (Figura 64), onde são plotadas as amplitudes (ou fases) das frequências abaixo da frequência de Nyquist, com exceção da componente contínua (diâmetro do perfil). O periodograma funciona como um complemento ao gráfico do perfil no domínio do espaço (e vice-versa).

A análise do conteúdo harmônico do perfil integral extraído é útil para identificar as componentes de frequência dominantes do perfil, fornecendo informações importantes sobre as características do processo de produção. Quando superfícies com perfil conhecido são avaliadas (e.g. padrões geométricos ou perfis calibrados), pode-se extrair informação quantitativa sobre erros geométricos ou dinâmicos da MMC atuando sobre as medições, permitindo também identificar as frequências dos ruídos presentes nas medições.

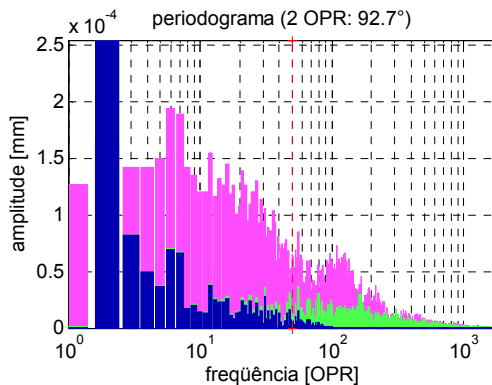


Figura 64 – Gráfico do conteúdo harmônico de um perfil (mesmo da Figura 62) antes e após o pré-processamento; e após a filtragem (filtro Gaussiano linear com frequência de corte de 50 OPR). Fonte: Autor.

No ambiente desenvolvido, são plotados simultaneamente os periodogramas do perfil antes e após o pré-processamento. Desse modo, é possível avaliar a influência das operações de pré-processamento (de forma individual ou conjunta) sobre o conteúdo harmônico. No caso de

uma rotina de eliminação de *outliers* ser utilizada para avaliação de perfis extraídos de superfícies com propriedades funcionais estratificadas, o periodograma permite realizar a avaliação do conteúdo harmônico do perfil antes da filtragem, mas sem as estruturas eliminadas (e.g. reentrâncias) [144].

O periodograma do perfil após a filtragem também é plotado no mesmo gráfico, permitindo verificar a influência do processo de filtragem sobre conteúdo harmônico, sendo particularmente útil no caso de filtros não-lineares (e.g. filtros robustos). Permite também verificar se ruídos presentes no perfil extraído, que podem influenciar os resultados da avaliação geométrica, são removidos (ou não) pela operação de filtragem.

O diagrama das fases não foi implementado no ambiente de análise. Contudo, o valor da coordenada angular do pico da componente 2 OPR é fornecido numericamente com gráfico.

3.3.4 Análise de múltiplas resoluções (multi-escala)

Enquanto a análise do perfil no domínio do espaço não fornece informação sobre a magnitude das freqüências individuais presentes no perfil, a análise no domínio da freqüência não fornece informação sobre a distribuição das magnitudes sobre o perfil. A análise de múltiplas resoluções (Figura 65) fornece informações obtidas em ambos os domínios, de forma simultânea (embora não completa).

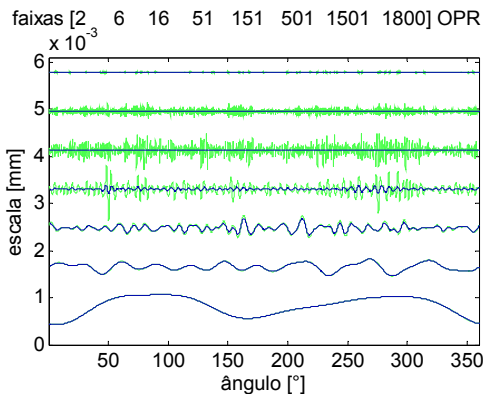


Figura 65 – Gráfico de um perfil (mesmo da Figura 62) particionado em múltiplas resoluções utilizando uma série de filtros passa-faixas com característica de transmissão tipo degrau antes e após a filtragem (filtro Gaussiano linear, freqüência de corte de 50 OPR). Fonte: Autor.

Essa análise consiste em particionar o perfil em várias faixas de frequências, e analisá-las separadamente no domínio do espaço, permitindo observar comportamentos localizados de fenômenos relacionados a cada faixa (e.g. variação do ruído em diferentes direções ortogonais). Quanto mais estreitas forem as faixas, mais próxima a análise estará de uma análise no domínio da frequência, e vice-versa.

Os mesmos filtros multi-escala implementados para o tratamento de *outliers* são utilizados (à escolha do avaliador) para realizar a partição do perfil. Para a análise, todas as faixas do perfil particionado são plotadas em um mesmo gráfico. No ambiente de análise, são plotados simultaneamente os perfis particionados anterior e posterior à filtragem, o que permite a avaliação da influência do processo de filtragem em cada faixa de frequências sobre a qual se quer obter informação.

3.3.5 Análise da distribuição angular dos pontos

A análise da distribuição angular dos pontos permite avaliar o comportamento do controlador da MMC operando em altas taxas de aquisição. A distribuição é calculada com base nas diferenças de espaçamento angular sucessivas entre pontos, e plotada em forma de um histograma (Figura 66). O espaçamento não uniforme dos pontos, quando verificado, deve ser corrigido por interpolação.

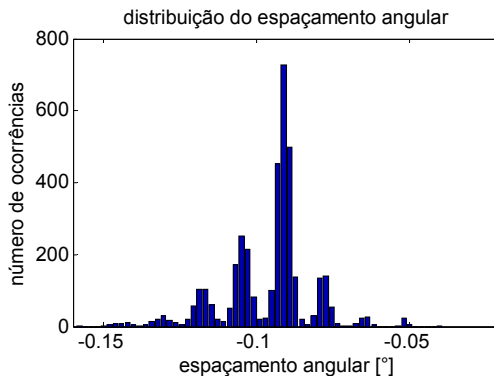


Figura 66 – Gráfico da distribuição angular dos pontos de um perfil (mesmo da Figura 62), obtido com a MMC adquirindo a uma taxa de 250 pontos/s.

Fonte: Autor.

3.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE O AMBIENTE DE ANÁLISE

Este capítulo apresentou um conjunto de ferramentas estatísticas e de processamento e análise de sinais, organizadas de modo a compor um ambiente integrado de análise de processos de medição de forma por *scanning* em MMC. O Módulo principal (Módulo 1) pode ser utilizado para processar perfis individuais, servindo também para auxiliar a etapa de planejamento do processo de medição (e.g. para avaliação de resultados de experimentos simplificados). Além disso, devido às rotinas avançadas de pré-processamento e filtragem, pode ser utilizado para realizar avaliações geométricas de perfis extraídos por *scanning*, em paralelo ao software de medição. Para tanto, a validação dos algoritmos de filtragem em estado da arte (filtros robustos, morfológicos e multi-escala) deve ser realizada.

Algumas rotinas e ferramentas adicionais estão previstas. Em particular, a comparação entre perfis no domínio do espaço para avaliação da repetitividade do processo de medição e para derivar o perfil de erro do mesmo com relação ao perfil médio calibrado está em fase de implementação. Essa comparação exige o uso de rotinas de reamostragem (*resampling*) dos perfis e ajuste matemático (*best-fitting*) entre os mesmos, já implementadas e em fase de testes. A Figura 67 mostra resultados preliminares do módulo de comparação de perfis.

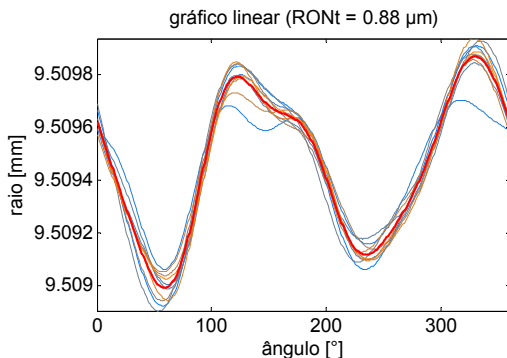


Figura 67 – Comparação de dez repetições em um mesmo perfil circular (linhas azuis e laranjas) e perfil médio (linha vermelha). Fonte: Autor.

O capítulo seguinte apresenta os resultados de dois estudos de caso onde o ambiente de análise foi utilizado como suporte para avaliação e melhoria de processos de medição de circularidade por *scanning* de empresas fornecedores do setor automotivo.

4 ESTUDOS DE CASO

Para avaliar a aplicabilidade e o desempenho da solução apresentada no capítulo anterior, e para gerar conhecimento sobre as causas de erro atuando em processos de medição reais, foram planejados e executados dois estudos de caso. Estes estudos envolveram duas empresas fornecedoras do segmento automotivo e um laboratório prestador de serviços metrológicos acreditado.

Em cada empresa, foi selecionado um modelo de peça contendo especificações de circularidade avaliadas pelas MMC de suporte à produção. Uma amostra com cinco peças foi aleatoriamente coletada na linha de produção. Essas peças foram levadas ao laboratório acreditado e calibradas utilizando equipamentos e procedimentos de referência. Posteriormente, as peças foram medidas pelas empresas em duas etapas. As nuvens de pontos de todas as medições foram exportadas para processamento externo utilizando o ambiente de análise, o qual foi utilizado também para gerar os resultados das avaliações geométricas.

Na primeira etapa, as características geométricas selecionadas foram avaliadas com o procedimento de medição adotado para avaliação da produção, conforme definido pelas empresas. Em cada empresa, foram realizados seis ciclos de medição por peça. De posse dos dados estruturados da primeira etapa e da calibração, foi realizada uma análise do processo de medição, a qual incluiu a avaliação da incerteza de medição. Com base nos resultados da análise foram sugeridas melhorias para o procedimento de medição.

Na segunda etapa, as alterações sugeridas no procedimento de medição foram implementadas e um novo conjunto de medições foi executado, a partir do qual uma nova análise foi realizada. Nos casos em que o processo de medição continuou sem atender os requisitos metrológicos, novas melhorias foram propostas. Desse modo, tem-se estabelecido um ciclo PDCA, para o qual foi definido como critério de convergência o atendimento ao requisito $U/Tol < 10\%$.

Além da avaliação da incerteza de medição, avaliações complementares do desempenho metrológico foram realizadas (análise das fontes de variação e estabilidade do processo de medição). Experimentos adicionais foram realizados para investigação das causas das variações da tendência entre peças encontradas nas etapas de avaliação e melhoria. O desempenho do método da análise estatística do perfil particionado por bancos de filtros passa-faixa tipo *brick-wall* foi testado para os *outliers* encontrados nas medições.

4.1 ESTUDO DE CASO 1 CIRCULARIDADE EM UM TAMBOR DE FREIO

4.1.1 Análises preliminares e preparação dos experimentos

Análise das características da peça e especificação

A peça utilizada neste primeiro estudo de caso foi um tambor de freio (Figura 68). A superfície a ser avaliada é a pista interna, a qual apresenta função de deslizamento.



Figura 68 – Medição do tambor de freio na MMC da empresa (à esquerda) e na calibração (à direita). Fonte: Autor.

As características da peça e a especificação a ser avaliada são apresentadas na Tabela 4. Com se pode notar, nenhum operador de verificação foi definido pelo cliente. Dessa forma, a decisão sobre praticamente todos os operadores de especificação para avaliação da circularidade ficou a critério da empresa (fornecedor), o que resulta em uma alta incerteza de especificação.

Tabela 4 – Características da superfície do tambor de freio e especificação a ser avaliada. Fonte: Autor.

Características da peça e especificação a ser avaliada	
Tipo de elemento:	Cilindro interno
Diâmetro nominal:	200 mm
Altura nominal:	38,7 mm
Rugosidade:	R_a 6,3 μm
Especificação:	Circularidade
Limite de especificação:	0,012 mm

A Tabela 5 mostra os operadores de especificação definidos pela empresa. Essas escolhas não foram questionadas do ponto de vista de um possível afastamento com relação ao operador funcional⁴⁶. Quando existentes, operadores padronizados foram adotados. A definição do máximo diâmetro admissível para o apalpador foi realizada de acordo com a direttriz VDI/VDE 2631-3 [74], com base no intervalo de especificação⁴⁷.

Tabela 5 – Operadores de especificação de circularidade definidos pela empresa (asterisco denota operadores para os quais existem valores padrão).

Fonte: Autor.

Operadores de especificação definidos pela empresa	
Parâmetro geométrico*:	RONt
Método de associação:	MZCI
Método de filtragem*:	Gaussiano linear
Parâmetro de corte do filtro:	50 OPR
Geometria do apalpador*:	Esférica
Máx. diâmetro admissível (tol):	173,91 mm
Método de extração:	Perfil circular fechado
Local:	-11; -21; -31; -41 mm
Referência:	Plano de topo

Calibração das peças

As peças selecionadas foram calibradas em um medidor de forma de referência instalado em ambiente controlado, de acordo com os operadores de especificação definidos pela empresa. No medidor de forma, o referenciamento do apalpador no sentido vertical para determinar a altura das seções com relação ao plano de topo é feito manualmente, razão pela qual as peças foram alternadas entre ciclos de medição. A orientação angular foi mantida fixa entre ciclos de medição. Seis ciclos de medição foram realizados em cada peça. A Figura 69 mostra o primeiro ciclo de medição para cada peça, na seção medida a -11 mm do plano de topo.

As fontes de incerteza consideradas na calibração foram:

- Erro de ganho do apalpador;
- Desvios geométricos do mancal da mesa rotativa;
- Máximo erro de fechamento devido à deriva de temperatura da sala de medição;

⁴⁶ Gerar discussões sobre a incerteza de correlação foge ao escopo dos experimentos.

⁴⁷ Caso o valor resultasse crítico (e.g. da mesma ordem de grandeza dos diâmetros dos apalpadores disponíveis), um análise utilizando o parâmetro Wt seria necessária.

- Repetitividade das medições (incluindo a reprodutibilidade do posicionamento do apalpador, acessados em um mesmo componente).

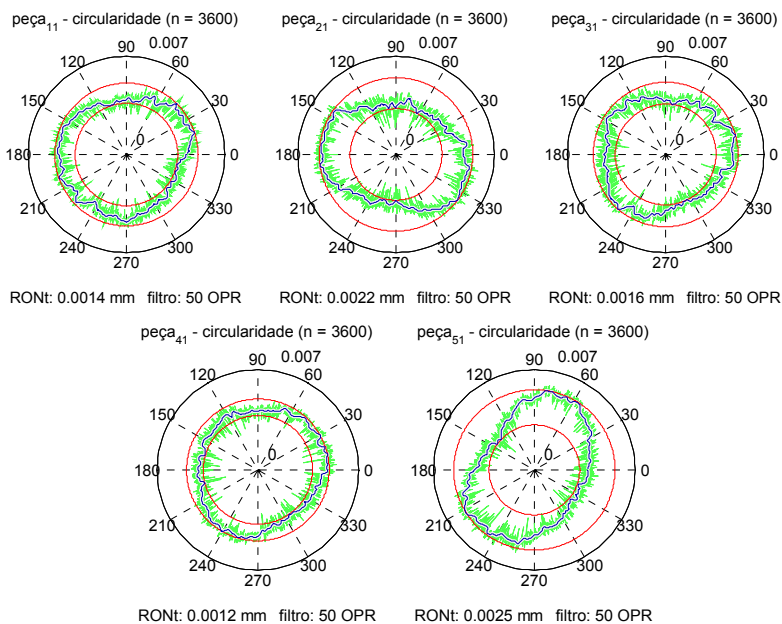


Figura 69 – Gráficos polares de perfis calibrados dos cinco tambores de freio (primeira repetição, seção -11 mm). Fonte: Autor.

Análise das características do processo de produção

Ao analisar o processo de produção, pôde-se perceber que a escolha da orientação angular durante a fixação da peça na máquina ferramenta não é realizada de maneira sistemática. Contudo, os quatro furos utilizados na fixação restringem a variação das fases absolutas dos componentes harmônicos (desde que estáveis) a ocorrer em uma das quatro possíveis orientações.

Pelos gráficos da calibração⁴⁸ (Figura 69), pode-se perceber (de forma qualitativa) uma predominância dos componentes harmônicos de 2 e 3 OPR nos perfis. É também possível notar uma alternância da máxima amplitude entre os dois componentes para diferentes perfis. A fase absoluta desses dois componentes não apresenta uma orientação

⁴⁸ A análise do conteúdo harmônico (embora não mostrada) também foi utilizada para a análise das características do processo de produção.

preferencial. Os perfis com componentes de 2 OPR mais pronunciados (peça 2 e 5) apresentam os maiores desvios de circularidade. A Tabela 6 mostra um resumo das informações obtidas das medições de calibração.

Tabela 6 – Características do processo de produção do tambor de freio de acordo com avaliação realizada na calibração. Fonte: Autor.

Características do processo de produção	
Processo de acabamento:	Brunimento
Freqüências dominantes:	2-3 OPR
Freqüências significativas:	4-15 OPR

Características do sistema de medição

A Tabela 7 mostra as principais características do sistema de medição utilizado para avaliação da circularidade do tambor de freio. As especificações do fabricante estão de acordo com as normas da família ISO 10360 [10].

Tabela 7 – Características e especificações da MMC, do sistema de apalpação e do ambiente de medição da empresa. Fonte: Autor.

Características do sistema de medição
Tipo da MMC (ISO 10360-1): Portal móvel
Volume de medição: (1200x1800x1000) mm ³
MPE _E (ISO 10360-2): (1,5 + L/350) µm (L em mm)
Sistema de apalpação: Ativo
THP (ISO 10360-4): 2,4 µm
τ (ISO 10360-4): 29 s
Temperatura da sala de medição: (20,0 ± 3,0)°C

4.1.2 Avaliação e melhorias do processo de medição

Etapa 1 – Avaliação do procedimento de medição definido pela empresa

Os parâmetros de aquisição utilizados pela empresa na Etapa 1 encontram-se na Tabela 8. O procedimento de medição utilizado alia velocidade de aquisição relativamente alta com rigidez relativamente baixa do apalpador. O uso da extensão é desnecessário para a medição em questão (embora a mesma configuração seja utilizada para outras medições). O número de pontos adquiridos por perfil é relativamente baixo (mesmo satisfazendo o critério de sete vezes a freqüência de corte de acordo com a ISO/TS 12181-2 [80]). Todas as peças são medidas em um único local e orientação no volume da MMC. A qualificação dos apalpadores é realizada uma vez ao dia, no primeiro horário da manhã.

Tabela 8 – Parâmetros de aquisição utilizados na Etapa 1 das medições do tambor de freio. Fonte: Autor.

Parâmetros de aquisição - Etapa 1		
MMC	Força de contato:	0,2 N
	Velocidade de medição:	60 mm/s
	Número de pontos:	1548
	Taxa de aquisição:	148 ptos/s
	Aceleração centrífuga:	36,0 mm/s ²
	Pré e pós curso:	20°
Apalpador	Diâmetro:	4 mm
	Comprimento total:	120 mm
	Rigidez média aproximada:	9,4 N/mm

As medições de avaliação do processo de medição foram conduzidas em “rodadas”, onde as peças foram medidas em seqüência (uma logo após a outra). A seqüência de medição das peças foi alterada entre rodadas de medição. Foram executadas um total de seis rodadas de medição, totalizando 30 medições. As medições foram executadas em momentos diferentes do dia (e.g. diferentes turnos), ao longo de duas semanas. Embora no procedimento normal de medição as peças sejam medidas sem orientação angular definida, para o propósito do presente estudo, as peças foram marcadas e medidas em uma orientação angular fixa (a mesma utilizada na calibração). Essa configuração permite avaliar com maior nível de detalhe se existem interações significativas entre o processo de medição e as variações do processo de produção.

Tabela 9 – Resultados da avaliação de incerteza do processo de medição de circularidade do tambor de freio conforme procedimento definido na Etapa 1. Fonte: Autor.

Balanço de Incertezas - Etapa 1				
Símbolo	Fonte	Valor (µm)	v	% Contribuição
Ucal	Calibração	0,09	389	2,4%
up	Repetitividade	0,22	25	14,0%
uw	Var. Tendência	0,54	4	83,6%
uc	Combinada	0,59	5	
b	Tend. Média	0,69		
U	Expandida	2,3	k = 2,65	
U/Tol				19,2%

Os resultados da avaliação da incerteza de medição são apresentados na Tabela 9 e na Figura 70. No gráfico de tendências, pode-se observar uma variação significativa da tendência entre peças. Essa fonte de variação corresponde a aproximadamente 80% da incerteza combinada. Além disso, uma tendência média significativa pode ser observada. De acordo com o gráfico dos desvios padrão, a repetitividade se mostrou consistente entre peças.

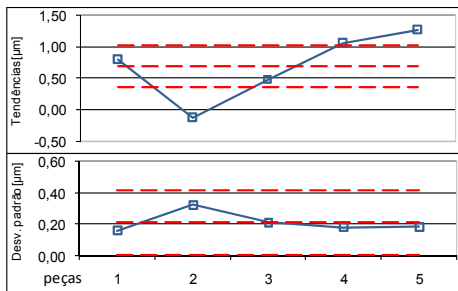


Figura 70 – Gráfico de tendências (acima) e desvio padrão do processo de medição (abaixo) de circularidade do tambor de freio conforme procedimento definido na Etapa 1. Fonte: Autor.

Para analisar as causas da tendência média observada (e da variação da tendência entre peças), fez-se uso das ferramentas de análise implementadas no ambiente computacional desenvolvido. A Figura 71 mostra perfis de uma seção (-11 mm) de uma das peças (peça 1), adquiridos nas medições de calibração e de avaliação da incerteza de medição. Percebe-se que nas medições da Etapa 1, um alto nível de ruído é gerado na aquisição dos perfis. Esse ruído ocorre em um intervalo de frequências consideravelmente amplo, e influencia diretamente o resultado das avaliações geométricas, porquanto não é completamente removido pelo filtro digital. Além disso, é possível observar uma tendência expressiva na frequência de 2 OPR, resultante dos desvios estruturais (geométricos ou dinâmicos) da MMC.

Etapa 2 – Melhorias do processo de medição

As alterações propostas com fins de melhoria para o novo procedimento (Etapa 2) foram a redução da velocidade de medição e o acréscimo do número de pontos do perfil (em negrito na Tabela 10).

Tabela 10 – Parâmetros de aquisição utilizados nas Etapas 2a e 2b das medições do tambor de freio. Fonte: Autor.

Parâmetros de aquisição - Etapa 2a & 2b		
MMC	Força de contato: 0,2	N
	Velocidade de medição: 19	mm/s
	Número de pontos: 3696	
	Taxa de aquisição: 112	ptos/s
	Aceleração centrífuga: 3,6	mm/s ²
	Pré e pós curso: 20°	
Apalpador	Diâmetro: 4	mm
	Comprimento total: 120	mm
	Rigidez média aproximada: 9,4	N/mm

Com a redução da velocidade espera-se deslocar o ruído para frequências mais altas do espectro e atenuar suas amplitudes; e reduzir a magnitude das distorções de caráter dinâmico-estruturais. Com o aumento de pontos, espera-se minimizar a ocorrência de *aliasing*⁴⁹.

As alterações sugeridas foram implementadas no software de medição e um novo conjunto de medições foi executado. Após o segundo ciclo de medições, foi constatado que o ruído, apesar de ter sido deslocado para as frequências mais altas do espectro, não foi satisfatoriamente reduzido com o decréscimo da velocidade de medição (Figura 71). A Tabela 11 mostra a incerteza de medição estimada com as duas rodadas de medição realizadas nessa etapa de avaliação e melhoria do processo de medição (denominada Etapa 2a). Embora a tendência média tenha sido consideravelmente reduzida após a atenuação do ruído pelo filtro digital, a variação da tendência entre peças continuou mantendo elevada a incerteza de medição.

Tabela 11 – Resultados da avaliação de incerteza do processo de medição de circularidade do tambor de freio conforme procedimento definido na Etapa 2a.

Fonte: Autor.

Balanco de Incertezas - Etapa 2a				
Símbolo	Fonte	Valor (µm)	v	% Contribuição
u _{cal}	Calibração	0,09	389	3,7%
u _p	Repetitividade	0,18	5	14,1%
u _w	Var. Tendência	0,43	4	82,2%
u _c	Combinada	0,47	5	
b	Tend. Média	0,25		
U	Expandida	1,5	k = 2,65	
U/ToI				12,5%

Mesmo com o processo de medição apresentando relação incerteza/intervalo de especificação um pouco acima dos 10% apenas, a empresa optou por realizar uma manutenção do equipamento. Durante a manutenção foi constatado que os mancais aerostáticos de suporte ao portal da MMC estavam deteriorados (com rugosidade elevada), e foram substituídos. Um ajuste da matriz de CAA da MMC foi também realizado.

Logo nas primeiras medições após a manutenção, foi percebida uma redução apreciável no ruído gerado pelo processo de medição (Figura 71). Desse modo, seis rodadas completas de medições (Etapa 2b) foram realizadas com os mesmos parâmetros de aquisição da Etapa 2a e utilizando o mesmo procedimento de estruturação dos dados. De posse dos dados, a incerteza de medição foi novamente calculada.

⁴⁹ Como a velocidade de medição foi alterada juntamente com o número de pontos, não é possível inferir sobre a ocorrência de *aliasing* na Etapa 1.

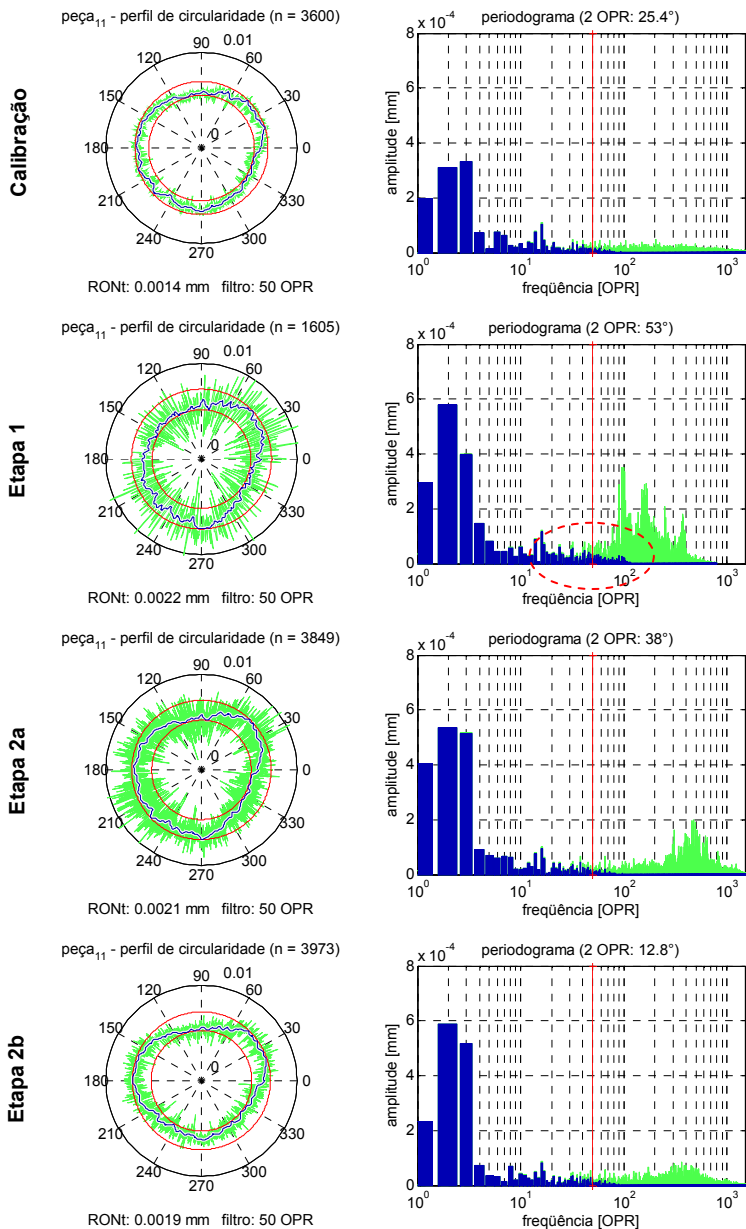


Figura 71 – Gráficos de perfis adquiridos em cada uma das etapas, em um mesmo tambor de freio (peça 1, repetição 1, seção -11 mm). Fonte: Autor.

Tabela 12 – Resultados da avaliação de incerteza do processo de medição de circularidade do tambor de freio após a manutenção da MMC (Etapa 2b).

Fonte: Autor.

Balço de Incertezas - Etapa 2b				
Símbolo	Fonte	Valor (μm)	v	% Contribuição
Ucal	Calibração	0,09	389	12,2%
up	Repetitividade	0,14	25	29,6%
uw	Var. Tendência	0,20	4	58,2%
uc	Combinada	0,26	11	
b	Tend. Média	0,36		
U	Expandida	1,0	k = 2,25	
U/Tol				8,3%

A Tabela 12 e a Figura 72 mostram os resultados desse terceiro ciclo da avaliação e melhoria do processo de medição. Embora a variação da tendência entre peças continue a principal causa de variação do processo de medição, sua contribuição foi significativamente reduzida. Após essa etapa, o processo de medição foi considerado validado, tendo atendido o critério $U/Tol < 10\%$.

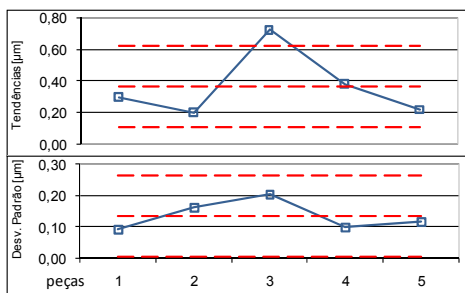


Figura 72 – Gráfico de tendências (acima) e desvio padrão (abaixo) do processo de medição de circularidade do tambor de freio após a manutenção da MMC (Etapa 2b). Fonte: Autor.

4.1.3 Análises adicionais

Estabilidade do processo de medição

Além da avaliação da incerteza de medição, outros indicadores do desempenho metrológico do processo de medição de circularidade dos tambores de freio foram estimados. Um estudo de estabilidade foi realizado, para o qual foram coletados dados durante os quatro meses seguintes à aceitação do processo de medição de acordo com o critério definido pela relação U/Tol . Para este estudo, uma das peças calibradas (peça 1, embora não necessariamente uma peça calibrada seja necessária) foi selecionada, e medida em uma base aproximadamente

semanal durante o período de avaliação. Para análise dos dados, foram utilizados três gráficos de indivíduos, um para o controle do valor do desvio de circularidade $RONt$, e os demais para o controle dos componentes harmônicos de 2 e 3 OPR. Os resultados do estudo são apresentados na Figura 73.

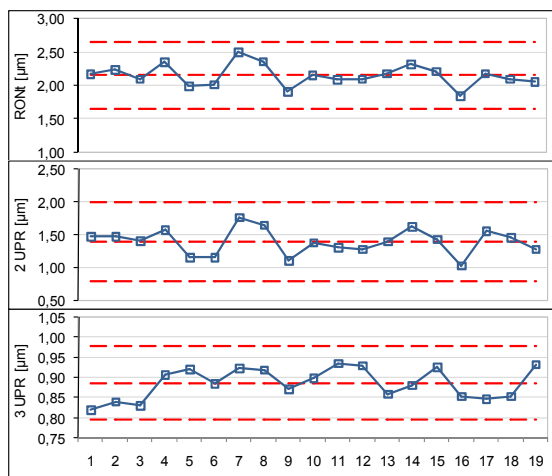


Figura 73 – Resultados da avaliação da estabilidade do processo de medição de circularidade do tambor de freio após a manutenção da MMC (Etapa 2b), utilizando cartas de indivíduos. Amplitudes dos componentes harmônicos multiplicadas por dois para obtenção do valor pico-vaie. Fonte: Autor.

A partir da análise das cartas de controle, duas conclusões importantes podem ser obtidas. A primeira é que o processo de medição se mostrou sob controle estatístico durante o período avaliado, o que torna a estimativa da incerteza de medição válida para conferir rastreabilidade às medições realizadas no mesmo período⁵⁰. A segunda, talvez mais importante do ponto de vista do comportamento de máquinas de medir por coordenadas de modo geral, é a correlação apresentada entre o desvio de circularidade $RONt$ e a componente de 2 OPR (coeficiente de Pearson: 0,95). Esse fato demonstra a importância da contribuição dos componentes harmônicos de baixa frequência à variabilidade do processo de medição, sendo possível inferir que as variações de longo prazo estão fortemente ligadas às variações de

⁵⁰ Desde que o padrão de variação apresentado pelo do processo de produção também se mantenha estável.

caráter geométrico da estrutura⁵¹. Possíveis causas para essa variação são variações cíclicas da temperatura, e/ou dos gradientes de temperatura. Infelizmente, não foram realizados registros de temperatura, e a hipótese da temperatura não pôde ser confirmada.

Análise das fontes de variação do processo de medição

Outro indicador do desempenho metrológico avaliado foi a contribuição da variação do processo de medição à variação total (de acordo com método descrito na seção 3.1.2). A Tabela 13 mostra os indicadores calculados para o processo de medição na Etapa 2b.

Tabela 13 – Resultados da avaliação das fontes de variação do processo de medição de circularidade do tambor de freio após a manutenção da MMC (Etapa 2b). Fonte: Autor.

Análise das Fontes de Variação - Etapa 2b			
Símbolo	Fonte	Valor (μm)	% Contribuição
R _p	Repetitividade	0,14	20,2%
R _w	Var. Tendência	0,21	30,2%
R_c	Combinada	0,25	36,3%
R _m	Expandida	0,65	93,2%
R _t	Total	0,70	
%R_c/R_t			36,3%

De acordo com os resultados da avaliação, o processo de medição se mostrou inadequado para realizar controle estatístico do processo ($\%R_c/R_t > 30\%$). Esse fato se deve ao processo de produção apresentar (de acordo com os dados disponíveis) uma variação consideravelmente baixa com relação à variação combinada do processo de medição, fazendo com que o último não seja capaz de perceber mudanças no primeiro. Contudo, antes de reprovar o processo de medição, deve-se obter uma estimativa mais confiável das variações do processo de produção (e.g. utilizando informações de estudos de capacidade do processo de produção). É importante notar que a maior contribuição do processo de medição à variação total se deve à variação da tendência entre peças.

Variação da tendência entre peças

Para verificação das causas da variação da tendência entre peças, foi realizado um experimento no qual as peças calibradas foram medidas com os mesmos parâmetros de aquisição da Etapa 2b, porém foram rotacionadas em 90° em torno do eixo do cilindro avaliado. Duas

⁵¹ Sendo que o local de medição da peça no volume de medição foi mantido fixo, e considerando que os erros de origem dinâmica não são influenciados pela temperatura.

rodadas de medições foram realizadas com as peças rotacionadas. A Figura 74 mostra os gráficos das tendências das medições nas duas orientações angulares, pelo qual se pode observar variações significativas nas tendências de cada peça.

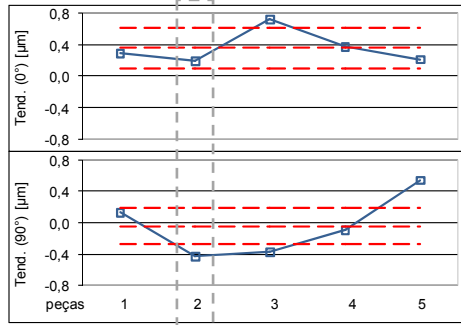


Figura 74 – Gráfico das tendências observadas nas medições da Etapa 2b (acima) e das medições com os mesmos parâmetros de aquisição, porém com as peças rotacionadas em 90° (abaixo). Fonte: Autor.

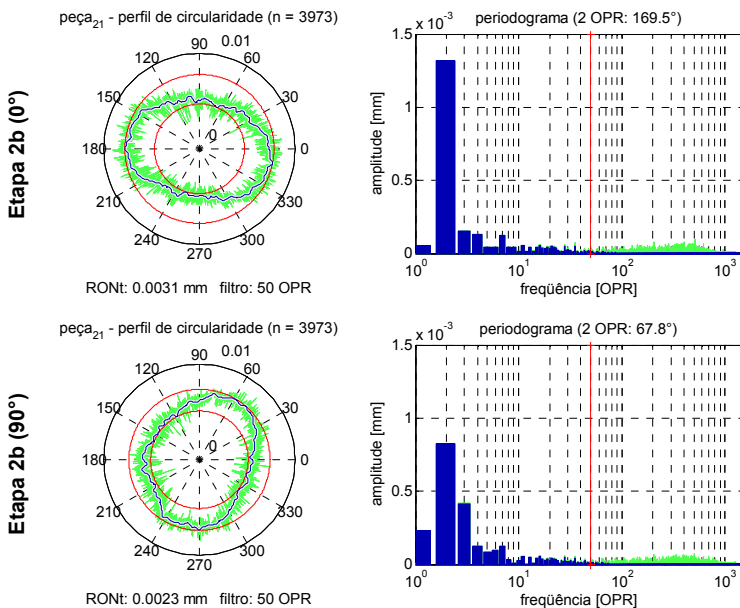


Figura 75 – Gráficos de dois perfis adquiridos na mesma peça (peça 2, primeira repetição, seção -11 mm), com os mesmos parâmetros de aquisição (Etapa 2b), em duas orientações angulares defasadas em 90°. Fonte: Autor.

A causa da variação da tendência observada em uma mesma peça quando medida em diferentes orientações angulares pode ser entendida ao se analisar a o gráfico polar da Figura 75. Ao girar as peças, ocorre uma mudança da fase relativa entre os componentes harmônicos do perfil de erro da MMC (erro residual após todas as correções realizadas pelo controlador) e do perfil da peça, gerando padrões de interferência distintos para diferentes orientações angulares. Sobretudo, esse efeito pode ser observado nas frequências mais baixas, que normalmente apresentam amplitudes mais pronunciadas, tanto nos perfis gerados na usinagem das superfícies quanto nas distorções estruturais (geométricas e dinâmicas) da MMC e/ou das configurações de apalpadores.

Presença de outliers

Durante as medições dos tambores de freio, foi gerado um padrão de *outlier* do tipo simétrico [144], com baixa relação largura/altura, o qual foi encontrado em diversos perfis adquiridos. Esse tipo de *outlier* não é possível de ser removido pelo método multi-escala com filtro morfológico. A Figura 76 mostra um exemplo desse tipo de *outlier*, e os resultados de eliminação utilizando o método do perfil particionado com bancos de filtros com característica de transmissão tipo degrau. Este método foi utilizado para o tratamento de todos os perfis integrais extraídos utilizados nas etapas de avaliação e melhoria⁵².

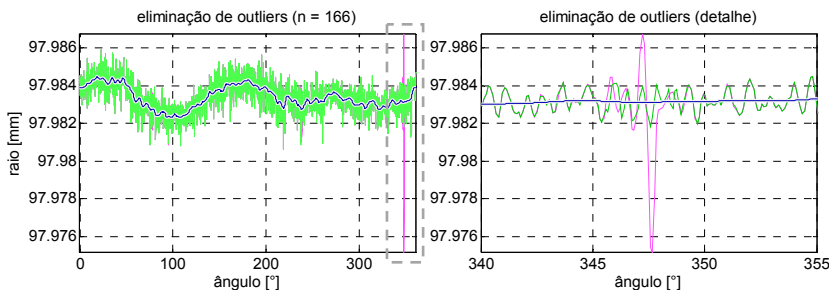


Figura 76 – Eliminação de um *outlier* simétrico gerado pelo processo de medição do tambor de freio utilizando o método multi-escala com filtro tipo degrau. Fonte: Autor.

⁵² De modo que os indicadores metroológicos obtidos representam o processo de medição sem a influência dos *outliers*.

4.2 ESTUDO DE CASO 2 CIRCULARIDADE EM UM CUBO DE EIXO

4.2.1 Análises preliminares e preparação dos experimentos

Análise das características da peça

A peça utilizada no segundo estudo de caso foi um cubo de eixo (Figura 77). A superfície a ser avaliada é a pista interna, a qual apresenta função de montagem com interferência.



Figura 77 – Medição do cubo de eixo na MMC da empresa (à esquerda) e na calibração (à direita). Fonte: Autor.

As características da peça e a especificação a ser avaliada são apresentadas na Tabela 14. Do mesmo modo que para o caso anterior, nenhum operador de verificação foi definido pelo cliente, de modo que a decisão sobre os operadores de especificação para avaliação da circularidade recai sobre o fornecedor.

Tabela 14 – Características da superfície do cubo de eixo e especificação a ser avaliada. Fonte: Autor.

Características da peça e especificação a ser avaliada	
Tipo de elemento:	Cilindro interno
Dímetro nominal:	127 mm
Altura nominal:	41 mm
Rugosidade:	Ra 2,5 μm
Especificação:	Circularidade
Limite de especificação:	0,015 mm

A Tabela 15 mostra os operadores de especificação definidos pela empresa. Assim como no caso anterior, essas decisões não foram questionadas do ponto de vista de um possível afastamento com relação ao operador funcional.

Tabela 15 – Operadores de especificação definidos pela empresa (asterisco denota operadores para os quais existem valores padrão). Fonte: Autor.

Operadores de especificação definidos pela empresa	
Parâmetro geométrico*:	<i>RONt</i>
Método de associação:	MZCI
Método de filtragem*:	Gaussiano linear
Parâmetro de corte:	150 OPR
Geometria do apalpador*:	Esférica
Máx. diâmetro admissível (tol):	34,7 mm
Método de extração:	Perfil circular fechado
Local:	-5; -25; -35 mm
Referência:	Plano do rolamento

Calibração das peças

As peças selecionadas foram calibradas em uma MMC de referência instalada em ambiente controlado. Os componentes harmônicos de 2 a 5 OPR foram corrigidos utilizando um anel padrão com o perfil de forma calibrado em um medidor de forma. Três ciclos de medição foram realizados na calibração do anel. O anel foi medido na MMC antes da calibração de cada peça (Figura 77, à direita). Na calibração das peças, foram realizados cinco ciclos de medição no anel e nas peças, para cada uma das peças. A orientação angular foi mantida fixa entre ciclos de medição. Os mesmos operadores de especificação definidos pela empresa foram usados na calibração. A Figura 78 mostra o primeiro ciclo de medição de peça, na seção a -5 mm do plano do rolamento.

As fontes de incerteza consideradas na calibração foram:

- Fontes relativas ao medidor de forma (todas as citadas no estudo de caso anterior);
- Erro de transferência dos componentes harmônicos calibrados e corrigidos (principalmente devido à orientação angular do anel);
- Componentes harmônicos não corrigidos (tendência no valor *RONt* do perfil contendo somente os componentes harmônicos não corrigidos, acima de 6 OPR);
- Desvio de forma do apalpador (avaliado com o medidor de forma);
- Máximo erro de fechamento devido à deriva de temperatura da sala de medição;
- Repetitividade das medições de calibração (anel e peça).

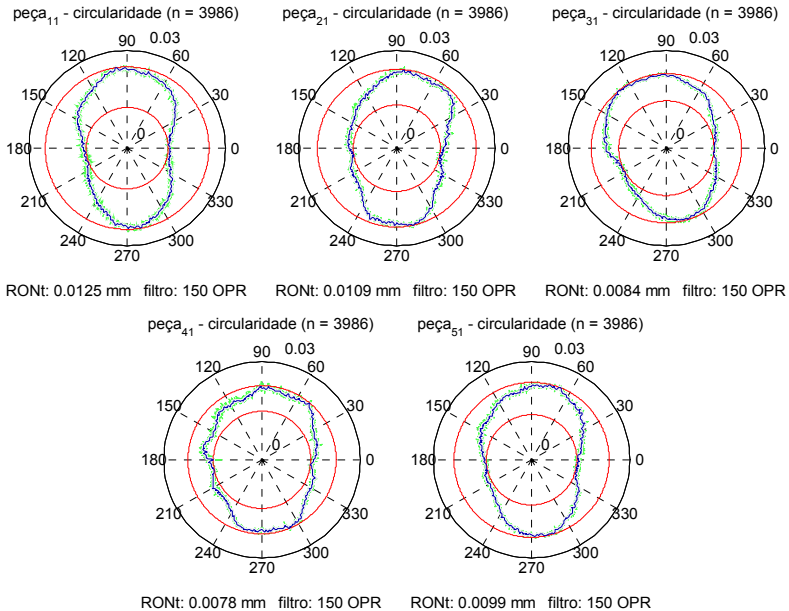


Figura 78 – Gráficos polares de perfis calibrados dos cinco cubos de eixo (primeira repetição, seção -5 mm). Fonte: Autor.

Análise das características do processo de produção

Ao analisar o processo de produção, pôde-se perceber que a fixação da peça na máquina ferramenta é realizada de maneira sistemática (existe uma marca que é utilizada como referência angular). Desse modo, a orientação angular do componente harmônico de 2 OPR resulta bem definida (conforme se pode ver nos perfis calibrados, Figura 78). Contudo, o componente harmônico de 3 OPR (e em alguns outros em torno de 7 OPR) não aparenta possuir um padrão consistente entre peças. A Tabela 16 mostra um resumo das informações obtidas das medições de calibração.

Tabela 16 – Características do processo de produção do cubo de eixo de acordo com avaliação realizada na calibração. Fonte: Autor.

Características do processo de produção	
Processo de acabamento:	Torneamento
Freqüências dominantes:	2-3 OPR
Freqüências significativas:	4-10 OPR

Características do sistema de medição

A Tabela 17 mostra as principais características do sistema de medição utilizado para avaliação da circularidade do cubo de eixo. Especificações do fabricante de acordo com as normas ISO 10360 [10].

Tabela 17 – Características e especificações da MMC, do sistema de apalpação e do ambiente de medição da empresa. Fonte: Autor.

Características do sistema de medição	
Tipo da MMC (ISO 10360-1):	Portal móvel
Volume de medição:	(900x1500x700) mm ³
MPE _E (ISO 10360-2):	(1,6 + L/333) μm (L em mm)
Sistema de apalpação:	Ativo
THP (ISO 10360-4):	2,5 μm
τ (ISO 10360-4):	29 s
Temperatura da sala de medição:	(20,0 ± 2,0)°C

4.2.2 Avaliação e melhorias do processo de medição

Etapa 1 – Avaliação do procedimento de medição definido pela empresa

Os parâmetros de aquisição utilizados pela empresa na Etapa 1 encontram-se na Tabela 18. A configuração de apalpadores utilizada apresenta uma rigidez adequada (mesmo com a extensão, desnecessária para a medição em questão). A velocidade de medição foi definida automaticamente pelo software de medição. Todas as peças são medidas em um único local e orientação no volume da MMC (Figura 77). Os apalpadores são qualificados antes das medições de cada lote de peças.

Tabela 18 – Parâmetros de aquisição utilizados na Etapa 1 das medições do cubo de eixo. Fonte: Autor.

Parâmetros de aquisição - Etapa 1		
MMC	Força de contato:	0,2 N
	Velocidade de medição:	43 mm/s
	Número de pontos:	3192
	Taxa de aquisição:	344 ptos/s
	Aceleração centrífuga:	29,1 mm/s ²
	Pré e pós curso:	20°
Apalpador	Diâmetro:	5 mm
	Comprimento total:	220 mm
	Rigidez média aproximada:	104,4 N/mm

As medições de avaliação do processo de medição foram conduzidas com a mesma estrutura da caso anterior (em rodadas, onde uma rodada consiste na realização de uma medição em cada peça). A seqüência de medição das peças foi alterada entre rodadas de medição.

Foram executadas um total de seis rodadas de medição, totalizando 30 medições. As medições foram executadas em momentos diferentes do dia (e.g. diferentes turnos), ao longo de duas semanas. O procedimento de medição adota a mesma referência angular do processo de produção, de modo que o componente harmônico de 2 OPR é sempre alinhado ao eixo vertical da MMC. O mesmo procedimento foi utilizado na avaliação da incerteza de medição.

Tabela 19 – Resultados da avaliação de incerteza do processo de medição de circularidade do cubo de eixo conforme procedimento definido na Etapa 1.

Fonte: Autor.

Balço de Incertezas - Etapa 1				
Símbolo	Fonte	Valor (μm)	v	% Contribuição
U_{cal}	Calibração	0,15	inf	30,7%
U_p	Repetitividade	0,09	25	11,1%
U_w	Var. Tendência	0,20	4	58,2%
uc	Combinada	0,26	11	
b	Tend. Média	0,74		
U	Expandida	1,4	k = 2,25	
U/Tol				9,3%

Os resultados da avaliação da incerteza de medição são apresentados na Tabela 19 e na Figura 79. No gráfico de tendências, pode-se observar uma variação significativa da tendência entre peças, correspondendo à aproximadamente 60% da variação total apresentada pelo processo de medição. Além disso, uma tendência média significativa pode ser observada. Mesmo com os desvios das características metrológicas encontrados, o processo de medição se mostrou capaz na primeira iteração do ciclo de avaliação e melhoria do processo de medição, de acordo com o critério de $U/Tol < 10\%$.

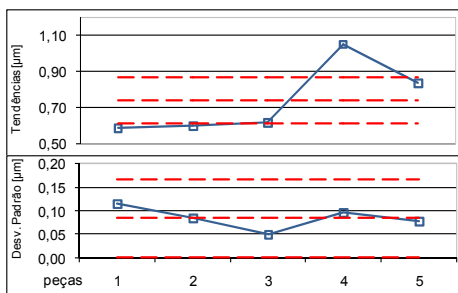


Figura 79 – Gráfico de tendências (acima) e desvio padrão do processo de medição (abaixo) de circularidade do cubo de eixo conforme procedimento definido na Etapa 1. Fonte: Autor.

Entretanto, uma primeira estimativa da capacidade do processo de produção utilizando os dados disponíveis revela que o mesmo apresenta uma capacidade baixa ($C_{pu} \approx 0,8$). Desse modo, caso melhorias não sejam implementadas no processo de produção, a inspeção de 100% dos produtos deverá ser realizada. Nesse caso, a redução no intervalo de aceitação devido à incerteza de medição de 1,4 μm provocaria a reprovação estimada de 3% das peças conformes produzidas (considerando distribuições normais, conforme Figura 80).

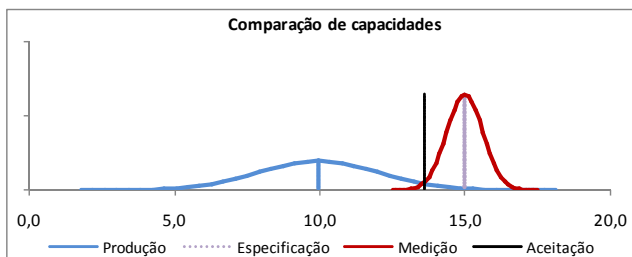


Figura 80 – Comparação da capacidade do processo de medição e do processo de produção a partir dos dados obtidos na calibração e na Etapa 1. Fonte: Autor.

Assumindo-se a situação da inspeção 100% para continuação dos estudos, o próximo passo foi realizar uma análise do processo de medição na tentativa de reduzir a incerteza de medição. A Figura 81 mostra perfis de uma seção (-5 mm) de uma das peças (peça 4), adquiridos nas medições de calibração e de avaliação da incerteza de medição. Pelos periodogramas, é possível perceber uma quantidade significativa de ruído gerado na aquisição. Contudo, ocorre nas frequências mais altas do espectro, sendo atenuado em quase toda sua magnitude pelo filtro Gaussiano. Desse modo, pode-se concluir que os erros mais significativos do processo de medição são de baixa frequência. Analisando-se as frequências mais baixas do espectro, pode-se verificar que o componente de 2 OPR desponta como o componente que mais apresenta distorção.

Etapa 2 – Melhorias do processo de medição

As alterações propostas com fins de melhoria para o novo procedimento (Etapa 2) foram a redução da velocidade de medição e o acréscimo do número de pontos do perfil (em negrito na Tabela 10). Com a redução da velocidade, espera-se reduzir a magnitude do perfil de erro da MMC. A Tabela 20 mostra os parâmetros de aquisição utilizados na Etapa 2.

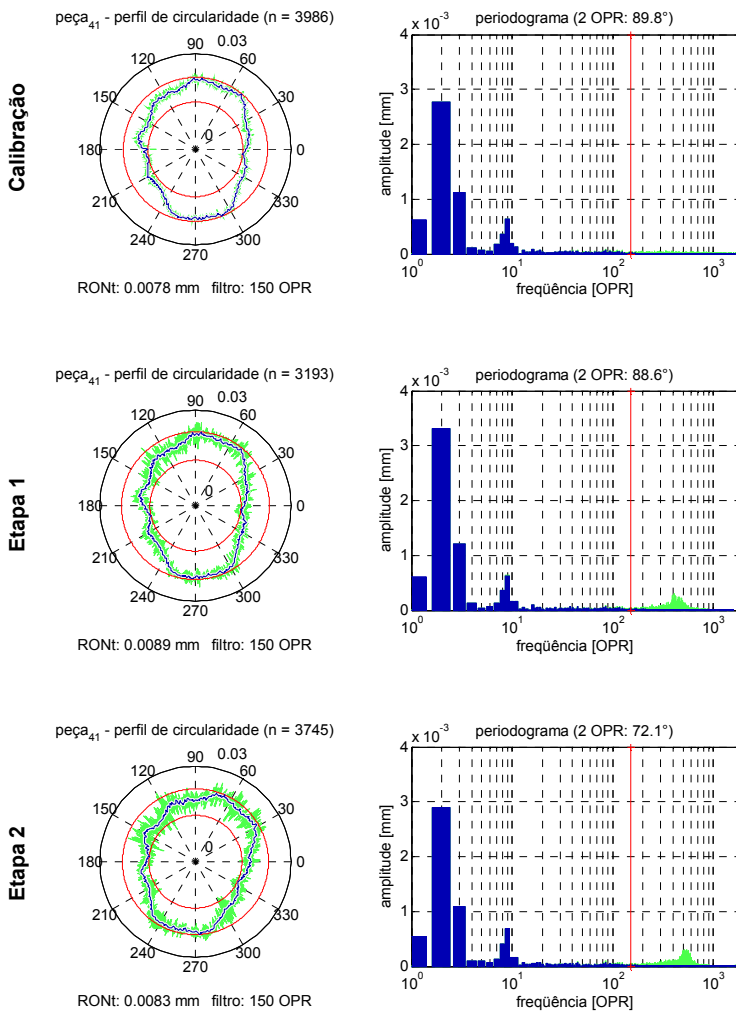


Figura 81 – Gráficos de perfis adquiridos em cada uma das etapas, em um mesmo cubo de eixo (peça 4, repetição 1, seção -5 mm). Fonte: Autor.

Tabela 20 – Parâmetros de aquisição utilizados na Etapa 2 das medições do cubo de eixo. Fonte: Autor.

Parâmetros de aquisição - Etapa 2		
MMC	Força de contato:	0,2 N
	Velocidade de medição:	15 mm/s
	Número de pontos:	3750
	Taxa de aquisição:	141 ptos/s
	Aceleração centrífuga:	3,5 mm/s ²
	Pré e pós curso:	20°
Apalpador	Diâmetro:	5 mm
	Comprimento total:	220 mm
	Rigidez média aproximada:	104,4 N/mm

As alterações sugeridas foram implementadas no software de medição e um novo conjunto de medições foi executado. Seis rodadas completas de medição com a mesma estrutura de dados das medições anteriores foram realizadas. A Tabela 21 mostra os resultados desse ciclo de avaliação e melhoria do processo de medição.

Tabela 21– Resultados da avaliação de incerteza do processo de medição de circularidade do cubo de eixo conforme procedimento definido na Etapa 2.

Fonte: Autor.

Balanco de Incertezas - Etapa 2				
Símbolo	Fonte	Valor (µm)	v	% Contribuição
Ucal	Calibração	0,15	inf	35,8%
up	Repetitividade	0,11	25	21,4%
Uw	Var. Tendência	0,16	4	42,8%
uc	Combinada	0,24	20	
b	Tend. Média	0,35		
U	Expandida	0,9	k = 2,13	
U/Tol				6,0%

Os resultados obtidos mostram uma significativa redução nas contribuições à incerteza de medição, principalmente da tendência média. Com essa nova incerteza de medição, a estimativa da quantidade de peças conformes rejeitadas pela redução do intervalo de medição cai para 1,5%. Esse ganho no intervalo de aceitação de produto pode vir a compensar a redução da produtividade da MMC em termos de custos.

4.2.3 Análises adicionais

Variação da tendência entre peças

O mesmo experimento realizado no estudo de caso anterior foi repetido para o atual. As peças calibradas foram medidas com os mesmos parâmetros de aquisição da Etapa 2, porém rotacionados em 90° em torno do eixo do cilindro avaliado. Duas rodadas de medições foram realizadas com as peças rotacionadas. A Figura 82 mostra os

gráficos das tendências das medições nas duas orientações angulares, pelo qual se pode observar variações significativas nas tendências de cada peça. O mais interessante nesse gráfico é perceber a inversão do sinal da tendência média observada entre orientações angulares.

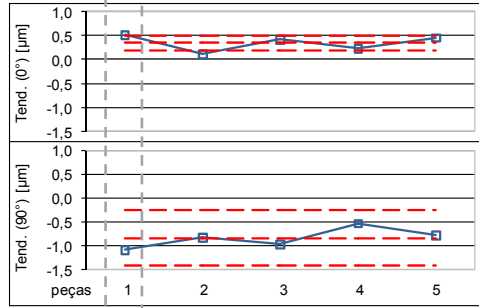


Figura 82 – Gráfico das tendências observadas nas medições da Etapa 2 (acima) e das medições com os mesmos parâmetros de aquisição, porém com as peças rotacionadas em 90° (abaixo). Fonte: Autor.

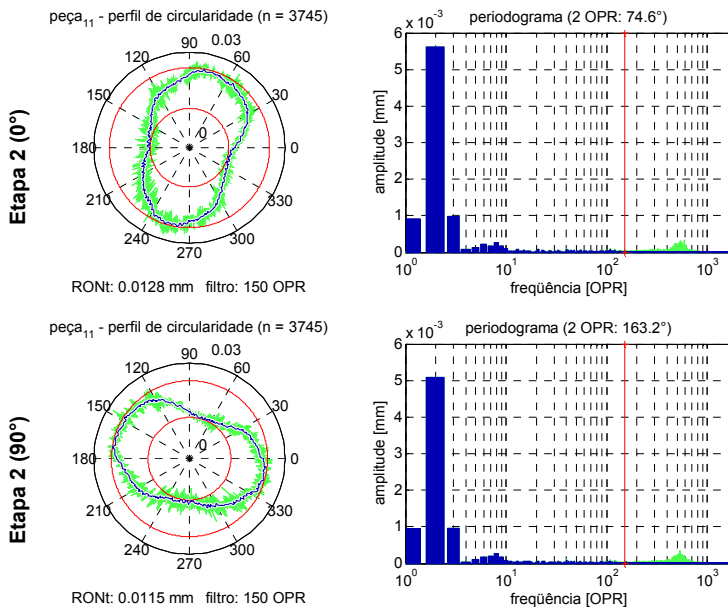


Figura 83 – Gráficos de dois perfis adquiridos na mesma peça (peça 1, primeira repetição), com os mesmos parâmetros de aquisição (Etapa 2), em duas orientações angulares defasadas em 90°. Fonte: Autor.

Esse fato se deve à orientação sistemática do componente harmônico de 2 OPR das peças com relação ao sistema coordenado da MMC. No caso das medições na posição angular de 0° , a interferência nessa frequência foi construtiva para todas as peças, e na orientação girada a 90° , foi destrutiva para todas as peças. A Figura 83 mostra esse efeito para uma das peças, que ficou mais “arredondada” quando rotacionada a 90° , devido à interação com o perfil de erro da MMC.

Presença de outliers

Durante as medições dos cubos de eixo, foi gerado um padrão de *outlier* do tipo oscilatório-amortecido [144], que ocorre na faixa de frequências do ruído presente no perfil, iniciando com um salto abrupto na amplitude seguido de um amortecimento exponencial. Esse *outlier* foi encontrado em diversos dos perfis adquiridos. O método multi-escala com filtro morfológico não é capaz de remover esse tipo de *outlier*. A Figura 84 mostra um exemplo de um *outlier* tipo oscilatório-amortecido encontrado em um dos perfis, e os resultados de eliminação utilizando o método do perfil particionado com banco de filtros tipo degrau.

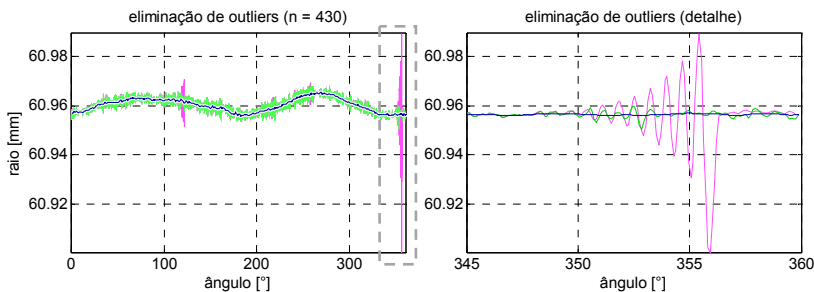


Figura 84 – Eliminação de um *outlier* oscilatório-amortecido gerado pelo processo de medição do cubo de eixo utilizando o método multi-escala com filtro tipo degrau. Fonte: Autor.

4.3 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Conforme se pôde observar pelos estudos de caso, o uso do ambiente de análise se mostrou um meio eficaz para reconhecer as causas dos erros de medição, propor melhorias e verificar a efetividade das mesmas. Ambos os estudos representaram casos de sucesso do ponto de vista da adequação dos processos de medição aos requisitos

metrológicos estipulados. Contudo, o amplo ganho de conhecimento obtido com o uso das ferramentas estatísticas e de análise de sinais de modo integrado na análise de dados gerados com experimentos estruturados se mostrou o maior êxito do presente trabalho.

De acordo com os experimentos realizados, foi possível verificar que ocorrem interferências entre os componentes harmônicos do perfil real das peças e do perfil de erro específico da tarefa de medição (ou simplesmente *perfil de erro*). Essas interferências dependem da relação de fases entre os componentes harmônicos de ambos os perfis, podendo resultar tanto em interferências construtivas como destrutivas. A relação de fases entre o perfil das peças e o perfil de erro irá depender principalmente de três fatores:

- Do comportamento do processo de produção com respeito às variações do conteúdo harmônico impresso nas superfícies;
- Do procedimento de fixação da peça na MMC, e;
- Do perfil de erro específico da tarefa de medição.

As interferências resultantes da interação entre esses três fatores, principalmente para as frequências mais baixas do espectro (geralmente dominantes em ambos os perfis de peças e o perfil de erro), podem provocar uma variação da tendência observada entre peças (em última análise, influenciam diretamente a distribuição do erro de medição). A Figura 85 ilustra essa situação.

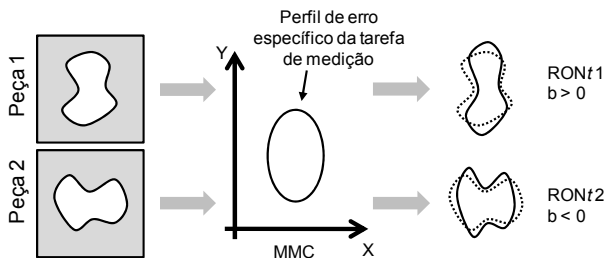


Figura 85 – Exemplo de variação da tendência entre peças na avaliação de circularidade devido à interação das variações do conteúdo harmônico do processo de produção com o perfil de erro de uma MMC. Fonte: Autor.

A partir das características dos processos de produção observados nos estudos de caso, uma classificação com base nos padrões de variação do conteúdo harmônico das superfícies pode ser realizada, conforme descrito a seguir (e esquematizado na Figura 86).

- Processo tipo ‘A’: a amplitude dos componentes harmônicos dominantes da superfície e a fase relativa entre os mesmos não variam significativamente de peça para peça, nem a fase desses componentes com relação à máquina-ferramenta;
- Processo tipo ‘B’: a amplitude dos componentes harmônicos dominantes da superfície e a fase relativa entre os mesmos não variam significativamente de peça para peça, mas a fase desses componentes com relação à máquina-ferramenta varia;
- Processo tipo ‘C’: a amplitude dos componentes harmônicos dominantes da superfície e/ou a fase entre os mesmos variam significativamente de peça para peça, e também (mas não necessariamente) a fase desses componentes com relação à máquina-ferramenta.

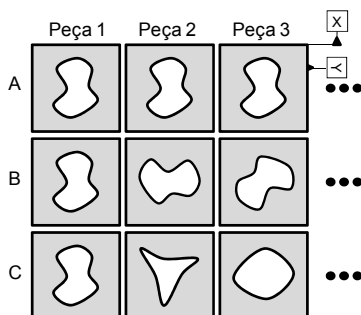


Figura 86 – Classificação dos processos de produção de acordo com as variações do conteúdo harmônico entre peças. Fonte: Autor.

O processo tipo ‘A’ pode ocorrer quando as causas dos desvios de forma permanecem estáveis com respeito às referências da peça e ao longo do tempo. As causas desses desvios podem ser devido a características da própria peça (e.g. rigidez, tensões residuais) e/ou devido a características da máquina-ferramenta (e.g. erros geométricos, comportamento dinâmico, fixação da peça), e existem referências bem definidas na peça para sua fixação na máquina-ferramenta. O processo tipo ‘B’ é uma modificação do tipo ‘A’, que pode ocorrer quando as causas dependem da máquina-ferramenta, mas não existem referências bem definidas na peça para sua fixação na máquina-ferramenta. O processo tipo ‘C’, quando as peças não apresentam propriedades consistentes ou a máquina-ferramenta não é estável, de modo que não se observa um padrão sistemático de desvios de forma gerados pelo processo de produção.

Com respeito ao procedimento de fixação das peças na MMC, pode-se notar que um Processo tipo 'A' pode aparentar ser um Processo tipo 'B' quando o procedimento de fixação das peças na MMC não utiliza as referências da peça de modo sistemático (ou quando a referência é perdida após a fabricação). Nesse caso, gera-se uma situação que irá afetar a distribuição do erro e que não depende somente das variações do processo de produção e do perfil de erro específico da tarefa de medição, mas também do procedimento utilizado na fixação das peças na MMC. No exemplo hipotético citado, a situação gerada pode ser classificada como uma Situação tipo 'B' (devido ao efeito observado ser semelhante ao de um Processo tipo 'B').

Referindo-se aos processos de medição avaliados, ambos utilizaram fixação sistemática da peça na MMC, logo as situações observadas apresentam efeitos somente devido à interação entre as variações do processo de produção e o perfil de erro. Pode-se claramente identificar o processo do Estudo de Caso 1 (tambor de freio) como um Processo tipo 'C', no qual tanto o componente harmônico com maior amplitude alterna-se entre 2 OPR (peças 2 e 5) e 3 OPR (peças 1, 3 e 4), e as fases desses componentes variam entre peças. O processo do Estudo de Caso 2 (cubo de eixo) apresenta um componente de 2 OPR razoavelmente estável com relação à fase e amplitude (devido à fixação sistemática da peça a partir de uma referência angular bem definida tanto na produção quanto na medição), sugerindo um Processo tipo 'A'. Contudo, as variações de fase do componente de 3 OPR e a aparição de um componente de 7 OPR dominante na peça 4 podem levar esse processo de medição a ser classificado como Processo tipo 'C', o que explica a variação da tendência encontrada entre peças.

Concluindo, pôde-se observar que, de modo geral, a variação da tendência entre peças representou a fonte de variação dominante nos balanços de incerteza dispostos para os estudos de caso. Além dos parâmetros de forma, essa fonte de variação influencia também outros parâmetros dos elementos geométricos, por exemplo, o diâmetro e as coordenadas do centro dos elementos. Desse modo, com base nos experimentos realizados, pode-se afirmar que um balanço de incerteza que não leve em consideração a variação da tendência entre peças pode estar negligenciando uma das mais significativas fontes de incerteza em medições por coordenadas.

O capítulo seguinte reúne o conjunto de conhecimentos gerados no presente trabalho, apresentando-os na forma de recomendações para o planejamento dos processos de medição de forma por *scanning* em MMC.

5 RECOMENDAÇÕES PARA O PLANEJAMENTO DO PROCESSO DE MEDIÇÃO

Este capítulo compila um conjunto de recomendações para auxiliar o planejador das tarefas de medição de forma por *scanning* na seleção dos parâmetros de medição. As recomendações apresentadas são derivadas da pesquisa bibliográfica e das conclusões obtidas com os experimentos realizados ao longo deste trabalho.

5.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

De modo geral, o esforço a ser despendido na avaliação do desempenho metrológico dos processos de medição está relacionado com a criticidade da tarefa de medição [20]. Da mesma forma, a criticidade da tarefa de medição deve orientar a definição dos parâmetros de medição. Para o controle de especificações críticas do ponto de vista funcional do produto, as quais geralmente apresentam intervalos de especificação mais estreitos, maiores cuidados no planejamento da tarefa de medição serão requeridos, de modo a evitar longos ciclos de adequação dos processos de medição aos requisitos metrológicos.

A seleção dos parâmetros para medições de forma por *scanning* em MMC deve ser orientada de acordo com requisitos específicos relacionados a cada etapa do processo de medição (Figura 5). Esses requisitos são listados abaixo.

- Etapa de aquisição: os parâmetros não relacionados ao tempo de medição devem ser selecionados de modo que o perfil extraído apresente o mínimo de distorções possível, e os parâmetros relacionados ao tempo de medição, de modo que o perfil extraído apresente distorções aceitáveis de acordo com os requisitos metrológicos, requerendo o menor tempo de medição possível;
- Etapa de pré-processamento: os parâmetros devem ser selecionados de modo a minimizar os efeitos de distorções causadas na aquisição, sem introduzir novas distorções;
- Etapa de avaliação geométrica: os parâmetros (operadores) de especificação requeridos e não informados devem ser

selecionados levando-se em consideração os requisitos funcionais da superfície.

Nas duas primeiras etapas, a seleção dos parâmetros tem como objetivo a adequação da incerteza de medição aos requisitos metrológicos e a minimização dos custos da avaliação. Na terceira, a seleção dos parâmetros tem como objetivo a minimização das incertezas de especificação e de correlação.

A definição dos operadores de especificação é pré-requisito para a seleção dos parâmetros de aquisição, e será abordada primeiramente.

5.2 DEFINIÇÃO DOS OPERADORES DE ESPECIFICAÇÃO

A incerteza de especificação resultante da definição incompleta dos operadores de especificação geralmente supera (em alguns casos em muitas vezes) a incerteza de medição. Desse modo, esforços devem ser feitos para eliminar essa fonte de incerteza.

De modo geral, definição dos operadores de especificação deve ser orientada por uma análise dos requisitos funcionais das superfícies, objetivando-se reduzir a incerteza de correlação. Informações para auxiliar a definição dos operadores de especificação do ponto de vista funcional podem ser encontradas na literatura técnica e acadêmica⁵³. Algumas discussões pertinentes foram realizadas na subseção 2.10.4. Uma ampla revisão sobre as propriedades funcionais das superfícies de engenharia pode ser encontrada em [27].

Para a definição dos operadores de especificação, a primeira tarefa a ser executada pelo planejador é realizar uma análise do desenho técnico do produto, do plano de controle e/ou do contrato entre partes, com os seguintes objetivos:

- Identificar as especificações críticas do ponto de vista funcional da peça (ou definidas no plano de controle);
- Para cada especificação, identificar quais os operadores requeridos que são definidos pelo cliente e quais estão faltando.

A seguir, é realizada a definição dos operadores de especificação requeridos e não informados, de acordo com a criticidade da especificação, conforme segue:

⁵³ Por exemplo, uma avaliação da influência do erro de circularidade no desempenho funcional de tambores de freio foi realizada por [149].

- Para especificações críticas, definir os operadores de especificação requeridos e não informados em consenso com o cliente⁵⁴;
- Para especificações não críticas, pode-se recorrer ao uso de recomendações gerais encontradas na bibliografia técnica.

Para os casos de operadores de especificação definidos em consenso com o cliente, recomenda-se registrar os valores definidos em documentos formais⁵⁵. Para o caso em que os operadores não sejam definidos em consenso com o cliente, recomenda-se que os valores e os critérios de decisão utilizados sejam registrados em documentos auditáveis pelo cliente, e informados junto ao resultado de medição.

O Apêndice B contém um exemplo de formulário que pode ser utilizado para orientar e documentar o processo de definição dos operadores de especificação. Recomendações gerais encontradas na literatura técnica para definição dos operadores de especificação foram apresentadas na subseção 2.10.2.

5.3 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE AQUISIÇÃO

Para a minimização simultânea da incerteza e dos tempos de medição, a definição dos parâmetros de aquisição deve ser realizada em duas etapas: a seleção dos parâmetros não relacionados ao tempo de medição; e a seleção daqueles relacionados ao tempo de medição. Apesar de muitos dos parâmetros estarem relacionados ao tempo de medição de forma indireta⁵⁶, a velocidade de medição é o fator que na prática define a produtividade de uma MMC. A seguir são apresentadas recomendações para o conjunto de parâmetros não relacionados diretamente com o tempo de aquisição dos perfis.

5.3.1 Parâmetros não relacionados ao tempo de aquisição

A seleção dos parâmetros (ou decisões) que não apresentam relação direta com tempo de execução da aquisição deve ser orientada

⁵⁴ Desse modo, a incerteza de especificação é eliminada.

⁵⁵ Por exemplo, o contrato entre partes e/ou notas acrescentadas pelo cliente no desenho do produto.

⁵⁶ Por exemplo, utilizar uma configuração de apalpadores para cada tarefa de medição exige um tempo de qualificação elevado. Outro exemplo é o número de pontos adquiridos por perfil, que influencia o tempo de processamento dos dados.

pelo objetivo único de minimizar a incerteza de medição. Parâmetros (ou decisões) que se enquadram nessa categoria são:

- Decisões sobre a fixação da peça no volume da MMC (local, orientação e dispositivo);
- Decisões sobre os apalpadores a serem utilizados (rigidez das configurações, e material e tamanho do elemento de contato);
- Definição da força de contato nominal;
- Definição sobre o número de pontos utilizados na extração;
- Decisões sobre o uso de métodos de correção de distorções causadas na aquisição⁵⁷ (principalmente eliminação de *outliers*).

Fixação da peça e configurações dos apalpadores

Conforme visto na subseção 2.2.2, distintos locais e orientações da peça dentro do volume de da MMC podem resultar em distintos perfis de erro, de acordo com os desvios estruturais de origens geométrica e dinâmica. Partindo desse princípio, poder-se-ia estudar local e orientação ideais no volume de medição, para os quais as distorções inseridas nos perfis fossem as menores possíveis. Entretanto, como perfil de erro é dependente da tarefa de medição, realizar um mapeamento dos desvios relacionados à estrutura considerando todas as variáveis associadas (principalmente as natureza dinâmica) torna-se um esforço proibitivo.

Além disso, como foi discutido nas seções 2.3 e 2.5.3 os desvios relacionados à rigidez (e anisotropia da rigidez) dos apalpadores são críticos, principalmente quando associados à resposta dinâmica do sistema de apalpação.

Recomendação

Quando definindo o local e orientação das peças no volume de medição, manter o foco sobre as configurações dos apalpadores, de modo a mantê-las tão rígidas e simples quanto for possível (curtas e espessas, sem juntas ou extensões desnecessárias).

⁵⁷ Embora essas operações tenham sido classificadas como operações de pré-processamento, elas foram enquadradas nesta seção devido ao objetivo no uso das mesmas. Na prática, utilizando softwares comerciais, o avaliador somente tem controle sobre a operação de eliminação de *outliers*, a qual será abordada adiante.

Tamanho e material dos elementos de contato

Conforme visto na subseção 2.5.5, o apalpador pode provocar filtragem mecânica da superfície atenuando frequências de interesse para a avaliação das propriedades funcionais da superfície, efeito que deve ser evitado. Por outro lado, o uso de apalpadores com maior diâmetro permite utilizar configurações de apalpadores com maior rigidez, diminui a sollicitação dinâmica sobre o sistema de apalpação e reduz os efeitos relacionados às deformações de contato.

Recomendação

Com relação ao diâmetro do apalpador, recomenda-se que seja o maior possível (de acordo com os apalpadores disponíveis) sem que provoque atenuação de frequências de interesse (não atenuadas pelo filtro digital).

Recomendações sobre o material das esferas dos apalpadores foram apresentadas na subseção 2.5.4.

Força de contato nominal

Conforme visto na seção 2.3, a força de contato nominal é apenas um dos componentes da força de contato efetiva, a qual é também influenciada por um complexo conjunto de fatores relacionados a características dinâmicas do sistema de medição, e da associação das mesmas com as características das superfícies sob avaliação.

No entanto, um estudo realizado mostrou que o aumento da força de contato nominal pode diminuir os efeitos da variação da força de contato efetiva, principalmente a perda de contato entre apalpador e superfície em altas velocidades (Figura 23). Portanto, para medições de perfis circulares externos, e/ou de superfícies com amplitudes dos componentes harmônicos elevadas, o aumento da força nominal de contato pode minimizar os efeitos causados pela variação da força de contato efetiva.

Por outro lado, a força de contato nominal não pode ser aumentada (devendo por vezes ser diminuída) para medições de peças compostas de materiais pouco rígidos, e/ou quando o diâmetro dos apalpadores for necessariamente baixo, pois pode ocorrer achatamento significativo dos picos das ondulações presentes na superfície. Além disso, o uso de forças de contato nominais elevadas aumenta a possibilidade de ocorrer *stick-slip* em baixas velocidades, e reduz a vida útil dos apalpadores pelo aumento da deterioração dos elementos de contato.

Recomendação

Utilizar a força de contato nominal *default* definida pelo fabricante. Somente alterar a força de medição em casos especiais (e.g. para medir materiais pouco rígidos, ou quando a força de contato é definida na especificação geométrica).

Número de pontos

As especificações técnicas ISO/TS 12780-2 (e demais [77-80]) definem que o número de pontos mínimo para aquisição de perfis seja de sete vezes a frequência de corte do filtro digital. Contudo, como visto na subseção 2.6.1, esse critério pode não ser suficiente por si só para evitar a ocorrência de *aliasing*.

Portanto, sem a presença de um filtro *anti-aliasing* no sistema de aquisição, o intervalo de amostragem deverá ser decidido com base do conteúdo harmônico do perfil medido (o qual inclui ruído inserido pelo sistema de medição). Quanto maior o número de pontos utilizados, menor a influência do *aliasing* sobre os resultados de medição. Da mesma forma, caso uma interpolação seja utilizada pelo software da MMC para corrigir os efeitos de uma amostragem não homogênea, quanto maior o número de pontos disponíveis melhor a reconstrução obtida. Além disso, conforme apontado em [118], no caso de parâmetros geométricos definidos por desvios locais (e.g. *RONt*), quanto maior o número de pontos, menor a incerteza relacionada à amostragem.

Recomendação

Utilizar o maior número de pontos possível na aquisição de cada perfil (o qual será limitado pela máxima taxa de amostragem permitida pelo controlador e pela velocidade de medição escolhida), e no mínimo sete pontos por frequência de interesse.

Eliminação de outliers

O uso de técnicas para a eliminação de *outliers* poderá influenciar a avaliação de algumas propriedades funcionais de superfícies (e.g. no caso de perfil com propriedades funcionais estratificadas). Além disso, o uso de limites de corte muito estreitos pode provocar a degradação do perfil extraído. Portanto, alguns critérios devem ser observados, os quais incluem:

- Conhecer o tipo de superfície gerado pelo processo de produção (verificando a presença de estruturas assimétricas);

- Caso existam estruturas, realizar uma avaliação crítica dos efeitos provocados pela eliminação (ou não) sobre a avaliação das propriedades funcionais sob investigação;
- Caso não existam estruturas evidentes, ou se opte por eliminá-las para atender a avaliação de propriedades funcionais, utilizar algum dos métodos de eliminação de *outliers* disponíveis;
- Avaliar as causas da ocorrência dos *outliers* encontrados (pode ser um desvio local gerado aleatoriamente pelo processo de produção, e a influência do mesmo sobre o desempenho funcional da superfície deve ser considerada);
- Caso seja aceitável a eliminação do *outlier* encontrado (não influencia o desempenho funcional ou foi gerado pelo processo de medição), avaliar a qualidade da eliminação matemática do *outlier* antes de aceitar a medição;
- Não utilizar limites de corte muito estreitos, sob o risco de se degradar extremos funcionais da superfície.

5.3.2 Velocidade de medição

Conforme visto nos capítulos anteriores, a velocidade de medição é o parâmetro de medição mais crítico do ponto de vista do desempenho metrológico dos processos de medição por *scanning* em MMC. De modo geral, o aumento da velocidade degrada a exatidão do processo de medição. Em contrapartida, é o parâmetro que determina o tempo das medições, e desse modo, é crítico também do ponto de vista dos custos da qualidade.

Uma velocidade de medição bem escolhida *a priori* leva a uma rápida convergência do ciclo de planejamento e validação do processo de medição. Entretanto, devido à quantidade de fenômenos correlatos, é também o parâmetro de aquisição mais difícil de ser determinado.

Alguns softwares de medição utilizam rotinas internas para estimar a velocidade de medição [4]. Essas rotinas requerem algumas informações por parte do avaliador, sendo elas: tipo de elemento a ser adquirido, tamanho nominal do elemento, limite de especificação e frequência de corte do filtro digital. Caso esse recurso esteja disponível, deve ser utilizado para uma primeira estimativa da velocidade de medição.

Caso recursos como o mencionado acima não estejam disponíveis no software de medição, um ensaio simples pode ser realizado. O ensaio consiste em realizar uma série de medições em uma peça de produção

não calibrada, com diferentes velocidades de medição (mantendo-se fixos os demais parâmetros de medição, predefinidos para minimizar a incerteza de medição), e observar a partir de qual velocidade a desvio de forma começa a derivar. Essa velocidade propicia (aproximadamente) a melhor exatidão obtível para o processo de medição com o menor tempo de medição associado à mesma, e pode ser utilizada como estimativa inicial para definição do procedimento de medição. O uso de recursos avançados de análise de sinais (como os implementados no ambiente de análise) propicia visualização adicional (e importante) sobre o comportamento do processo de medição. A descrição detalhada do experimento simplificado e um exemplo utilizando uma peça real foram incluídos no Apêndice C.

É importante mencionar que o uso de recursos de software ou a realização de experimentos simplificados para determinação dos parâmetros de medição não desobriga a validação do processo de medição frente aos requisitos metrológicos de cada tarefa de medição.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresentou uma solução para auxiliar na realização do planejamento, avaliação e melhoria de processos de medição de forma por *scanning* em máquinas de medir por coordenadas.

Uma sistematização do conhecimento em estado da arte sobre medições de forma por *scanning* em MMC foi realizada. Mais do que servir de embasamento teórico para as discussões geradas no trabalho, o foco dado aos aspectos metrológicos diretamente associados aos parâmetros de medição fornecem ao planejador subsídio para tomadas de decisão acertadas na definição do procedimento de medição e na proposição de melhorias ao processo de medição.

Para permitir uma avaliação consistente do desempenho metrológico dos processos de medição estudados, um método experimental de avaliação da incerteza de medição utilizando múltiplas peças calibradas foi apresentado. Esse método é capaz de considerar uma fonte de incerteza relevante e muitas vezes negligenciada por outros métodos de avaliação da incerteza em medições por coordenadas: a variação da tendência entre peças. Os estudos de caso realizados permitiram verificar que essa fonte de variação muitas vezes supera a repetitividade do processo de medição. Embora o método tenha sido proposto no contexto de avaliação de especificações de forma, o mesmo pode ser aplicado a outros tipos de especificações geométricas. A descrição do método foi publicada em [138,139].

Outro importante elemento da solução proposta foi o desenvolvimento de um ambiente de integrado de análise dos processos de medição de forma por *scanning*. O uso do ambiente de análise em processos de medição reais demonstrou o potencial do mesmo para identificação das causas de erro atuantes e para proposição de melhorias eficazes, resultando na validação dos processos de medição avaliados nos estudos de caso. O uso simultâneo e complementar das ferramentas de análise estatística e de processamento de sinais implementados permitiu a obtenção de um conhecimento amplo e detalhado das causas de erro dos processos de medição estudados nesse trabalho. Importantes conclusões puderam ser obtidas a partir do uso do ambiente para avaliação de processos de medição reais, notadamente as causas da variação da tendência entre peças em medições de forma por *scanning*. Além disso, uma classificação dos processos de produção com respeito à variação do conteúdo harmônico entre peças pode ser delineada, a qual é útil do ponto de vista do planejamento e da avaliação do processo de

medição. O estudo dos mecanismos que geram variação da tendência entre peças, incluindo resultados das análises realizadas nesta dissertação, foram publicados em [139].

Rotinas especiais de processamento de sinais foram estudadas e implementadas no ambiente de análise, com o objetivo de minimizar a influência de distorções geradas na aquisição dos perfis com MMC. A partir de simulações numéricas, foi possível verificar as melhorias que são obtidas com o uso de interpolação para o tratamento dos dados não uniformemente espaçados resultantes do uso de altas taxas de aquisição. Resultados desse estudo foram publicados em [84]. De particular relevância foi o desenvolvimento de um método para reconhecimento e eliminação de *outliers* utilizando análise estatística dos perfis particionados por bancos de filtros passa-faixas com característica de transmissão tipo degrau. O método foi testado para o tratamento de perfis contendo diferentes tipos de *outliers* gerados em medições reais, e os resultados mostraram um desempenho bastante positivo do método. Resultados de uma comparação entre este método e outros métodos par reconhecimento e eliminação de *outliers* foram publicados em [144].

Por fim, a partir do conhecimento gerado durante a pesquisa, um conjunto de recomendações práticas para o planejamento de medição foi compilado. Essas recomendações servem como um guia de boas práticas para os planejadores das medições de forma por *scanning*, auxiliando na definição de uma boa estimativa inicial do procedimento de medição, de modo a se obter uma rápida convergência do ciclo de planejamento e melhoria do processo. O ensaio simplificado para a determinação da velocidade de medição permite a obtenção de uma boa estimativa inicial para o parâmetro. Particularmente, quando os resultados desse ensaio são avaliados pelo ambiente de análise, importantes informações do ponto de vista do planejamento da medição podem ser obtidas a priori, sem grandes esforços por parte dos avaliadores. Essas recomendações foram apresentadas para metrologistas de MMC, na forma de um seminário sobre o tema abordado nessa dissertação [150].

De modo geral, pode-se concluir que os objetivos do trabalho foram atingidos. Algumas melhorias e propostas para trabalhos futuros são listadas a seguir.

Ambiente de análise

O ambiente de análise no seu estado atual é capaz de avaliar somente perfis circulares. O ambiente pode ser expandido para avaliação de outras especificações de forma como retitude, planeza e

cilindricidade. Além disso, o ambiente não possui uma interface gráfica. O uso de uma interface gráfica permitiria o uso do mesmo de modo mais intuitivo e eficiente.

Obtenção de informações a priori

Embora existam na literatura algumas propostas de modelos lineares para a avaliação da resposta dinâmica dos sistemas de apalpação, não existe um modelo completo, que permita obter uma estimativa da resposta em frequência do mesmo considerando o conjunto sistema de apalpação/apalpador. Um modelo que permita estimar a resposta em frequência do conjunto sistema de apalpação/apalpador, e que permita utilizar como entrada o conteúdo harmônico de um único perfil adquirido, seria extremamente útil para se obter uma boa estimativa inicial para a velocidade de medição.

Sistema para gestão de conhecimentos e informações

A disponibilidade de um sistema que permita a gestão (armazenamento e recuperação) dos resultados de experimentos simplificados padronizados e de medições de avaliação da produção tendo a incerteza de medição estimada seria de grande valia para o planejamento da medição.

Método alternativo para avaliação da incerteza de medição

O método apresentado nesse trabalho, apesar de consistente do ponto de vista das estimativas de incerteza de medição obtidas e útil do ponto de vista da geração de conhecimento sobre o processo de medição, demanda uma série de recursos que nem sempre poderão ser disponibilizados (e.g. um conjunto de peças calibradas). Um método que consiga manter as mesmas vantagens do método puramente experimental, porém utilizando somente um artefato calibrado, pode representar uma alternativa apropriada para avaliação da incerteza de processos de medição de forma em MMC.

REFERÊNCIAS

- [1] ISO 1101:2004, *Geometrical Product Specifications (GPS) – Geometrical Tolerancing – Tolerances of Form, Orientation, Location and Run-out*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [2] ASME Y14.5M:1994, *Dimensioning and Tolerancing*. American Society of Mechanical Engineers, New York, USA.
- [3] A. Schmidt, *Análise dos Efeitos da Filtragem na Medição de Circularidade em Máquinas de Medir por Coordenadas Utilizando Scanning*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.
- [4] Carl Zeiss. *CALYPSO Operating Instructions – Option 9 – VAST Navigator*. Reference Manual, Revision 4.6. Carl Zeiss, Oberkochen, Germany, 2007.
- [5] AIAG, ASQ, *Measurement Systems Analysis (MSA)*. Reference Manual, Third Edition, Automotive Industry Action Group, Troy, MI, USA, 2002.
- [6] D.J. Wheeler, R. W. Lyday, *Evaluating the Measurement Process*. SPC Press Inc., Knoxville, Tennessee, USA, 1989.
- [7] FIAT-GM Powertrain, *Evaluation of Measurement Systems Specification (EMS)*. Global Machinery and Equipment Specification Document, Version 10.6, July 2004.
- [8] Bosch, *Capability of Measurements and Test Processes*. In: Quality Assurance in the Bosch Group: Technical Statistics, Chapter 10, First Edition, Robert Bosch GmbH, Stuttgart, Germany, 2003.
- [9] F.A. Arenhart, C.R. Baldo, G.D. Donatelli, *Evaluation of Coordinate Measurement Processes in the Brazilian Industry using Calibrated Workpieces*. IX International Conference on Coordinate Measuring Technique, Bielsko-Biala, Poland, 2010.
- [10] ISO 10360-2:2009, *Geometrical product specifications (GPS) – Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) – Part 2: CMMs used for measuring linear dimensions*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [11] ASME B89.4.10360.2:2008, *Acceptance Test and Reverification Test for Coordinate Measuring Machines (CMMs) Part 2: CMMs Used for Measuring Linear Dimensions (Technical Report)*. American Society of Mechanical Engineers, New York, USA.

- [12] AIAG, ASQ, *Advanced Product Quality Planning & Control Plan (APQP)*. Reference Manual, First Edition, Automotive Industry Action Group, Troy, MI, USA, 1995.
- [13] ISO/TS 16949:2002, *Quality Management Systems – Particular Requirements for the Application of ISO 9001:2000 for Automotive Production and Relevant Service Part Organizations*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [14] ISO VIM, *International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology*. Published Jointly by BIPM, IEC, FCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, Geneva, Switzerland, 2008.
- [15] ISO GUM, *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*. Published Jointly by BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, Geneva, Switzerland, 1995.
- [16] JCGM 101, *Evaluation of Measurement Data – Supplement 1 to the “Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement” – Propagation of Distributions Using a Monte Carlo Method*. Published Jointly by BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, Geneva, Switzerland, 2007.
- [17] ISO 14253-1:1998, *Geometrical Product Specifications (GPS) – Inspection by Measurement of Workpieces and Measuring Equipment - Part 1: Decision rules for proving conformance or non-conformance with specifications*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [18] E. Trapet, et al., *Traceability of Coordinate Measurements According to the Method of the Virtual Measuring Machine*. Part 2 of the Final Report Project MAT1-CT94-0076, PTB-F-35, March 1999.
- [19] J.M. Baldwin, K.D. Summerhays, D.A. Campbell and R.P. Henke, *Application of Simulation Software to Coordinate Measurement Uncertainty Evaluations*. Measure, vol. 2, no. 4, 2007.
- [20] C.R. Baldo, *Desenvolvimento de estratégias para promover o uso da incerteza de medição no contexto industrial da metrologia por coordenadas*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.
- [21] H. Kunzmann, et al., *Productive Metrology: Adding Value to Manufacture*. Annals of the CIRP, Vol. 54/2/2005, pp. 691-704.
- [22] ISO/TS 15330-3:2004, *Geometrical Product Specifications (GPS) – Coordinate Measuring Machines (CMM): Techniques for Determining the Uncertainty of Measurement – Part 3: Use of Calibrated Workpieces*

- or *Standards*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [23] ISO 14660-1:1999, *Geometrical Product Specifications (GPS) – Geometrical features – Part 1: General terms and definitions*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [24] M.C. Porath, *Konstruktion und Erprobung spezieller Form-Prüfkörper und Konzeption einer Vorgehensweise zur modellbasierten Identifizierung und Quantifizierung von Einflussgrößen für die Formprüfung auf Koordinatenmessgeräten*. Dissertação de Mestrado, Werkzeugmaschinenlabor (WZL), RWTH-Aachen, 2005.
- [25] J. Raja, B. Muralikrishnan, *Computational Surface and Roundness Metrology*. Springer-Verlag London Limited, 2009.
- [26] O. Jusko, F. Lüdicke, *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: 20.01.2010.
- [27] D.J. Whitehouse, *Handbook of Surface Metrology*. Institute of Physics Publishing. Bristol, UK, Philadelphia, USA, 1994.
- [28] VDI/VDE 2617-3:1989, *Accuracy of Coordinate Measuring Machines. Characteristic Parameters and their Checking: Components of Measurements Deviation of the Machine*. VDI-Verlag, Düsseldorf, Deutschland.
- [29] E. Trapet, *Interim Checking of Coordinate Measuring Instruments – Responsibility of the User*. APMC Annual General Meeting and Workshop, Hamilton, ON, Canada, June 2005.
- [30] J. de Vicente y Oliva, A. M. Sánchez Pérez, *Requisitos de Trazabilidad en Metrología por Coordenadas*. 3er Congreso Español de Metrología, Zaragoza, Spain, mayo 2005.
- [31] D.S. Hamburg-Piekar, *Calibração de Peças Padrão em Máquinas de Medir por Coordenadas*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.
- [32] H. Kunzmann, J. Ni, F. Wäldele, *Accuracy Enhancement*. In: *Coordinate Measuring Machines and Systems*, Chapter 10, Edited by J.A. Bosch, Marcel Dekker Inc., New York, NY, USA, 1995.
- [33] H.-G. Pressel, *Genau messen mit Koordinatenmeßgeräten*. Expert Verlag, Germany, 1997.

- [34] M.C. Porath, *Correção dos erros paramétricos de máquinas de medir por coordenadas via CAA*. Comunicação pessoal, em 30.04.2010.
- [35] H.-G. Pressel, T. Hageney, *Messunsicherheit von Prüfmerkmalen in der Koordinatenmesstechnik*. Expert Verlag, Germany, 2008.
- [36] A.H. Slocum, *Precision Machine Design*. Society of Manufacturing Engineers, USA, 1992.
- [37] Renishaw. *CMM Technology Guide*. Pocket Guide. Disponível em <<http://resources.renishaw.com>>. Acessado em 20.01.2010.
- [38] R. Bernhardt, D. Imkamp, H. Müller, *Der VAST Navigator für mehr Produktivität auf Koordinatenmessgeräten*. Innovation Magazine, Carl Zeiss, 2004.
- [39] A. Napierala, *Grenzen und Potentiale des Scanning-Verfahrens bei der Erfassung von Standardgeometrieelementen*. Trabalho de Conclusão de Curso, Werkzeugmaschinenlabor (WZL), RWTH-Aachen, 1999.
- [40] P.H. Pereira, R.J. Hocken, *Characterization and compensation of dynamic errors of a scanning coordinate measuring machine*. Precision Engineering, vol. 7, 2007.
- [41] Renishaw. *Technical note for editors: The dynamics of co-ordinate measuring machines (CMMs)*. Technical Note. Disponível em: <<http://resources.renishaw.com>>. Acessado em 20.01.2010.
- [42] M. Bujara, D. Imkamp, *Acceleration of Quality Control on Coordinate Measuring Machines with “Navigator Scanning”*. Annals of the Oradea University, Fascicle of Management and Technological Engineering, Volume VI (XVI), 2007.
- [43] A. Weckenmann, T. Estler, G. Peggs, D. McMurtry, *Probing Systems in Dimensional Metrology*. Annals of the CIRP, Vol. 53, No. 2, 2004.
- [44] A. Weckenmann, *Koordinatenmesstechnik*. Lecture, Chair of Quality Management and Manufacturing Metrology, Erlangen-Nürnberg University, 2004.
- [45] M. Saunders, *Renishaw Scanning Technology*. Lecture. Disponível em <<http://resources.renishaw.com>>. Acessado em: 20.01.2010.
- [46] G. Genta, *Vibration Dynamics and Control*. Springer Science+Business Media, LLC 2009.
- [47] ia.cmm, *2nd Educational Article (Part 3): The Sensors*. Article. International Association of Coordinate Measuring Machine Manufacturers. Disponível em: <<http://resources.renishaw.com>>. Acessado em 20.01.2010.

- [48] Carl Zeiss. *CMM Sensors*. Web Page. Disponível em <<http://www.zeiss.com/imt>>. Acessado em 20.01.2010.
- [49] Leitz. *Leitz LSP Series*. Web Page. Disponível em: <http://www.leitz-metrology.com/leitz_probe_heads.shtml>. Acessado em 20.01.2010.
- [50] Renishaw, *SP80 Technical Paper*. Technical Paper. Disponível em <http://resources.renishaw.com>>. Acessado em 20.01.2010.
- [51] Renishaw. *SP25M Technical Paper*. Technical Paper. Disponível em <http://resources.renishaw.com>>. Acesado em 20.01.2010.
- [52] Mitutoyo. *Measuring Heads for Coordinate Measuring Systems*. Brochure. Disponível em <http://www2.mitutoyo.de/fileadmin/user_upload/pdf/prospekte/0ENGLISH/kmg_en/Messtaster_KMG_PRE1312.pdf>. Acessado em: 20.01.2010.
- [53] J. Ni, F. Wäldele, *Coordinate Measuring Machines*. In: Coordinate Measuring Machines and Systems, Chapter 2, Edited by J.A. Bosch, Marcel Dekker Inc., New York, NY, USA, 1995.
- [54] Carl Zeiss. *CALYPSO Operating Instructions – Option 1: CNC Curve Measuring*. Software Manual, Revision 4.6. Carl Zeiss, Oberkochen, Germany, 2007.
- [55] Brown & Sharpe. *Quindos Blades: Inspection of Turbine Blades*. Reference Manual, 2nd Edition. Brown & Sharpe, Wetzlar, Germany, 2000.
- [56] Wilcox Associates. *PC-DMIS Core Reference Manual*. Reference Manual, Version 4.4. Disponível em: < <http://www.wilcoxassoc.com>>. Acessado em: 20.01.2010.
- [57] Carl Zeiss. *Vast Navigator*. Web Page. Disponível em: <<http://www.zeiss.com/4125682000247242/ContentsWWWIntern/A17B13BD56AF34AC86256DAD00567107>>. Acessado em 07.11.2006.
- [58] E. Morrison, *The development of a prototype high-speed stylus profilometer and its application to rapid 3D surface measurement*. Nanotechnology, vol. 7, 1996.
- [59] A.J. Wheeler, A.R. Ganji, *Introduction to Engineering Experimentation*. Prentice Hall, USA, 1996.
- [60] Carl Zeiss. *Active Scanning Technology*. Web Page. Disponível em: <<http://www.zeiss.com/us/imt/home.nsf/ContentsWWWintern/29F363D5C54B6ED086256DB00064517C>>. Acessado em 07.11.2006.

- [61] R.J. Hocken, S.T. Smith, A. Muralidhar, *Frequency Response of Analog Probing Systems*. SME Conference on Precision Metrology with CMMs, Minneapolis, Minnesota, USA, 1999.
- [62] A. Woźniak, *New Method for Testing the Dynamic Performance of CMM Scanning Probes*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 56, no. 6, 2007.
- [63] G. Krajewski, A. Woźniak, *One Dimensional Kinetic Model Of CMM Passive Scanning Probes*. Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems, vol.3, no. 4, 2009.
- [64] J.B. Bryan, *Temperature Fundamentals*. In: Coordinate Measuring Machines and Systems, Chapter 8, Edited by J.A. Bosch, Marcel Dekker Inc., New York, NY, USA, 1995.
- [65] J. Ni, *Environmental Control*. In: Coordinate Measuring Machines and Systems, Chapter 9, Edited by J.A. Bosch, Marcel Dekker Inc., New York, NY, USA, 1995.
- [66] M.T. Desta, H.-Y. Feng, D. OuYang, *Characterization of general systematic form errors for circular features*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, No. 43, 2003.
- [67] T.A. Stolarski, *Tribology in Machine Design*. Butterworth-Heinemann, 2000.
- [68] M.C. Porath, *Metrologische Qualifizierung von Koordinatenmessgeräten für Mikromechanische Bauteile*. Tese de Doutorado, Werkzeugmaschinenlabor (WZL), RWTH-Aachen, Germany, 2009.
- [69] A. Küng, F. Meli, *Scanning performance with an ultraprecision μ -CMM*. Proceedings of the 6th euspen International Conference – Baden bei Wien, 2006.
- [70] P.J. Blau, *Friction Science and Technology: From Concepts to Applications*. CRC Press, FL, USA, 2009.
- [71] C. Gao, D. Kuhlmann-Wilsdorf, D. D. Makel, *The dynamic analysis of stick-slip motion*. Wear, vol. 173, no. 1-2, 1994.
- [72] Renishaw. *Precision Styli*. Brochure. Disponível em: <<http://resources.renishaw.com>>. Acessado em: 20.01.2010.
- [73] VDI/VDE 2617-2.2:1999, *Accuracy of coordinate measuring Machines. Parameters and their reverification: Form Measurement*. VDI-Verlag, Düsseldorf, Deutschland.
- [74] VDI/VDE 2631-3:2007, *Form measurement – Characteristics and selection of filters*. VDI-Verlag, Düsseldorf, Deutschland.

- [75] M. Dietzsch, C. Frenzel, M. Gerlach, S. Gröger, D. Hamann, *Consequences of the GPS standards to the assessment of surface topography*. XI International Colloquium on Surfaces, Chemnitz, 2004.
- [76] E. Ifeachor, B.W.Jervis, *Digital Signal Processing*. Pearson Education Limited, Essex, England, 2002.
- [77] ISO/TS 12780-2:2003, *Geometrical Product Specifications (GPS) - Straightness - Part 2: Specification operators*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [78] ISO/TS 12781-2:2003, *Geometrical Product Specifications (GPS) - Flatness - Part 2: Specification operators*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [79] ISO/TS 12180-2:2003, *Geometrical Product Specifications (GPS) - Cylindricity - Part 2: Specification operators*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [80] ISO/TS 12181-2:2003, *Geometrical Product Specifications (GPS) - Roundness - Part 2: Specification operators*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [81] ISO/FDIS 14406:2008, *Geometrical product specifications (GPS) – Extraction*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [82] F.L. Probst, *Data Processing Issues in the Evaluation of Roundness Deviations by Scanning on Coordinate Measuring Machines*. Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.
- [83] O. Jusko, F. Lüdicke, F. Wäldele, *High Precision Form Measurements with Coordinate Measurement Machines*. X International Colloquium on Surfaces, Chemnitz, p. 341-351, 2000.
- [84] F.A. Arenhart, G.D. Donatelli, M.C. Porath, *Minimization of the uneven sampling effects on evaluating roundness with coordinate measuring machines*. XIX IMEKO World Congress, Lisbon, Portugal, 2009.
- [85] P. Pawlus, *Digital filtering for surface texture measurement on inner cylindrical surfaces*. Measurement, vol. 24, p. 139–159, 1998.
- [86] DIN 4760, *Gestaltabweichungen*, Deutsches Institut Für Normung, Deutschland, 1982.
- [87] D.J. Whitehouse, *Improved type of wavefilter for use in surface-finish measurement*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, vol. 182, no. 3, 1967.

- [88] H. VonWeingraber, *Zur Definition der Oberflächenrauheit Werkstattstechnik*. Masch. Bau, vol. 46, 1956.
- [89] V. Srinivasan, *Discrete morphological filters for metrology*. Proceedings of the 6th IMEKO ISMQC Symposium on Metrology for Quality Control in Production, TU Wien, Austria, 1988.
- [90] ASME B46.1:2002, *Surface Texture (Surface, Roughness, Waviness and Lay)*. American Society of Mechanical Engineers, New York, USA.
- [91] ISO 11562:1996, *Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Metrological characteristics of phase correct filters*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [92] J. Raja, B. Muralikrishnan, S. Fu, *Recent advances in separation of roughness, waviness and form*. Precision Engineering, vol. 26, no. 2, 2002.
- [93] ISO 13565-1:1996, *Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface Texture: Profile Method; Surfaces Having Stratified Functional Properties – Part 1: Filtering and General Measurement Condition*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [94] ISO/TS 16610-1:2006, *Geometrical product specifications (GPS) - Filtration - Part 1: Overview and basic concepts*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [95] M. Krystek, *Form filtering by splines*. Measurement, vol. 18, no. 1, pp. 9–15, 1996.
- [96] M. Krystek, *Discrete L-spline filtering in roundness measurements*, Measurement, vol. 18, no. 2, pp. 129–138, 1996.
- [97] M. Krystek, *Discrete linear profile filters*. X International Colloquium on Surfaces, Chemnitz, pp.145–152, 2000.
- [98] ISO/TS 16610-22:2006, *Geometrical product specifications (GPS) - Filtration - Part 22: Linear profile filters: Spline filters*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [99] Carl Zeiss. *CALYPSO Operating Instructions – Basics*. Reference Manual, Revision 4.6. Carl Zeiss, Oberkochen, Germany, 2007.
- [100] S. Brinkmann, H. Bodschwinna, H.W. Lemke, *Development of a robust Gaussian regression filter for three-dimensional surface analysis*. X International Colloquium on Surfaces, Chemnitz, pp. 122–132, 2000.
- [101] T. Goto, J. Miyakura, K. Umeda, S. Kadowaki, K. Yanagi, *A robust spline filter on the basis of L2-norm*. Precision Engineering, vol. 29, no. 2, pp. 157–161, 2005.

- [102] ISO/PRF TS 16610-31:2010, *Geometrical product specifications (GPS) – Filtration – Part 31: Robust profile filters: Gaussian regression filters*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [103] Taylor-Hobson. *Robust Gaussian Filtering*. Press Release. Disponível em <<http://www.taylor-hobson.com>>. Acessado em: 20.01.2010.
- [104] ISO/TS 16610-32:2009, *Geometrical product specifications (GPS) – Filtration – Part 32: Robust profile filters: Spline filters*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [105] Mitutoyo. *Form Measurement*. In: *Measuring Instruments Catalogue 2009*. Catalogue. Disponível em <<http://www.mitutoyo.com>>. Acessado em: 20.01.2010.
- [106] ISO/TS 16610-41:2006, *Geometrical product specifications (GPS) - Filtration - Part 41: Morphological profile filters: Disk and horizontal line-segment filters*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [107] ISO/TS 16610-29:2006, *Geometrical product specifications (GPS) - Filtration - Part 29: Linear profile filters: Spline wavelets*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [108] ISO/TS 16610-49:2006, *Geometrical product specifications (GPS) - Filtration - Part 49: Morphological profile filters: Scale space techniques*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [109] M.C. Malburg, *Fitting, Filtering and Analysis: Feature Extraction in Dimensional Metrology Applications*. International Dimensional Workshop, Knoxville, Tennessee, 2002.
- [110] ISO/TS 12780-1:2003, *Geometrical Product Specifications (GPS) - Straightness - Part 1: Vocabulary and parameters of straightness*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [111] ISO/TS 12781-1:2003, *Geometrical Product Specifications (GPS) - Flatness - Part 1: Vocabulary and parameters of flatness*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [112] ISO/TS 12180-1:2003, *Geometrical Product Specifications (GPS) - Cylindricity - Part 1: Vocabulary and parameters of cylindrical form*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [113] ISO/TS 12181-1:2003, *Geometrical Product Specifications (GPS) - Roundness - Part 1: Vocabulary and parameters of roundness*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

- [114] ISO/TS 17450-2:2002, *Geometrical product specifications (GPS) - General concepts - Part 2: Basic tenets, specifications, operators and uncertainties*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [115] M.C. Malburg, *Dimensional & Surface Metrology*. Presentation. Digital Metrology Solutions Inc., 2001.
- [116] P. Bennich, *Stiller GPS Nye Krav til Måleproceduren*. Article. Disponível em <<http://www.bennich.dk/downloads/downloads.asp>>. Acessado em: 11.02.2010.
- [117] M. Busha, K. Donovan. *Filters, Outliers and Calypso*. Presentation. Carl Zeiss. Disponível em <<http://www.zeiss.de>>. Acessado em: 11.02.2010.
- [118] Carl Zeiss. *Measuring Strategies Guide*. Best practice guide. Disponível em <<https://academy.imt.zeiss.com>>. Acessado em: 11.02.2010.
- [119] VDI/VDE 2631-1:1999, *Form measurement – Principals for the measurement of geometrical deviations*. VDI-Verlag, Düsseldorf, Deutschland.
- [120] ISO 4287:1997, *Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Terms, definitions and surface texture parameters*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [121] M.C. Malburg, *Dimensional Metrology for Functional Control*. International Dimensional Workshop 2004, Nashville, TN, 2004.
- [122] D.J. Whitehouse, *Some theoretical aspects of a practical measurement problem in plateau honing*, Intl. J. Prod. Res., vol. 21, no. 2, p. 215–221, 1983.
- [123] B. Muralikrishnan, J. Raja, *Functional filtering and performance correlation of plateau honed surface profiles*. Transactions of the ASME: Journal of Manufacturing Science and Engineering, vol. 127, no. 1, pp. 193–197, 2005.
- [124] S.P. Harsha, K. Sandeep, R. Prakash, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 272, No. 3-5, p. 557-580, 2004.
- [125] Mathworks. Matlab. Version 7.4.0.287. The Mathworks, Inc., 2007.
- [126] R.G. Wilhelm, R. Hocken, H. Schwenke, *Task Specific Uncertainty in Coordinate Measurement*. Manufacturing Technology, Vol. 50, No. 2, 2001.
- [127] ISO/TS 15530-4:2008, *Geometrical Product Specifications (GPS) - Coordinate measuring machines (CMM): Technique for determining the uncertainty of measurement - Part 4: Evaluating task-specific*

- measurement uncertainty using simulation*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [128] H.N. Hansen, *A Database System for Uncertainty Estimation in Coordinate Metrology*. Proceedings of the 6th International Symposium on Metrology and Quality Control (ISMQC), pp. 215-220, Vienna, September 1998.
- [129] V.A. Ukraintsev, *Effect of bias variation on total uncertainty of CD measurements*. Proceedings of the SPIE, Vol. 5038, No. 644, 2003.
- [130] C.R. Baldo, A.J. Abackerli, G.D. Donatelli, F.A. Arenhart, *Uncertainty in 3D Metrology Integrated with the Process of Product and Measurement Realization*. Proceedings of the 10th International Symposium on Measurement and Quality Control (ISMQC), Osaka, Japan, September 2010. Aceito para publicação.
- [131] C.R. Baldo, G.D. Donatelli, *An Alternative Statistical Procedure to Estimate the Uncertainty of Coordinate Measurements Using Calibrated Workpieces*. Proceedings of the 2005 ACMC Annual Workshop, Canada, 2005.
- [132] S.D. Phillips, K.R. Eberhardt, *Guidelines for Expressing the Uncertainty of Measurement Results Containing Uncorrected Bias*. J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol., Vol. 102, 1997.
- [133] I.H. Lira, W. Wöger, *Evaluation of the uncertainty associated with a measurement result not corrected for systematic effects*. Meas. Sci. Technol. Vol. 9, 1998.
- [134] A. Maroto, R. Boqué, J. Riu, F.X. Rius, *Should non-significant bias be included in the uncertainty budget*. Accred. Qual. Assur., Vol. 7, 2002.
- [135] V. Synek, *Attempts to include uncorrected bias in the measurement uncertainty*. Talanta, Vol. 65, 2005.
- [136] G.E. O'Donnell, D.B. Hibbert, *Treatment of bias in estimating measurement uncertainty*. Analyst, Vol. 130, 2005.
- [137] B. Magnusson & S. L. R. Ellison, *Treatment of uncorrected measurement bias in uncertainty estimation for chemical measurements*. Anal Bioanal Chem, 2008.
- [138] F.A. Arenhart, G.D. Donatelli, *Incerteza de Medição em Máquinas de Medir por Coordenadas: Aspectos Relevantes na Avaliação pelo Método Experimental*. V Congresso Brasileiro de Metrologia, Salvador, 2009.
- [139] F.A. Arenhart, G.D. Donatelli, M.C. Porath, *Task-Specific Uncertainty Evaluation on Coordinate Measurements Using Multiple Calibrated*

- Workpieces*. Proceedings of the 10th International Symposium on Measurement and Quality Control (ISMQC), Osaka, Japan, September 2010. Aceito para publicação.
- [140] D.S. Ermer, R.Y. E-Hok, *Reliable Data Is an Important Commodity*, in *The Standard*. ASQ Quality Measurement Division, Vol. 97, No. 1, 1997.
- [141] D. J. Wheeler, *Advanced Topics in Statistical Process Control*. SPC Press Inc., Knoxville, Tennessee, USA, 1995.
- [142] M. Frigo, S. G. Johnson, *FFTW: An Adaptive Software Architecture for the FFT*. Proceedings of the International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Vol. 3, 1998.
- [143] Digital Metrology. Sigma Round. Version 1.11. Digital Metrology Solutions, Inc., 1999. Disponível em <<http://www.digitalmetrology.com>>. Acessado em 20.01.2010.
- [144] F.L. Probst, F.A. Arenhart, G.D. Donatelli, R. Schmitt, S. Nisch, *Outliers recognition and elimination in form measurements by contact*. Proceedings of the 10th International Symposium on Measurement and Quality Control (ISMQC), Osaka, Japan, September 2010. Aceito para publicação.
- [145] C. de Boor, *A Practical Guide to Splines*. Springer-Verlag, 1978.
- [146] F.N. Fritsch, R.E. Carlson, *Monotone Piecewise Cubic Interpolation*. SIAM J. Numerical Analysis, Vol. 17, 1980.
- [147] J. Kumar, M.S. Shunmugam, *A new approach for filtering of surface profiles using morphological operations*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, No. 46, 2006.
- [148] S.W. Smith, *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. California Technical Publishing, 1998. Disponível em: <<http://www.dspguide.com>>. Acessado em: 20.01.2010.
- [149] N.M.B.A Hamid, *A Study on the Effect of Out-Of-Roundness of Drum Brake Rotor on the Braking Force Using the Finite Element Method*. Dissertação de Mestrado, Universiti Sains Malaysia, 2007.
- [150] F.A. Arenhart, S. Nisch, M.C. Porath, G.G. Soares, *Seminário: Medição de Forma por Scanning em MMC*. Apostila, 338 quadros, Florianópolis, Fevereiro de 2010.
- [151] S. Fu, J. Raja, B. Muralikrishnan, *Engineering Surface Analysis with Different Wavelet Bases*. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 125, No. 4, 2003.

APÊNDICE A – IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO DA ANÁLISE ESTATÍSTICA DO PERFIL PARTICIONADO PARA RECONHECIMENTO E ELIMINAÇÃO DE *OUTLIERS*

Este apêndice é complementar à subseção 3.2.2 do presente trabalho. Neste apêndice é apresentada uma descrição da implementação do método da análise do perfil particionado para tratamento de *outliers*. A implementação do método é dividida em três partes: partição do perfil, análise estatística para reconhecimento e eliminação de *outliers*, e reconstrução do perfil.

Partição do perfil

A partição do perfil foi implementada utilizando três tipos diferentes de filtros multi-escala:

- Funções *wavelet* (*spline wavelets*), de acordo com a especificação técnica ISO/TS 16610-29 [107];
- Operações morfológicas alternadas (*scale-space techniques*), de acordo com a especificação técnica ISO/TS 16610-49 [108];
- Bancos de filtros passa-faixa com característica de transmissão tipo degrau, implementados no domínio da frequência (conforme descrito na subseção 3.2.5).

O método por funções *wavelet* realiza a partição de forma serial (em forma de “cascata”). A filtragem começa com a frequência de corte mais elevada, e o perfil original é dividido dois: um contendo as frequências acima (H1) e outro contendo as frequências abaixo (L1) da frequência de corte. Na operação seguinte, o perfil L1 é filtrado com a próxima frequência de corte (metade da primeira), dividindo o perfil novamente em dois (L2 e H2), e assim sucessivamente. Os perfis ‘L’ são denominados *perfis aproximação*. Os perfis que são de fato avaliados são os perfis ‘H’, denominados *perfis diferença*. O método por funções *wavelet* foi implementado utilizando o *toolbox* de *wavelet* do MATLAB [125]. As funções *wavelet* recomendadas para a partição de superfícies são a Biortogonal 6.8 (Bior6.8) e a Coiflet 4 (Coif4) [151], sendo somente a primeira utilizada na função de tratamento de *outliers* implementada no ambiente de análise.

A partição do perfil pelo método utilizando operações morfológicas alternadas é similar ao do método por funções *wavelet*, somente que a separação é realizada utilizando uma seqüência de

tamanhos de elementos estruturantes. Na implementação realizada o tamanho do elemento estruturante é definido em radianos. O primeiro elemento da série é construído com tamanho ligeiramente superior ao espaçamento entre pontos, e os demais, variando linearmente com um incremento de 0,5 radianos em relação ao anterior.

Utilizando o filtro tipo degrau, a partição é realizada de forma paralela, através de bancos de filtros passa-faixa. Devido à baixa demanda computacional desse método, a rotina foi implementada para rodar quatro vezes seguidas, com diferentes larguras de faixas ($N/10$ OPR, $N/20$ OPR, $N/30$ OPR e $N/40$ OPR, onde N é o número de pontos do perfil), gerando quatro diferentes perfis reconstruídos.

Como critério de decisão, o desvio RON_q (RMS) no intervalo de frequências entre 10 OPR e a frequência de Nyquist (de modo a remover as frequências dominantes do perfil) é calculado. O perfil que apresentar o menor desvio RON_q é considerado o melhor perfil entre os quatro.

Reconhecimento e eliminação dos *outliers*

O processo de reconhecimento e eliminação dos *outliers* pelo método da análise estatística do perfil particionado foi implementado de forma iterativa, como segue:

- Para cada faixa do perfil particionado⁵⁸, são calculados limites de corte superior e inferior, deslocados em quatro desvios padrão com relação à referência (média da faixa, com valor igual a zero);
- Os pontos que caírem fora dos limites são considerados *outliers*, e assumem amplitude igual a zero;
- Após a eliminação, os limites são recalculados para cada faixa, e uma nova rodada de eliminações é realizada;
- O procedimento termina quando nenhum *outlier* remanescente for encontrado nas faixas.

A reconstrução é realizada pela soma das faixas no domínio do espaço.

⁵⁸ Nos perfis particionados de forma serial, o perfil de aproximação remanescente (último perfil particionado da série, contendo as frequências mais baixas do perfil) não é avaliado.

APÊNDICE B – FORMULÁRIO PARA DEFINIÇÃO DOS OPERADORES DE ESPECIFICAÇÃO

Este apêndice é complementar à seção 5.2 do presente trabalho. Neste apêndice é apresentado um formulário que pode ser utilizado para orientação e documentação da definição dos operadores de especificações geométricas. O formulário encontra-se impresso no verso desta página.

FORMULÁRIO PARA DEFINIÇÃO DOS OPERADORES DE ESPECIFICAÇÃO				DQ-000
(EMPRESA)	PRODUTO:	ESPECIFICAÇÃO:	ESPECIFICAÇÃO É CRÍTICA PARA DESEMPENHO FUNCIONAL DO PRODUTO? (Sim/Não)	
DESENHO Nº:		LIMITE DE ESPECIFICAÇÃO:		
OPERAÇÃO	OPERADORES	OPERADOR FORMALMENTE DEFINIDO? (Sim/Não)	VALOR DEFINIDO	DOCUMENTO/ CRITÉRIO DE DECISÃO
Avaliação	Parâmetro geométrico [t, p, q, número de OPR, rr, tt, at, sg, sa]			
Associação	Método de associação [LS, MZ, MI, MC]			
Filtragem	Método de filtragem [ISO/TS 16610-xx]			
	Parâmetro de corte [λ, ω, diâmetro do elemento estruturante]			
	Método de extração [linhas circunferenciais, linhas retilíneas, linha helicoidal, grid]			
	Localização da extração			
	Referência para localização da extração			
Extração	Intervalo de amostragem (ou número de pontos)			
	Geometria do apalpador			
	Tamanho do apalpador			
	Força de medição			

APÊNDICE C – ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DA ESTIMATIVA INICIAL DA VELOCIDADE DE MEDIÇÃO

Este apêndice é complementar à subseção 5.3.2 do presente trabalho. Neste apêndice é apresentada a descrição de um ensaio simplificado para determinação de uma primeira estimativa da velocidade de medição, e apresentados resultados de um exemplo utilizando medições de circularidade no mancal do virabrequim de uma carcaça de compressor.

Descrição do ensaio

O ensaio consiste em realizar uma série de medições em uma peça de produção não calibrada, com diferentes velocidades de medição (mantendo-se fixos os demais parâmetros de medição, predefinidos para minimizar a incerteza de medição), e observar a partir de qual velocidade a desvio de forma começa a derivar. Essa velocidade propicia (aproximadamente) a melhor exatidão obtível para o processo de medição com o menor tempo de medição associado à mesma, e pode ser utilizada como estimativa inicial para definição do procedimento de medição:

- Selecionar uma peça e fixá-la na posição e orientação de medição (predefinidas);
- Qualificar os apalpadores (predefinidos);
- Medir a peça com velocidade baixa (1 a 5 mm/s, dependendo do equipamento e das características da peça), utilizando os parâmetros de medição predefinidos (força de medição, geração da trajetória, parâmetros de pré-processamento e parâmetros de avaliação, sobretudo o parâmetro de corte do filtro);
- Realizar uma seqüência de medições aumentando a velocidade em incrementos de 5 a 10 mm/s (dependendo do equipamento e das características da peça), sempre com dois ciclos de medição por velocidade;
- Verificar a repetitividade das medições. No caso de uma medição atípica, realizar um terceiro ciclo de medição, e descartar um dos anteriores;
- Plotar os valores do desvio de forma (média das duas repetições) em função da velocidade de medição;

- Observar em qual velocidade começa a ocorrer um aumento significativo no desvio de forma calculado (conjuntamente, analisar os gráficos do perfil e do espectro do perfil).

Exemplo do ensaio aplicado em uma peça real

Este ensaio foi proposto em e testado em um seminário sobre medição de forma por *scanning* em MMC, apresentado para metrologistas industriais [150]. A peça utilizada para a demonstração do ensaio foi uma carcaça de compressor (Figura 87), e a especificação a ser avaliada é a circularidade (conforme quadro de especificação apresentado na figura) do mancal do virabrequim (cilindro interno, diâmetro nominal de 19 mm).



Figura 87 – Carcaça de compressor utilizada no ensaio. Fonte: Autor.

Os operadores de especificação fornecidos (ou definidos conforme recomendações normativas, quando sim entre parênteses) foram:

- Parâmetro geométrico: $RONt$ (ISO 1101 [1]);
- Limite de especificação: 0,005 mm;
- Elemento de referência: círculo por mínima zona (MZCI);
- Método de filtragem: Gaussiano linear (ISO/TS 12181-2 [80]);
- Frequência de corte do filtro: 50 OPR;
- Máximo diâmetro admissível do apalpador: 5 mm.

Os parâmetros de aquisição não relacionados ao tempo de medição foram previamente escolhidos, conforme segue:

- Orientação: eixo do mancal alinhado ao eixo Z da MMC;
- Posição: centro da MMC;
- Configuração de apalpadores: apalpador com 50 mm de comprimento, sem extensões, com rigidez aprox. de 60 N/mm;
- Diâmetro do apalpador: 5 mm;
- Força de contato: *default* (0,1 N);
- Número de pontos por perfil: máxima permitida pelo controlador para cada velocidade de medição;
- Eliminador de *outliers*: ativado, pelo método multi-escala com filtro tipo degrau.

A Figura 88 mostra os resultados dos desvios de forma obtidos para as diferentes velocidades de medição ensaiadas, e a Figura 89, a análise dos perfis para algumas das velocidades.

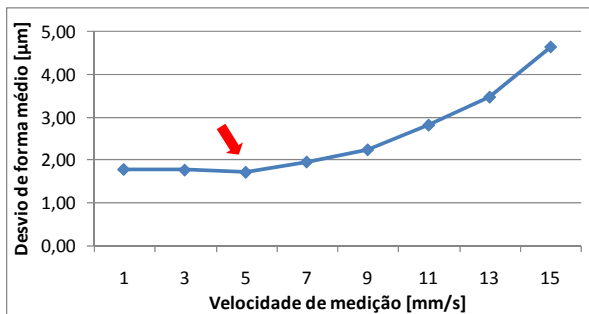


Figura 88 – Desvios de circularidade obtidos para as diferentes velocidades de medição ensaiadas. Fonte: Autor.

Pelo gráfico dos desvios de forma em função da velocidade de medição, pode-se perceber que para velocidade acima de 5 mm/s, o desvio de circularidade começa a aumentar. A partir dessa análise, pode-se inferir que a partir da velocidade de 5 mm/s, o processo de medição deixa de operar na condição de melhor exatidão.

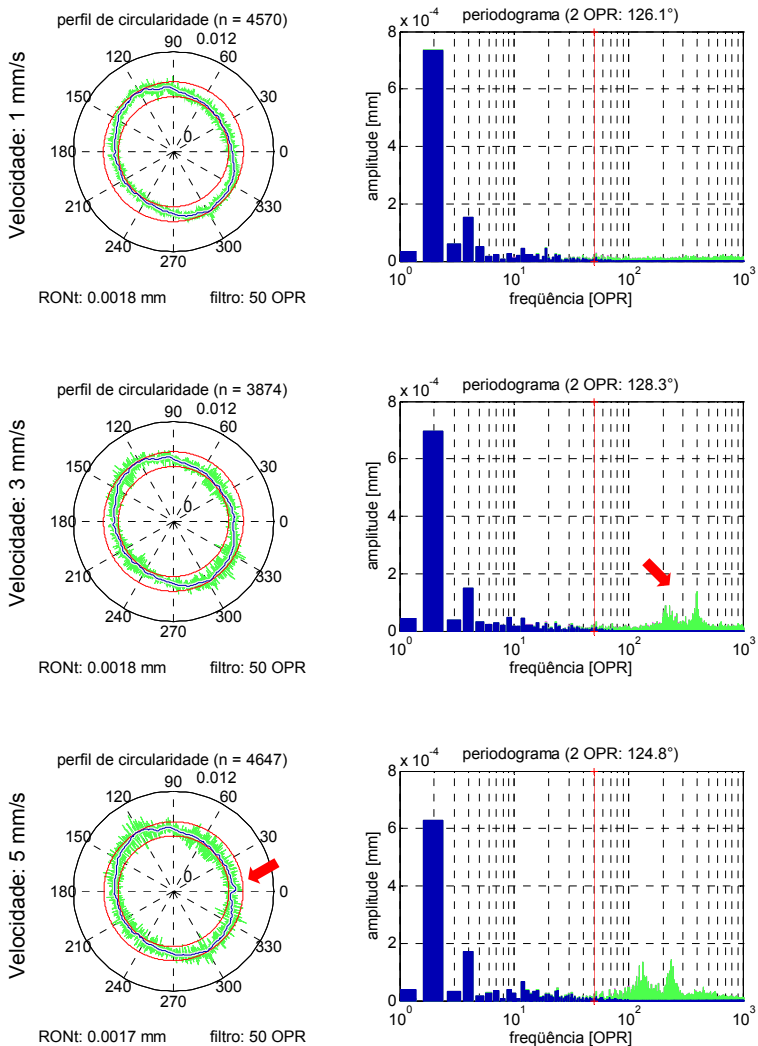


Figura 89 – Gráficos polares e periodogramas dos perfis obtidos para algumas das velocidades de medição ensaiadas. Fonte: Autor.

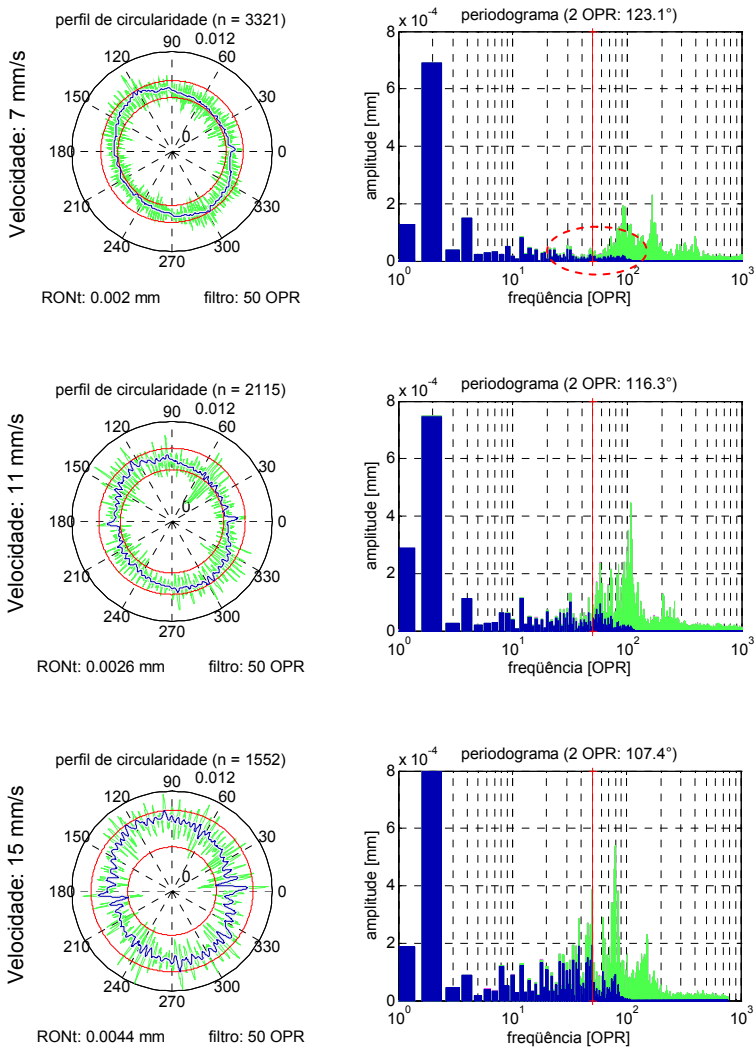


Figura 89 (continuação) – Gráficos polares e periodogramas dos perfis obtidos para algumas das velocidades de medição ensaiadas. Fonte: Autor.

Utilizando-se o ambiente de análise, foi realizada a análise dos perfis adquiridos, onde se pode observar um conjunto de fenômenos, conforme segue:

- Na velocidade de 1 mm/s, não podem ser identificados comportamentos anômalos evidentes;

- Na velocidade de 3 mm/s, pode-se observar (pelo periodograma) o surgimento de ruído no espectro, estando o mesmo, entretanto, completamente contido na região de atenuação do filtro digital;
- Na velocidade de 5 mm/s, pode-se perceber (pelo gráfico polar) a formação desvios localizados ao longo do eixo 0-180° (sem que o mesmo influencie, entretanto, o valor de circularidade $RONt$ observado);
- Na velocidade de 7 mm/s, o ruído começa a distorcer os componentes harmônicos não atenuados pelo filtro digital, e um aumento perceptível do desvio de circularidade ocorre;
- Na velocidade de 11 mm/s, os desvios localizados ao longo do eixo 0-180° começam a influenciar diretamente o valor de circularidade $RONt$ observado, e o ruído insere ainda mais distorções nos perfis;
- Na velocidade de 15 mm/s, o perfil se encontra completamente distorcido pelos erros de medição.

Os desvios localizados ocorrem no momento da inversão do sentido da velocidade do eixo X da MMC, provavelmente devido a folgas mecânicas na estrutura (gerando histerese). Como o diâmetro é relativamente pequeno, as acelerações sobre a estrutura são relativamente elevadas, mesmo para velocidades baixas.

Como a peça não é calibrada, não se pode afirmar nada sobre a tendência devido à interferência entre o perfil da peça e o perfil de erro da MMC para cada velocidade. Contudo, é evidente que o processo de medição para velocidades acima de 3 mm/s produz erros de medição significativos (embora não se possa observar este fato pela análise do desvio de circularidade $RONt$ apenas).

Caso o processo de produção não apresente uma variação expressiva do conteúdo harmônico (Processo tipo 'A' de acordo com classificação apresentada na seção 4.3), e as peças sejam fixadas na MMC de modo sistemático (orientação angular fixa, consistindo em uma Situação tipo 'A'), o uso de uma velocidade de 5 mm/s pode ser utilizada sem prejuízo significativo com relação à exatidão do processo de medição para avaliação do desvio de circularidade $RONt$. Contudo, se o processo de produção e o procedimento de fixação da peça resultarem em uma Situação tipo 'B' ou 'C', pode ocorrer que os extremos funcionais de alguns dos perfis coincidam com os desvios localizados inseridos pela MMC, resultando em erros na avaliação da circularidade pelo parâmetro $RONt$.