Francisco Augusto Arenhart

Avaliação do Desempenho Metrológico de Processos de Medição de Forma por *Scanning* com Base na Incerteza de Medição

Florianópolis, julho de 2009

Avaliação do Desempenho Metrológico de Processos de Medição de Forma por Scanning com Base na Incerteza de Medição

Trabalho submetido à ABCM para participação do Prêmio ABCM-Yehan Numata, edição 2009.

Autor: Francisco Augusto Arenhart, mestrando do curso de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientadores:

Prof. Gustavo Daniel Donatelli, Dr. Eng. Crhistian Raffaelo Baldo, Dr. Eng

Florianópolis, julho de 2009

Resumo

Este trabalho apresenta uma proposta para avaliação do desempenho metrológico orientada à otimização de processos de medição de forma por *scanning* em máquinas de medir por coordenadas (MMC). O critério de avaliação do desempenho é baseado na incerteza de medição e na variabilidade das tarefas específicas de medição de forma.

Para a obtenção das estimativas de incerteza de medição é proposto um método experimental baseado no uso de múltiplas peças padrão calibradas. Esse método permite avaliar com um único procedimento todas as fontes de incerteza significativas nesse tipo de medição. O modelo estatístico utilizado nas avaliações de incerteza foi validado por Simulação de Monte Carlo (SMC).

Para uma avaliação automatizada, demandando mínimo envolvimento dos analistas, foi criado um ambiente computacional que utiliza como entrada as nuvens de pontos de adquiridos dos perfis, e fornece como saída a incerteza da tarefa específica de medição. O ambiente desenvolvido possui um conjunto de ferramentas gráficas e estatísticas desenvolvidas para prover informações detalhadas sobre o processo de medição, possibilitando a otimização deste quanto à redução da incerteza ou ao aumento da velocidade de medição. O ambiente possui ainda ferramentas desenvolvidas para lidar com duas situações típicas das medições por *scanning* em MMC: a presença de pontos atípicos e o espaçamento não uniforme dos pontos adquiridos.

Foi também realizado um estudo de caso envolvendo uma MMC pertencente a uma empresa fornecedora do segmento automotivo e um laboratório prestador de serviços, usando peças de produção calibradas com baixa incerteza. Através destes estudos demonstrou-se que a abordagem proposta é metrologicamente consistente e operacionalmente eficaz na avaliação e redução da incerteza de medição de forma por *scanning* em MMC.

Conteúdo

1	Intr	odução	1
	1.1	AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO METROLÓGICO DOS SISTEMAS	DE
	MEDI	ÇÃO	3
	1.2	MELHORIA DOS PROCESSOS DE MEDIÇÃO ATRAVÉS DO GANHO	DE
	CON	HECIMENTO	6
	1.3	OBJETIVOS DO TRABALHO	8
	1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	8
2	Me	dição de Forma por <i>Scanning</i> em MMCs	.11
	2.1	FILTRAGEM DIGITAL	.13
	2.2	FILTRAGEM MECÂNICA	.19
	2.3	DISCRETIZAÇÃO: O TEOREMA DA AMOSTRAGEM	20
	2.4	INTERPOLAÇÃO	22
	2.5	ELIMINAÇÃO DE OUTLIERS	24
	2.6	FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DA MMC	25
2			200
3	Mé	todo para Avaliação da Incerteza de Medição Utilizando Múltiplas Peç	,as
з С	Mé alibra	todo para Avaliação da Incerteza de Medição Utilizando Múltiplas Peç das	,as .32
з С	Mé alibrao 3.1	todo para Avaliação da Incerteza de Medição Utilizando Múltiplas Peç das REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA	. 32 . 33
S C	Mé alibrad 3.1 3.2	todo para Avaliação da Incerteza de Medição Utilizando Múltiplas Peç das REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA VARIAÇÃO DA TENDÊNCIA ENTRE PEÇAS	32 33 33 37
3 C	Mé alibrad 3.1 3.2 3.3	todo para Avaliação da Incerteza de Medição Utilizando Múltiplas Peç das REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA VARIAÇÃO DA TENDÊNCIA ENTRE PEÇAS PROPOSTA DO MÉTODO	. 32 . 33 . 37 . 40
S C	Mé alibrao 3.1 3.2 3.3 3.4	todo para Avaliação da Incerteza de Medição Utilizando Múltiplas Peç das REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA VARIAÇÃO DA TENDÊNCIA ENTRE PEÇAS PROPOSTA DO MÉTODO RESULTADOS	. 32 . 33 . 37 . 40 . 44
S C	Mé alibra 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5	todo para Avaliação da Incerteza de Medição Utilizando Múltiplas Peç das REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA VARIAÇÃO DA TENDÊNCIA ENTRE PEÇAS PROPOSTA DO MÉTODO RESULTADOS CONSIDERAÇÕES SOBRE O MÉTODO	. 32 . 33 . 37 . 40 . 44 . 51
C	Mé alibrae 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 3.6	todo para Avaliação da Incerteza de Medição Utilizando Múltiplas Peç das REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA VARIAÇÃO DA TENDÊNCIA ENTRE PEÇAS PROPOSTA DO MÉTODO RESULTADOS CONSIDERAÇÕES SOBRE O MÉTODO ANÁLISES ADICIONAIS	. 32 . 33 . 37 . 40 . 44 . 51 . 52
3 C 4	Mé alibrae 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 3.6 Am	todo para Avaliação da Incerteza de Medição Utilizando Múltiplas Peç das REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA VARIAÇÃO DA TENDÊNCIA ENTRE PEÇAS PROPOSTA DO MÉTODO RESULTADOS CONSIDERAÇÕES SOBRE O MÉTODO ANÁLISES ADICIONAIS abiente de Análise para Avaliação da Medição de Perfis por <i>Scanning</i> .	. 32 . 33 . 33 . 37 . 40 . 44 . 51 . 52 . 56
3 C 4	Mé alibra 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 3.6 Arr 4.1	todo para Avaliação da Incerteza de Medição Utilizando Múltiplas Peç das REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA VARIAÇÃO DA TENDÊNCIA ENTRE PEÇAS PROPOSTA DO MÉTODO RESULTADOS CONSIDERAÇÕES SOBRE O MÉTODO ANÁLISES ADICIONAIS Ibiente de Análise para Avaliação da Medição de Perfis por <i>Scanning</i> . FERRAMENTAS DE ANÁLISE	.32 .33 .37 .40 .44 .51 .52 .56
3 C 4	Mé alibra 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 3.6 Am 4.1 4.2	todo para Avaliação da Incerteza de Medição Utilizando Múltiplas Peç das REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA VARIAÇÃO DA TENDÊNCIA ENTRE PEÇAS PROPOSTA DO MÉTODO RESULTADOS CONSIDERAÇÕES SOBRE O MÉTODO ANÁLISES ADICIONAIS Ibiente de Análise para Avaliação da Medição de Perfis por <i>Scanning</i> . FERRAMENTAS DE ANÁLISE ROTINAS DE PROCESSAMENTO	.32 .33 .37 .40 .44 .51 .56 .56 .62
3 C 4	Mé alibrad 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 3.6 Am 4.1 4.2 4.3	todo para Avaliação da Incerteza de Medição Utilizando Múltiplas Peç das REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA VARIAÇÃO DA TENDÊNCIA ENTRE PEÇAS PROPOSTA DO MÉTODO RESULTADOS CONSIDERAÇÕES SOBRE O MÉTODO ANÁLISES ADICIONAIS Ibiente de Análise para Avaliação da Medição de Perfis por <i>Scanning</i> . FERRAMENTAS DE ANÁLISE ROTINAS DE PROCESSAMENTO CONSIDERAÇÕES SOBRE O AMBIENTE DE ANÁLISE	. 32 . 33 . 37 . 40 . 44 . 51 . 52 . 56 . 62 . 66
3 C 4 5	Mé alibra 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 3.6 Arr 4.1 4.2 4.3 Est	todo para Avaliação da Incerteza de Medição Utilizando Múltiplas Peç das REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA VARIAÇÃO DA TENDÊNCIA ENTRE PEÇAS PROPOSTA DO MÉTODO RESULTADOS CONSIDERAÇÕES SOBRE O MÉTODO ANÁLISES ADICIONAIS Ibiente de Análise para Avaliação da Medição de Perfis por <i>Scanning</i> . FERRAMENTAS DE ANÁLISE ROTINAS DE PROCESSAMENTO CONSIDERAÇÕES SOBRE O AMBIENTE DE ANÁLISE	. 32 . 33 . 37 . 40 . 44 . 51 . 52 . 56 . 62 . 66 . 68
3 C 4	Mé alibrad 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 3.6 Arr 4.1 4.2 4.3 Est 5.1	todo para Avaliação da Incerteza de Medição Utilizando Múltiplas Peç das REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA VARIAÇÃO DA TENDÊNCIA ENTRE PEÇAS PROPOSTA DO MÉTODO RESULTADOS CONSIDERAÇÕES SOBRE O MÉTODO ANÁLISES ADICIONAIS ibiente de Análise para Avaliação da Medição de Perfis por <i>Scanning</i> . FERRAMENTAS DE ANÁLISE ROTINAS DE PROCESSAMENTO CONSIDERAÇÕES SOBRE O AMBIENTE DE ANÁLISE tudo de Caso ESTUDO DE CASO: CIRCULARIDADE EM UM TAMBOR DE FREIO	.32 .33 .37 .40 .44 .51 .52 .56 .62 .66 .68 .69
3 C 4 5 6	Mé alibra 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 3.6 Arr 4.1 4.2 4.3 Est 5.1 Co	todo para Avaliação da Incerteza de Medição Utilizando Múltiplas Peç das REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA VARIAÇÃO DA TENDÊNCIA ENTRE PEÇAS PROPOSTA DO MÉTODO RESULTADOS CONSIDERAÇÕES SOBRE O MÉTODO ANÁLISES ADICIONAIS abiente de Análise para Avaliação da Medição de Perfis por <i>Scanning</i> . FERRAMENTAS DE ANÁLISE ROTINAS DE PROCESSAMENTO CONSIDERAÇÕES SOBRE O AMBIENTE DE ANÁLISE tudo de Caso ESTUDO DE CASO: CIRCULARIDADE EM UM TAMBOR DE FREIO nsiderações Finais	.32 .33 .37 .40 .44 .51 .52 .56 .62 .66 .68 .69 .76

1 Introdução

A avaliação de conformidade com as especificações geométricas de produto -GPS [1] (ou tolerâncias geométricas e dimensionais - 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, tornado possível a avaliação integrada da geometria das peças em um único equipamento.

Nas suas diferentes variantes, as MMC podem ser utilizadas em medições de apoio a P&D, na medição de ferramental e na calibração de padrões e peças de referência, tarefas que requerem elevada exatidão e rápida adaptabilidade, mas também na inspeção de produção, quando o tempo de medição é uma variável de importância fundamental.

A informação que descreve a superfície da peça pode ser adquirida com diferentes tecnologias, destacando-se entre elas 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 na superfície de uma característica geométrica 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

1

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.

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 velocidade de *scanning* e da trajetória seguida pelo sensor, sendo então específicos da tarefa. Dentre eles, podemos citar as características dinâmicas da máquina e do cabeçote de medição, a rigidez e amortecimento interno da haste do sensor, o comportamento tribológico do conjunto sensor-peça e do próprio comando numérico, entre outros.

Desta forma, a determinação dos parâmetros de medição por scanning é geralmente uma tarefa complexa, a ser executada por planejadores com experiência no tema. Ainda que alguns fabricantes de MMC já tenham introduzido sistemas de suporte à definição dos parâmetros de medição por scanning nos seus softwares de medição, 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 provar sua capacidade (e.g. saber se a *regra de ouro da metrologia*¹ é ou não atendida).

Mesmo de posse de uma sistemática para avaliação da incerteza, há ainda aspectos que precisam ser resolvidos para viabilizar a otimização das medições por *scanning*. Para superar desafios tais como diminuir o tempo de medição ou diminuir a incerteza é necessário compreender profundamente a dinâmica do sinal obtido na medição e sua relação com as causas do erro. Infelizmente, esse conhecimento não está ao alcance dos planejadores e operadores de MMC.

As necessidades e limitações acima citadas definem um campo para pesquisa 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, a avaliação do desempenho metrológico orientada à otimização 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 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO METROLÓGICO DOS SISTEMAS 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. Os objetivos das medições realizadas nesse contexto normalmente são a avaliação da conformidade do produto e o controle estatístico e avaliação da capacidade dos processos de produção.

¹ A *regra de ouro da metrologia* estabelece que a relação entre a incerteza de medição e a tolerância do característico deve ser menor que 1/10 para que a medição possa ser considerada capaz.

Para assegurar a qualidade das medições é necessário avaliar o desempenho do sistema de medição ao realizar as tarefas para os quais eles são designados, atendendo aos requisitos metrológicos definidos nas etapas de projeto de produto e processo [3]. Em particular, a especificação técnica ISO/TS 16949, 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"* [4].

Para o atendimento deste requisito, utiliza-se geralmente o manual de Análise de Sistemas de Medição (MSA) [5], que apresenta um conjunto de métodos estatísticos para analisar distintos comportamentos estatísticos do erro 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 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 adeguabilidade 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 norteamericana, 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 na necessidade de avaliar a incerteza, como requisito para provar

a rastreabilidade dos resultados de medição [6]. 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 (ISO GUM) [7] fornece orientações para a avaliação da incerteza de medição pelo método dos coeficientes de sensibilidades (e seu suplemento numérico [8], pela 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 [9]. 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.

Na vertente ISO, o subsídio para determinar quando a incerteza de medição é pequena o suficiente poderia ser buscado na norma ISO 10012 [10], que orienta a implementação de sistemas de gestão da medição. A norma define o termo confirmação metrológica como "o conjunto de operações necessárias para garantir que o equipamento de medição atende os requisitos definidos pelo uso". A ISO 10012 ainda afirma que a confirmação metrológica "... geralmente inclui a calibração e verificação, qualquer ajuste ou reparo necessário e a recalibração subseqüente, a comparação com requisitos

5

metrológicos determinados pelo uso e também qualquer identificação necessária". Sobre estes requisitos, estabelece que "... incluem a faixa de medição, a resolução e o erro máximo permissível". Infelizmente, estes são requisitos aplicáveis ao equipamento de medição mais do que ao processo de medição como um todo. Então, a norma ISO 10012 não diz respeito à relação do processo de medição com as especificações do produto a ser controlado, mas à relação do equipamento de medição com as suas próprias especificações.

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 carece de critérios outros que a já mencionada "*regra de ouro*" para definir a capacidade de um processo de medição.

Pelas razões acima, o presente trabalho focará na avaliação da incerteza para tarefas de medição de forma por *scanning* em MMC, 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, tais como o *R&R*, de ampla aplicação no meio industrial Brasileiro e no mundo todo.

1.2 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 desenvolvimento 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* [11].

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 sistemas

de medição e os benefícios que podem ser obtidos com o uso da informação de melhor qualidade.

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 de medições realizadas com a incerteza adequada, mas também de informação e conhecimento sobre o sistema de causas de variação do processo fabril.

O mesmo conceito pode ser aplicado à otimização dos processos de medição foco deste trabalho. 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 dessa otimização deve ser reduzir simultaneamente a incerteza e o tempo de medição. Dada a natureza conflitante de ambos indicadores, é necessário um apurado conhecimento do processo de medição para achar o ponto de equilíbrio.

A avaliação de incerteza de medição nem sempre fornece as informações necessárias para atuar nas causas do erro de medição com fins de melhoria. Particularmente em processos de medição complexos, como a medição de forma por *scanning* em MMC, é comum utilizar procedimentos experimentais para avaliar a variação existente entre medições repetidas. Esses procedimentos podem ser denominados "de caixa preta", porquanto a variação percebida decorre de um conjunto de causas, muitas vezes difíceis de individualizar.

Assim, é necessário flanquear a avaliação de incerteza com sistemas que permitam analisar os dados coletados, permitindo revelar comportamentos passiveis de melhoria.

7

1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo geral do trabalho é fornecer uma base técnico-científica que permita otimizar o processo de medição de forma por *scanning* em MMC, utilizando a incerteza de medição como principal indicador do desempenho metrológico.

Os objetivos específicos são:

- Melhorar o conhecimento existente sobre o sistema de causas do erro na medição de forma por *scanning* em MMC.
- Analisar criticamente as diferentes abordagens existentes para avaliar a incerteza de medição em MMC usando o método experimental, identificando a abordagem mais adequada desde o ponto de vista da probabilidade de abrangência e o intervalo de incerteza.
- Criar um ambiente computacional para avaliar a incerteza e caracterizar o comportamento dinâmico das medições de forma, considerando efeitos tais como a identificação e filtragem de *outliers* e o espaçamento não uniforme.
- Aplicar a solução desenvolvida a um caso real, analisando seu desempenho metrológico e operacional.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O conhecimento da tecnologia e dos princípios envolvidos em uma medição de forma por *scanning* é imprescindível para interpretar a informação disponível de modo a propor melhorias no procedimento de medição. No Capítulo 2 será realizada uma revisão dos processos de aquisição e processamento dos sinais que representam as superfícies em avaliação, com foco nas operações envolvidas nesse processo, e nos parâmetros de medição associados.

No Capítulo 3, será apresentada uma proposta de avaliação do desempenho metrológico de processos de medição por coordenadas. O método utilizado é baseado na especificação técnica ISO/TS 15530-3 [12], a qual orienta a

avaliação de incerteza de medição pelo método experimental utilizando peças padrão calibradas. Para avaliação de todas as componentes significativas da incerteza normalmente presentes nos processos de medição por coordenadas a partir de um único procedimento de avaliação, é proposto o uso de múltiplas peças padrão calibradas. Para o cálculo de incerteza de medição a partir dos resultados gerados no uso desse método é apresentado um modelo estatístico, o qual terá sua validação efetuada por simulações de Monte Carlo. Uma proposta para análise da variabilidade do sistema de medição em relação à variabilidade do processo também será conduzida. Os resultados serão apresentados e discutidos, e a partir destes, pode-se concluir a respeito da aplicabilidade do método proposto, e da validade do modelo estatístico para o escopo medição por coordenadas.

No Capítulo 4, será apresentado o ambiente para processamento dos resultados de medição de circularidade, em desenvolvimento. Esse ambiente permite avaliar os requisitos metrológicos do sistema de medição a partir das nuvens de pontos geradas na aquisição de linhas circunferenciais extraídas. Para fazer uso da informação de alto valor agregado disponível nessas nuvens de pontos, um conjunto de ferramentas gráficas e estatísticas foi implementado. O ambiente também possui ferramentas desenvolvidas para lidar com duas situações típicas de medições por *scanning*: a presença de pontos atípicos e o espaçamento não uniforme dos pontos adquiridos por máquinas de medição por coordenadas.

No Capítulo 5, serão apresentados os resultados de um estudo de caso utilizando uma MMC de suporte à produção de uma empresa fornecedora do segmento automotivo e um laboratório de referência, a partir de peças de linha de produção calibradas contendo características de forma. Os experimentos foram divididos em duas etapas. Na primeira, as medições nas peças calibradas foram realizadas com as estratégias de aquisição e processamento dos dados utilizadas nas avaliações da produção. A partir disso, foi iniciado um ciclo PDCA para otimização dos processos de medição com redução da incerteza de medição (quando necessário) e dos tempos de medição (quando possível).

9

Por fim, o Capítulo 6 apresenta discussões e conclusões sobre os resultados obtidos.

2 Medição de Forma por Scanning em Máquinas de Medir por Coordenadas

O modelo de casca (*skin model*) introduzido pela ISO 14460-1 [13], define os elementos geométricos disponíveis para o projeto de uma peça como: ponto, linha, plano, círculo, esfera, cilindro, cone e tóro. De acordo com esse modelo, em uma peça real, não existem tais elementos, existindo apenas o termo *superfície real da peça*.

Nos processos de medição de forma, o sinal de entrada é a superfície real da peça sendo avaliada, limitada, contudo, ao percurso de varredura executado pelo apalpador. Esse sinal analógico deve ser adquirido, discretizado, transmitido e armazenado em formato digital para posterior processamento. Durante este processo, ocorrem transformações desse sinal (intencionais ou não), de modo que o sinal de saída resulta em uma representação distorcida da superfície real sendo avaliada. Os erros de medição provocam transformações não intencionais sobre o sinal, com efeitos não desejáveis (distorções). Esse processo é aqui denominado *processo de aquisição*.

Após o armazenamento, esse sinal será intencionalmente alterado, com o objetivo de minimizar os efeitos das transformações indesejadas no processo de aquisição, ou para cumprir requisitos das especificações geométricas. Essa etapa do processo de medição é aqui denominada *processamento*. Por fim, o os parâmetros geométricos são obtidos do sinal, fornecendo ao avaliador a informação requerida qualificar a superfície real da peça sendo avaliada. Esse processo é aqui denominado *processo de avaliação*. O modelo do processo de medição completo é resumido na Figura 1.



Figura 1 – Modelo de aquisição, processamento e avaliação de um sinal de medição de forma (termos linha circunferencial extraída e perfil de circularidade são específicos para avaliação de circularidade [17]).

De acordo com o modelo de casca, o sinal de saída resultante do processo de aquisição é denominado, genericamente, de *elemento integral extraído*. As normas ISO 12780-1 [14], ISO 12781-1 [15], ISO 12180-1 [16] e 12181-1 [17], trazem termos, definições e parâmetros específicos para avaliações de retitude, planeza, cilindricidade e circularidade, respectivamente. Como descrito nessas normas, após a filtragem digital, a linha extraída passa a se chamar *perfil de retitude*, a linha circunferencial extraída passa a se chamar *perfil de retitude*, e a superfície extraída passa a se chamar *superfície de planeza* (ou *de cilindricidade*). Para medição de forma, são recomendados pela

ISO 1101 [1] os algoritmos por mínima zona, e o parâmetro geométrico a ser avaliado é a dimensão *t* da própria zona.

A influência das operações de transformação do sinal sobre os resultados de medição pode ser controlada (direta ou indiretamente, e em maior ou menor grau) pelo avaliador. Os parâmetros associados às operações de transformação devem ser selecionados de acordo com as especificações de projeto (p. ex. tipo de ajuste matemático), com os requisitos metrológicos sobre o sistema de medição (p.ex. incerteza máxima permissível) e com o tempo necessário para a execução da medição. Da definição desses parâmetros resulta o procedimento de medição. Uma vez definido, o procedimento de medição deve ser validado [18], pois tem influência direta sobre os resultados de medição. A validação do procedimento de medição pode ser realizada a partir da confirmação metrológica.

A documentação de um processo de medição por coordenadas deve conter orientação sobre todas as etapas do processo de medição. Além das etapas mencionadas, fazem parte do processo de medição as atividades de preparação da medição, tais como estabilização térmica das peças, limpeza das peças e dos apalpadores, periodicidade de qualificação dos apalpadores, dispositivos de fixação das peças, etc.

2.1 FILTRAGEM DIGITAL

Filtragem digital é utilizada para separar e analisar separadamente as componentes de ondas curtas (rugosidade) e ondas longas (forma) dos elementos extraídos das superfícies. A Figura 2 mostra a composição de perfis de acordo com a norma DIN 4760 [19]. A motivação para esse tipo de classificação vem do fato que rugosidade, ondulação e forma têm diferentes origens a afetam o desempenho funcional das peças de maneira distinta [20].

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 máquina-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-frerramenta, da ferramenta ou da peça				
3ª ordem: Rugosidade	Ranhuras	Forma do gume da ferramente, velocidade de avanço ou profundidade de corte				
4ª ordem: Rugosidade	Estria Escamas Ressaltos	Processo de deformação de cavaco (cavaco arrancado ou cisalhado, gume postiço), deformação do material por jato de areia, ressaltos por tratamento galvânico				
5º ordem: Rugosidade Não mais representável graficamente de forma simples	Estrutura	Processo de cristalização, modificação da superfície por ação química, corrosão				
6 ^a 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 2 - Classificação de desvios. Adaptado de [19].

Os primeiros filtros utilizados com o intuito de separar componentes de diferentes comprimentos de onda foram os eletrônicos, utilizados em medição de rugosidade. Esses filtros eram compostos de uma rede formada por dois capacitores e dois resistores (2RC). Esses filtros, por possuírem memória, introduziam uma distorção de fase distinta para cada comprimento de onda, inserindo uma distorção no perfil. Com o intuito do estudar esse comportamento dos filtros 2RC, surgiram os filtros 2RC digitais, e logo em seguida, os filtros 2RC com correção de fase [21]. Com o aumento da capacidade de processamento, os filtros 2RC digitais rapidamente ganharam o mercado. O filtro 2RC é um filtro do tipo linha média (*M system*), e sua característica de transmissão depende somente do comprimento de onda. Com a introdução do filtro Gaussiano, o filtro 2RC tem caído em desuso.

Paralelamente, uma técnica alternativa vinha sendo estudada [22], a qual considerava a funcionalidade das superfícies de contato (p.ex. montagens e deslizamento entre superfícies). O filtro consistia em simular o deslizamento de uma esfera rolando sobre a superfície, resultando em um perfil que representava o envelope do perfil original. A diferença entre o perfil original e o

envelope resultava no perfil de rugosidade. Esse filtro é do tipo envelope (*E system*), e sua característica de transmissão depende do comprimento de onda e da amplitude da onda.

2.1.1 Filtro Gaussiano

Um significativo avanço no campo da filtragem digital foi dado com a introdução do filtro de Gauss [23]. Esse filtro, linear, não apresenta distorção de fase relativa entre as diferentes componentes de freqüência. Outra característica chave é que o filtro Gaussiano apresenta 50% de transmissão no comprimento de corte, sendo que para um mesmo comprimento de corte, o filtro passabaixas é complementar do passa-altas. A função peso (definição do filtro no domínio do tempo ou do espaço) do filtro Gaussiano é apresentada na Equação 1,

$$S(x) = \frac{1}{\alpha \lambda_c} \exp\left[-\pi \left(\frac{x}{\alpha \lambda_c}\right)^2\right]$$
(Eq. 1)

onde $\alpha = \sqrt{\ln 2/\pi} = 0,4697$ para 50% de transmissão no comprimento de corte, *x* é a posição à partir da origem da função peso e λ_c é o comprimento de corte. A característica de transmissão (definição do filtro no domínio do tempo ou do espaço, Equação 2) é obtida pela transformação de Fourier da função contínua *S*(*x*).

$$Sf(\lambda) = \exp\left[-\pi\left(\alpha \frac{\lambda_c}{\lambda}\right)^2\right]$$
 (Eq. 2)

A Figura 3 mostra as características de transmissão dos filtros Gaussianos utilizados para separação de rugosidade, ondulação e forma (ou forma com ondulação). Pode-se notar a característica complementar entre os filtros passabaixas e os filtros passa-altas para mesma freqüência de corte.



Figura 3 - Espectro de comprimentos de onda mostrando as características de transmissão do filtro Gaussiano utilizado para separação de rugosidade, ondulação e forma. Adaptado de [29].

2.1.2 Filtro Gaussiano para circularidade

No caso de medições de circularidade, é usual expressar os parâmetros de filtro em freqüência. As freqüências em perfis circulares são definidas pelo número de comprimentos de onda por revolução, ou simplesmente, ondas por revolução (OPR). A Equação 3 descreve essa relação.

$$f_c(OPR) = \frac{\pi.\emptyset}{\lambda_c}$$
(Eq. 3)

A característica de transmissão do filtro Gaussiano para perfis circulares é descrita na Equação 4,

$$S(\omega) = \exp\left[-\pi \left(\frac{\alpha.\omega}{\omega_c}\right)^2\right]$$
 (Eq. 4)

onde ω_c é a freqüência de corte do filtro. As freqüências nos perfis de circularidade têm relação direta com o número de lóbulos apresentados pelo perfil (1 OPR = perfil excêntrico; 2 OPR = perfil ovalizado; 3 OPR = perfil trilobulado, etc.)

2.1.3 Seleção de parâmetros de filtragem

As normas ISO 12780-2 [24], ISO 12781-2 [25], ISO 12180-2 [26] e ISO 12181-2 [27] definem parâmetros de filtragem para medições de retitude, planeza, cilindricidade e circularidade, respectivamente. Os comprimentos e as freqüências de corte são normalizados, e seus valores são apresentados na Tabela 1.

Comprimentos de corte (mm)	Freqüências de corte (OPR)	Diâmetro nominal (mm)
8	15	Ø ≤ 8
2,5	50	8 < Ø ≤ 25
0,8	150	25 < Ø ≤ 80
0,25	500	80 < Ø ≤ 250
0,08	1500	Ø > 250

Tabela 1 - Comprimentos e freqüências de corte padronizados, e recomendações para freqüências de corte de acordo com o diâmetro nominal. Adaptado de [24], [27].

As freqüências de corte padronizadas para perfis circulares são calculadas considerando o comprimento de corte de 0,8 mm, conforme a Equação 3. A própria norma reconhece que essas freqüências padronizadas devem cair em desuso em breve, dando lugar à determinação da freqüência de corte pelo uso da Equação 3.

As normas ISO 12180-2 e ISO 12181-2 também sugerem freqüências de corte base no diâmetro das características. Entretanto, com а diretriz VDI/VDE 2617-2.2 [28] argumenta que as especificações de forma devem incluir as especificações de filtragem, como diâmetro do apalpador, e tipo de filtro digital e sua freqüência de corte. De fato, a característica funcional da superfície é determinante para seleção da freqüência de corte, de modo que o projetista deve também informar quais as freqüências de interesse. A diretriz VDI/VDE 2631-3 [29] orienta o processo de seleção de parâmetros de filtragem (incluindo filtragem mecânica) para perfis retilíneos e circulares.

Outras aplicações possíveis para filtragem digital, além da separação de perfis, são: a eliminação de ruídos ambientais e eletrônicos presentes na medição; e a eliminação de *outliers*. A VDI/VDE 2631-1 [30] chama a atenção para o uso de

filtros para eliminação de ruídos, pois freqüências de interesse do ponto de vista funcional podem estar sendo atenuadas. Os filtros especiais que permitem eliminar *outliers* serão discutidos mais adiante.

2.1.4 Métodos alternativos de filtragem

O filtro Gaussiano representa uma grande vantagem sobre o filtro 2RC, conforme comentado anteriormente. Entretanto, existem alguns problemas com esse filtro, como:

- Distorção nos extremos para perfis lineares e circulares abertos (na maioria dos instrumentos meio comprimento de onda é removido dos extremos após a filtragem);
- Afastamento da linha média em perfis com grandes erros de forma assimétricos (p.ex. na medição de uma semi-esfera em um perfilômetro) e de *outliers* assimétricos.

Desde a década passada, métodos alternativos de filtragem têm sido propostos para lidar com as limitações do filtro Gaussiano [31],[32] e para novas aplicações. Alguns desses métodos alternativos estão sendo padronizados. A série regida pela ISO 16610-1 [33] (com algumas partes recentemente publicadas) prevê um conjunto com três classes de filtros (linear, robusto e morfológico) para perfis e para superfícies. A Tabela 2 mostra a matriz de filtragem para os filtros de perfil da série ISO 16610.

General	Part 1 - Overview and general terms			
	Linear (2)	Robust (3)	Morphological (4)	
Basic Concepts (0)	Part 20 - Basic Concepts	Part 30 - Basic Concepts	Part 40 - Basic Concepts	
Particular Filters (1-5)	Part 21 - Gaussian filters Part 22 - Spline filters	Part 31 - Gaussian regression filters Part 32 - Spline filters	Part 41 - Disk and horizontal line segment filters Part 42 - Motif filters	
How to filter (6-8)	-	-	-	
Multiresolution (9)	Part 29 - Spline wavelets	-	Part 49 - Scale space techniques	

Tabela 2 – Série ISO 16610 para perfis (partes ainda não publicadas em itálico). Adaptado de [33].

2.2 FILTRAGEM MECÂNICA

A geometria (geralmente esférica) e a dimensão dos apalpadores utilizados no processo de aquisição 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. Esse efeito pode ser propositadamente causado, para atenuar freqüências altas (p.ex. rugosidade) que não sejam de interesse. Entretanto, a filtragem mecânica não deve atenuar freqüências abaixo da maior freqüência de interesse.

A diretriz VDI/VDE 2617-2.2 orienta à seleção da dimensão dos apalpadores de modo que os efeitos da filtragem mecânica não sejam significativos para os casos de medição de linhas e de circunferências interna e externa. O máximo diâmetro permissível (D_k) pode ser obtido pelas equações ou gráficos fornecidos.

Para medição de linhas circunferenciais, o máximo diâmetro permissível depende do diâmetro do elemento (d para diâmetros internos, D para diâmetros externos), das freqüências que se deseja preservar (n), e das amplitudes pico a pico dessas freqüências (w_i). Para medição de linhas retas, depende dos comprimentos de onda que se deseja preservar e das amplitudes pico a pico desses comprimentos. A Figura 4 apresenta a equação e os gráficos para a obtenção do máximo diâmetro permissível do apalpador para aquisição de linhas circunferenciais internas.

As normas ISO 12780-2, ISO 12781-2, ISO 12180-2 e ISO 12181-2 também orientam a seleção do máximo diâmetro permissível para o apalpador. Entretanto, os valores recomendados por essas normas não consideram a amplitude da onda, e são bem mais conservativos do que os obtidos segundo a VDI/VDE 2617-2.2. Isso se torna um problema para medição de forma em máquinas de medir por coordenadas, onde há necessidade de manter os apalpadores curtos e com diâmetros de haste relativamente altos para que a rigidez dos apalpadores seja adequada.



Figura 4 - Máximo diâmetro permissível do apalpador para aquisição de linhas circunferenciais internas. Adaptado de [28].

2.3 DISCRETIZAÇÃO: 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 reconstruída após a discretização.

Se o sinal original é limitado em sua largura de banda, então existe um comprimento de onda mínimo (ou freqüência máxima) presente no sinal. Nesse caso, o teorema de Nyquist define um limite mínimo para o intervalo de amostragem. A ISO 12780-2 enuncia o teorema de Nyquist da seguinte maneira:

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

De forma simplificada, o critério de Nyquist requer no mínimo dois pontos por onda para que a mesma possa ser reconstruída após a discretização. Estritamente, o teorema de Nyquist aplica-se somente aos sinais infinitamente longos. Porém, na prática, o critério de Nyquist é ainda aplicável mesmo que os sinais sejam finitos no comprimento. A maioria dos sinais, na prática, não apresenta largura de banda limitada. Se um intervalo de amostragem mais longo do que o definido pelo critério de Nyquist for utilizado, o sinal digitalizado sofrerá uma distorção denominada de *aliasing* (Figura 5). O *aliasing* faz com que uma senóide com um comprimento de onda curto (alta freqüência) pareça ser uma onda com comprimento mais longo (baixa freqüência), devido ao intervalo de amostragem ser demasiado grande para definir a forma verdadeira do sinal.



Figura 5 - Aliasing (onde A é o sinal original, B é o sinal com aliasing, C é o intervalo de amostragem) [24].

Para evitar o *aliasing*, é necessário limitar a banda do sinal antes de sua aquisição, de modo que todas as freqüências acima da maior freqüência de interesse sejam completamente atenuadas. A norma ISO 12780-2 menciona haver muitas maneiras de conseguir essa limitação, sendo as mais comuns através da escolha da filtragem mecânica, do uso de filtros analógicos, e do uso filtros digitais; ou uma combinação desses. Na prática, a filtragem mecânica não impede a presença de ruídos eletrônicos originados no sistema de aquisição. Ainda, os filtros digitais somente podem atuar após a aquisição, quando o *aliasing* já ocorreu.

De fato, o único modo de evitar completamente o *aliasing* é através do uso de um filtro analógico antes do processo de amostragem (ou seja, antes da conversão A/D) [20]. Como os filtros analógicos possuem características de transmissão que se afastam da ideal (tipo "degrau"), freqüências acima da maior freqüência de interesse não serão completamente atenuadas, o que implica na necessidade da redução do intervalo de amostragem para evitar o *aliasing*. Assim, o número de pontos que devem ser amostrados por comprimento de onda será sempre maior que aquele necessário caso o sinal

21

tivesse a banda limitada (ou o filtro analógico fosse ideal). A Figura 6 ilustra essa situação.



Figura 6 - Aumento da freqüência de Nyquist (*F_N*) devido ao comportamento não ideal do filtro antialiasing, quando *F* é a maior freqüência de interesse.

A freqüência de Nyquist é definida como a maior freqüência presente no sinal após a limitação da banda, e a amostragem mínima deve ser duas vezes maior que essa freqüência para evitar a ocorrência de *aliasing*.

As normas ISO 12780-2, ISO 12781-2, ISO 12180-2 e 12181-2 especificam que o número de pontos seja igual ou superior a sete vezes o comprimento de corte (ou a freqüência de corte), com base na característica de transmissão do filtro de Gauss.

2.4 INTERPOLAÇÃO

Na medição de perfis circulares por *scanning* em máquinas de medir por coordenadas, o caminho circular é obtido pelo deslocamento simultâneo de dois ou mais eixos da MMC, incluindo o cabeçote de medição. Esta cinemática complexa resulta em alguns efeitos não observados em equipamentos como medidores de forma, onde o eixo da mesa rotativa é quem define o círculo de referência. Entre esses efeitos, foi mostrado [34]-[36] que os pontos amostrados por uma MMC possuem um espaçamento não-homogêneo (Figura 7).



Figura 7 – Espaçamento angular não uniforme de uma medição real em uma MMC (à esquerda) e sua distribuição multimodal (à direita) [36].

Esse efeito é observado com mais intensidade quando altas taxas de amostragem são necessárias. A taxa de amostragem ($1/\Delta t$, em s⁻¹) em função dos parâmetros de *scanning* é definida pela Equação 5,

$$\frac{1}{\Delta t} = \frac{n.S}{\pi.\emptyset}$$
(Eq. 5)

onde *S* é a velocidade de *scanning* (em mm/s), \emptyset é o diâmetro do perfil circular (em mm) e *n* é o número de pontos do perfil. Como o número de pontos é função do filtro a ser utilizado [24]-[27], e o diâmetro é fixo, o parâmetro que define a taxa de amostragem para um determinado elemento é a velocidade de *scanning*.

Uma consegüência direta da amostragem não uniformemente espaçada é a atenuação espalhamento das fregüências quando е avaliadas pela transformada discreta de Fourier (DFT) (Figura 8), de modo que filtros no domínio da freqüência podem ser afetados aplicados por esse comportamento. Uma comparação de perfis pelo seu conteúdo harmônico também pode ser prejudicada. Outra conseqüência surge quando uma comparação entre perfis no domínio de espaço for realizada, sendo que a diferença entre perfis poderá ser severamente superestimada.



Figura 8 – Espectro de freqüências e amplitudes de um perfil estruturado simulado contendo quatro componentes de freqüência (15, 50, 150 & 500 OPR, amplitudes unitárias), avaliado utilizando uma amostragem uniforme (à esquerda) e uma amostragem não uniforme (à direita) [36].

Um estudo realizado recentemente propõe a utilização de interpolação por *splines* cúbicos para lidar com a amostragem não uniforme típica de MMCs medindo em altas velocidades [36]. Os efeitos sobre o conteúdo harmônico foram praticamente eliminados, e os resultados da comparação de perfis no domínio do espaço foram significativamente melhorados.

2.5 ELIMINAÇÃO DE OUTLIERS

Um dos mais críticos problemas na medição de desvios de forma é a presença de *outliers* nos perfis extraídos (Figura 9), devido ao fato de os parâmetros geométricos de forma serem definidos pelos extremos funcionais do perfil. Esse fato é mais crítico em medições por *scanning* em MMCs, pois esses equipamentos geralmente estão sujeitos a severas vibrações provenientes do chão de fábrica.

Pouca literatura existe sobre a eliminação de *outliers* em medições de perfis. A norma ISO 16610-1 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.



Figura 9 - Outlier em um perfil de circularidade.

Entretanto, uma técnica recente e bastante promissora utiliza o conceito de filtragem multi-escala [31],[32]. Essa técnica permite separar o sinal em várias bandas estreitas, e para detecção dos *outliers*, analisar cada uma separadamente contra limites definidos em função dos parâmetros das distribuições do perfil em cada banda.

2.6 FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DA MMC

O termo função de transferência de uma máquina de medir por coordenadas é uma analogia feita com os sistemas lineares [37], onde a função de transferência H(s) é a representação matemática da transformação verificada em um sinal de saída Y(s) com relação ao respectivo sinal de entrada X(s). Em uma MMC, essa transformação ocorre enquanto o sinal é transmitido mecanica e eletricamente desde a interface superfície/apalpador até o controlador da MMC, onde o sinal é discretizado. É, portanto, uma função não somente do equipamento, mas também do meio em que ele está inserido. A transmissão, idealmente, não deveria alterar o sinal. Entretanto, a interação entre um conjunto de fatores mecânicos, térmicos, e eletrônicos provoca uma distorção (geralmente não-linear) nas características do sinal (amplitude e fase das componentes de freqüência), de modo que o elemento integral extraído resulta em uma representação distorcida da superfície real da peça. As fontes desse erro serão agora revisadas.

2.6.1 Geometria 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 geométricos resultantes da parte estrutural é o de modelo de corpo rígido [38]. Associado ao modelo de corpo rígido, com três erros de translação e três erros de rotação por guia (exemplo na Figura 10, à esquerda), há os erros de ortogonalidade entre guias (exemplo na Figura 10, à direita), totalizando 21 erros geométricos para uma MMC de três eixos.



Figura 10 – Exemplos de um erro de rotação (*yrx*, à esquerda) causado pelo empenamento da guia Y e de um erro de ortogonalidade (*ywz*, à direta) causado por um ajuste mecânico deficiente.

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

Os erros de ortogonalidade e a diferença do erro de posicionamento entre escalas são de particular importância para as medições de circularidade. O erro de ortogonalidade irá produzir uma ovalização no perfil de circularidade inclinada a 45° com relação aos eixos. A diferença nos erros de posicionamento, uma ovalização com diâmetro maior orientado na direção de um dos eixos. Os erros de ortogonalidade e de posição são geralmente dependentes do tamanho do elemento sendo avaliado (erros de ganho).

Com relação à planeza e à retitude, a retitude das guias e os erros de rotação (para grandes superfícies) serão os fatores mais influentes. Os erros de translação ortogonais ao plano de medição são independentes do mensurando (erros de *offset*), e os erros de rotação, dependentes da distância entre o mensurando e as escalas (erros de Abbé).

2.6.2 Geometria do sistema de apalpação

Os sistemas de apalpação analógicos (cabeçotes medidores) para aquisição dos pontos por *scanning* são compostos por três transdutores (indutivos ou ópticos) alinhados às escalas da MMC e ortogonais entre si. Erros de ortogonalidade entre os transdutores não são tão influentes uma vez que os deslocamentos dos transdutores são apenas da ordem de grandeza dos erros de forma. Entretanto, o desalinhamento do cabeçote em relação às escalas poderá produzir erros de ovalização significativos no perfil.

Erros geométricos, de forma geral, introduzem distorções nas freqüências mais baixas do perfil.

2.6.3 Efeitos dinâmicos sobre a estrutura da MMC

A aquisição de perfis no modo *scanning* ocorre de forma não-estática. A estrutura está sempre em movimento (salvo quando realizando algumas operações com sistemas de apalpação mais modernos [39]), e sujeita a acelerações em boa parte das medições.

A influência das acelerações é geralmente mais crítica nas medições de circularidade (ou cilindricidade a partir de perfis de circularidade ou perfis

helicoidais), pois as guias têm sua velocidade aumentada e reduzida ao durante todo o processo de aquisição do perfil. Essa oscilação da aceleração associada à massa da estrutura gera forças variáveis, que distorcem a estrutura. A Equação 6 descreve a projeção da aceleração centrífuga sobre a guia X (a_X , em mm/s²), em função do tempo, para uma trajetória circular no plano XY (ou ZX):

$$a_X = -\frac{S^2}{r} \cos\left(\frac{S.t}{r}\right),$$
 (Eq. 6)

onde *S* é a velocidade de medição (em mm/s), r é o raio do elemento circular (em mm) e t é o tempo (em s). A aceleração centrífuga, em módulo, será constante enquanto a velocidade de medição (tangencial) não variar.

É importante perceber que, do ponto de vista dinâmico-estrutural, diâmetros maiores podem ser medidos com velocidades maiores. De fato, experimentos [40] com anéis padrão de diferentes diâmetros, medidos com diferentes velocidades de *scanning* (mantendo plano de medição e posição no volume da MMC fixos), mostraram que o erro de forma varia de modo aproximadamente linear com respeito ao módulo da aceleração, independente do diâmetro ou da velocidade utilizados.

Como a rigidez da estrutura não é isotrópica, nem a distribuição das massas homogênea, trajetórias circulares sendo percorridas em diferentes planos de medição e em diferentes posições no volume de medição apresentarão distintos níveis de distorção.

Como exemplo (Figura 11), na medição de um perfil circular no plano XY, as forças na direção Y serão maiores que as forças na direção X, devido à massa em deslocamento na direção do primeiro ser maior que na direção do segundo [41]. A distorção provocada na coluna é praticamente igual nas duas direções (o eixo Z geralmente apresenta uma razoável isotropia da rigidez no plano XY, e a aceleração é a mesma nas duas direções). Como o *driver* de acionamento do eixo X está próximo ao centro de massa que se desloca na direção X, a distorção nessa direção é praticamente inexistente. No caso do

eixo Y, o *driver* se encontra afastado horizontalmente e lateralmente do centro de massa, provocando flexão no portal.



Figura 11 - Efeitos da medição em diferentes posições do volume da MMC. Adaptado de [41].

No exemplo, o efeito associado de maior inércia e menor rigidez na direção do eixo Y provoca uma ovalização do perfil (2 OPR) na direção do mesmo, enquanto a distorção da coluna insere uma componente de quatro lóbulos (4 OPR). De forma geral, as distorções estruturais devido aos efeitos dinâmicos introduzem distorções nas freqüências mais baixas do perfil.

2.6.4 Efeitos dinâmicos sobre o sistema de apalpação

Os efeitos dinâmicos sobre o sistema de apalpação podem ser de baixa freqüência (flexão variável na haste devido à anisotropia da rigidez associada à variação da força de contato) ou de alta freqüência (vibrações provocadas pelo atrito na interface apalpador/superfície e perda de contato com a superfície).

Efeitos em baixa freqüência

A necessidade de utilizar extensões e apalpadores longos para o acesso de alguns elementos nas peças, provocando anisotropia na rigidez da configuração em relação à direção da aplicação da força de contato, pode levar a distorções significativas no perfil de saída. Do mesmo modo, isso pode ocorrer pela variação na força de contato devido aos desvios de forma do perfil sendo medido.

Cabeçotes passivos tendem a ser mais suscetíveis a esses efeitos, pois a força de contato é controlada pelo deslocamento da estrutura. Os cabeçotes ativos possuem bobinas lineares internas orientadas paralelamente aos transdutores, de modo que a força pode ser ajustada dentro de uma faixa de valores, e controlada durante a medição. Qualquer que seja o sistema, os efeitos relativos à flexão dos apalpadores aumentam com a velocidade de medição, pois se torna mais difícil o controle da força de contato em tempo real.

Uma nova geração de sistemas de apalpação [39] utiliza indexação contínua do cabeçote e um sistema óptico (semelhante a um auto-colimador) no interior das hastes dos apalpadores. Esses sistemas permitem que o portal permaneça estático para medição de perfis de circularidade e em movimento linear para perfis de cilindricidade, diminuindo a solicitação dinâmica sobre a estrutura da MMC. O sistema óptico permite compensação da flexão da haste durante as medições. Embora já disponível comercialmente, não foram encontrados estudos sobre esse sistema na literatura.

Efeitos em alta freqüência

O aumento da velocidade de medição também insere distorções de alta freqüência no perfil. Os sistemas de apalpação possuem molas para a aplicação da força, e necessitam algum sistema de amortecimento para não ficar oscilando, o que introduz uma limitação na resposta dinâmica desses sistemas. Nos cabeçotes passivos, geralmente o amortecimento é obtido por um sistema de fluido viscoso. Nos sistemas ativos, é feito pelos próprios atuadores magnéticos.

Sistemas com maior massa tendem a apresentar menor freqüência de ressonância, e desse ponto de vista, os sistemas passivos mais compactos

apresentam vantagem. Há ainda o efeito de *stick-slip*, que ocorre geralmente em baixas velocidades, onde a alternação entre atrito dinâmico e estático na interface apalpador/superfície da peça leva a picos de vibração que ocorrem de maneira mais ou menos periódica ao longo de perfil.

Uma ampla revisão sobre distintas tecnologias de sistemas de apalpação para metrologia dimensional pode ser encontrada em [42].

2.6.5 Ambiente de medição

A temperatura pode influenciar as medições de forma de três maneiras: quando há gradientes de temperatura expressivos e não corrigidos entre as escalas (o que leva a diferentes erros de posicionamento nas mesmas, inserindo ovalizações em perfis de circularidade), quando ocorrem variações dos gradientes de temperatura ao longo do tempo (mudando a condição na qual foram realizados os ensaios de ajuste da matriz do CAA), e quanto existem flutuações de temperatura de curto prazo associadas a baixas velocidades de medição (levando, por exemplo, ao denominado erro de fechamento de um perfil de circularidade).

O excesso de vibrações também é um fator importante em medição por coordenadas, sendo crítico em medições por *scanning*. O uso de bases inerciais e de amortecedores (p. ex. pneumáticos) é imprescindível em ambientes sujeitos a altos níveis de vibração (p. ex. próximos à produção).

3 Método para Avaliação da Incerteza de Medição Utilizando Múltiplas Peças Calibradas

A avaliação da incerteza de medição é requisito para atribuir rastreabilidade aos resultados de medição. Na medição por coordenadas, a incerteza deve ser declarada para cada tarefa de medição específica [43]. A tarefa de medição compreende a avaliação das características requeridas pelas especificações, de acordo com o procedimento de medição específico, o qual inclui as estratégias de preparação da medição, de aquisição e processamento dos pontos e de avaliação das especificações.

Os métodos propostos para avaliação da incerteza em medição por coordenadas podem ser divididos em [43]: análise da sensibilidade; parecer de um especialista; numérico utilizando simulações computacionais; e experimental utilizando artefatos calibrados. O método de avaliação da incerteza deve ser definido de acordo com a finalidade da avaliação de incertezas, com o objetivo da medição, e com a criticidade da tarefa, não sendo possível apontar um método definitivo que atenda igualmente a esses requisitos [44].

A série de especificações técnicas ISO 15530 (com algumas partes em publicação) aborda cada um dos métodos descritos (e suas variantes). Dentre os métodos considerados pela referida série, a especificação técnica ISO 15530-3 [12] orienta à avaliação da incerteza de medição pelo método experimental, utilizando peças calibradas. Esta especificação apresenta uma abordagem simples do ponto de vista do usuário, que considera basicamente quatro componentes de incerteza, combinadas conforme a equação a seguir:

$$U = k \cdot \sqrt{u_{cal}^2 + u_p^2 + u_w^2} + |b|$$
 (Eq. 7)

A componente u_{cal} é relativa ao procedimento de calibração das peças padrão, sendo obtida do certificado de calibração. A componente u_p é relativa ao erro de repetitividade da tarefa específica de medição, estimado pelo desvio-padrão
das medições repetidas. A componente u_w representa a interação entre o processo de medição e as variações provenientes do processo de fabricação. Finalmente, *b* é a tendência média estimada, a ser adicionada ao balanço de incerteza caso não seja corrigida.

As próximas seções abordam questões relativas às duas últimas componentes. Essas 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, sendo assunto de pesquisas recentes.

Após revisar as pesquisas anteriores sobre o tema, é apresentado um novo método experimental para avaliação da incerteza de medição utilizando múltiplas peças padrão. O método proposto permite estimar todas as componentes significativas de incerteza em um único procedimento. O modelo para combinação de incertezas a partir do método proposto é avaliado por simulação de Monte Carlo. Os resultados são apresentados e discutidos, concluindo sobre a aplicabilidade do método proposto e a validade do modelo estatístico no escopo medição por coordenadas.

3.1 REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA

3.1.1 Interação entre o processo de medição e as variações do processo de fabricação

Os efeitos da interação entre a amostragem limitada inerente aos processos de medição por coordenadas por contato e os desvios de forma e acabamento (e suas variações ao longo do tempo) são conhecidos e bem documentados, estando considerados entre as mais significativas fontes de incerteza nesse tipo de medição [45]-[50]. Segundo a especificação técnica ISO 15530-3, a variabilidade ocasionada por essa interação deve ser considerada na avaliação da incerteza de medição, sendo incorporada ao modelo através da parcela u_w .

No entanto, a especificação não apresenta uma proposta concreta para identificar a origem de tais contribuições à incerteza (apenas faz referência à

variação do coeficiente de expansão térmica de diferentes lotes de material). Menciona, contudo, que tal fonte é parcialmente considerada pela tendência observada na avaliação da incerteza realizada utilizando uma única peça calibrada. Ainda, prevê o uso de mais de uma peça calibrada, mas não fornece um método estatístico consistente para o tratamento dos dados.

Na literatura encontram-se algumas outras abordagens numéricas para auxiliar na minimização da influência dessa componente pela definição de estratégias de medição robustas, e/ou para contemplá-la na incerteza de medição [45],[48]-[50]. Esses métodos se utilizam ou de modelos analíticos de perfis, ou perfis obtidos de medições reais em peças de produção para emular, via simulação de Monte Carlo, a interação entre peça e estratégia de medição (a ser) utilizada.

No caso de perfis analíticos, é necessária uma comprovação de que os perfis gerados numericamente realmente representam os desvios (e principalmente as variações) encontrados no processo de produção de maneira realista. Assim, é necessária uma abordagem experimental prévia às avaliações numéricas para estimação dos desvios de forma (e suas variações) ou para validação dos modelos numéricos.

Outros modos de interação entre o processo de medição e as variações do processo de produção incluem (mas não se limitam à):

- Variações do coeficiente de expansão térmica entre lotes de materiais interagindo com afastamento da temperatura de referência do ambiente de medição (citado na ISO 15530-3);
- Variações dos desvios de forma das peças interagindo com os desvios geométricos (e distorções de origem dinâmica quando em modo *scanning*) do equipamento de medição.

Para considerar os efeitos dessas interações na estimação da incerteza de medição, o método proposto utiliza múltiplas peças calibradas. Esse método permite avaliar as principias componentes de incerteza a partir de um único

procedimento. O modelo estatístico utilizado está de acordo com o ISO GUM [7], anexo F.2.4.5.

3.1.2 Tendência não corrigida

Segundo o ISO GUM, na primeira nota da seção 6.3, a não correção de efeitos sistemáticos conhecidos e a tentativa de considerá-los pelo aumento da incerteza de medição deve ser evitada, sendo aceita somente em casos bastante específicos.

No anexo F.2.4.5, o ISO GUM cita questões de ordem prática, como a dificuldade de aplicar uma correção a cada ponto da faixa de medição e apresenta equacionamento para o caso em que um único valor de correção é adotado para toda a faixa de medição de um instrumento. Entretanto, não apresenta um modo de considerar o valor com da tendência média resultante quando não é passível de correção.

O complexo sistema de causas que dão origem aos erros na medição por coordenadas pode tornar esta correção tecnicamente impraticável, principalmente quando são avaliadas diretamente características GPS de posição, orientação, batimento e forma [1]. Nas avaliações dessas características, parte da informação é omitida (p. ex., ao avaliar o erro de posição de um furo em relação a duas referências nominalmente ortogonais, não é mais possível saber a magnitude nem o sentido da contribuição de cada escala para o erro observado, podendo tornar inconsistente uma correção aplicada diretamente ao valor do erro de posição).

Na literatura, distintos métodos para levar em consideração no cálculo de incerteza a tendência quando não passível de compensação são propostos e discutidos [51]-[56]. Quatro métodos principais podem ser identificados, e se encontram resumidos na Tabela 3 (já adaptados à nomenclatura usada na ISO 15530-3).

Abreviação	Modelo de Avaliação da Incerteza	Ref.
SUM <i>U_{MAX}</i>	$U = k \cdot \sqrt{u_{cal}^2 + u_p^2 + u_w^2} + b $	[7],[12]
RSSu	$U = k \cdot \sqrt{u_{cal}^2 + u_p^2 + u_w^2 + b^2}$	[51],[52]
SUMU	$U_{+} = \max\left(0, k \cdot \sqrt{u_{cal}^{2} + u_{p}^{2} + u_{w}^{2}} - b\right)$	[51]
	$U_{-} = \max\left(0, k \cdot \sqrt{u_{cal}^2 + u_p^2 + u_w^2} + b\right)$	
U _e	$U = k \cdot \sqrt{u_{cal}^2 + u_p^2 + u_w^2} + E b $	[54]

Tabela 3 - Métodos propostos para inclusão da tendência à incerteza de medição (abreviações conforme [56]).

O método SUM U_{MAX} é mencionado no anexo F.2.4.5 do GUM, mas não explicitamente recomendado, e é utilizado pela edição atual da ISO 15530-3.

O método RSS*u* é relatado [51] como sendo prática adotada por alguns metrologistas com o intuito permanecer consistente à lei de propagação de incertezas do GUM, adicionado a tendência quadraticamente às demais componentes de incerteza. Entretanto, o mesmo [51] desrecomenda esta prática, pois a tendência acaba sendo multiplicada pelo coeficiente de abrangência, quebrando a relação entre a incerteza de medição expandida e a probabilidade de abrangência. Ainda com relação a esse método, as referências citadas não mencionam como calcular o número de graus de liberdade efetivo (considerar ou não o valor da tendência na incerteza combinada ao usar a equação de Welch-Satterthwaite [7]). O método não considerando a tendência na incerteza combinada será aqui denominado RSS u_A e o método considerando a tendência, RSS u_B .

O método SUM*U* foi apresentado por pesquisadores do NIST em 1997, e resulta em um intervalo de incerteza comparativamente baixo, mas assimétrico. Uma restrição imposta nesse método é que o intervalo de incerteza sempre contenha o valor de referência.

O método U_e utiliza coeficientes (*E*) multiplicados ao valor da tendência para obter o menor intervalo de incerteza simétrico possível. Esses coeficientes dependem de relação entre a tendência e as componentes randômicas. Conforme apontado por [56], um problema com esse método é que os coeficientes propostos foram baseados em um número de graus de liberdade infinito, não sendo recomendados para situações (reais) onde o número de graus de liberdade é reduzido.

Uma importante questão relativa à tendência diz respeito à sua significância estatística. Trabalhos anteriores [53],[55] avaliaram essa questão em particular, através do uso de testes estatísticos. Os resultados mostram queda das probabilidades de abrangência obtidas com o uso dos métodos RSS*u* e SUM*U*_{MAX} para aproximadamente 92% quando os valores da tendência observada estão próximos ao valor crítico utilizado nos testes. Os autores de [53] recomendam que a tendência seja corrigida (ou incorporada à incerteza) quando a incerteza na determinação da mesma for superior 30%. Já os autores de [55] recomendam que a tendência, caso não seja corrigida, seja sempre adicionada à tendência, posição essa que será adotada no modelo aqui apresentado.

Os critérios utilizados na literatura para discussões a respeito dos métodos são o intervalo de incerteza resultante e a probabilidade de abrangência associada (o intervalo de incerteza deve ser o menor possível, mas sem reduzir a probabilidade de abrangência para níveis abaixo de 95,45%); a simplicidade no uso do método (tanto no cálculo da incerteza de medição quanto no uso da mesma em situações práticas); e a transferência de rastreabilidade após incorporar a tendência à incerteza de medição.

Esses quatro métodos relatados para inserir a tendência não corrigida na incerteza de medição serão avaliados conjuntamente ao modelo a ser apresentado com base em simulações numéricas pelo método de Monte Carlo.

3.2 VARIAÇÃO DA TENDÊNCIA ENTRE PEÇAS

Do ponto de vista da variabilidade dos desvios de forma resultantes de um processo de produção, três situações podem ser discernidas (Figura 12):

- O número de lóbulos (freqüências) que constituem os desvios de forma e suas orientações (fases) com relação às referências² são razoavelmente estáveis ao longo do tempo (caso A);
- As freqüências que constituem os desvios de forma são estáveis, mas não há uma orientação preferencial das mesmas em relação às referências (caso B);
- Tanto as freqüências quanto suas orientações variam ao longo do tempo (caso C).



Figura 12 - Tipos de processos de produção quanto à variabilidade dos desvios de forma.

Nas medições de avaliação da produção, o uso de estratégias de medição com densidades de pontos limitadas terá distintos níveis de interação frente à variação dos desvios gerados pelo processo de produção.

Supondo que os valores verdadeiros das características fossem perfeitamente conhecidos, na avaliação de um processo como o representado pelo caso A, não se observaria diferenças significativas entre as tendências obtidas em diferentes peças.

² Entenda-se por referência qualquer elemento da peça utilizado de maneira sistemática em sua fixação nos equipamentos de produção e/ou de medição, não necessariamente relacionados às especificações das tolerâncias.

Na avaliação de um processo como o representado pelos casos B ou C, entretanto, uma estratégia de medição com amostragem limitada levará a distintos valores de tendência entre as peças. Essa variação da tendência, resultado da interação entre a variabilidade do processo de produção e a estratégia de medição adotada, é representada pela componente u_w .

As diferenças entre os três tipos de processo no caso de uma avaliação puramente experimental podem ser resumidas como segue:

- No caso A, apenas uma peça calibrada é necessária para avaliar a tendência, e a variabilidade devido à interação entre peça e estratégia de medição não será significativa;
- No caso B, apenas uma peça é necessária para avaliar a tendência e sua variabilidade devido à interação entre peça e processo de medição, a partir da alteração da disposição dos pontos entre ciclos de medição (p.ex. alterando o ângulo inicial dos pontos adquiridos ou girando a peça entre ciclos de medição no caso de cilindros ou planos circulares);
- No caso C, uma amostra de peças calibradas que seja representativa das variações esperadas do processo de produção se tornará necessária.

Na prática, a tendência observada estará relacionada não somente à estratégia de medição utilizada na avaliação da produção, mas também à estratégia de medição utilizada na calibração das peças. Na calibração, a estratégia de medição vai depender de quais fontes da incerteza de medição se pretende evidenciar com a(s) peça(s) calibrada(s).

Se o objetivo das avaliações experimentais for evidenciar apenas as fontes relativas ao equipamento de medição, ambiente e operador enquanto executor das medições (p. ex. se a componente u_w for acessada por métodos numéricos), a calibração poderá ser realizada replicando a estratégia de aquisição dos pontos utilizada nas medições de produção. Esta estratégia evita que tendências devidas aos desvios de forma da peça calibrada interajam com as tendências introduzidas pelas demais fontes de incerteza.

Quando se avalia a incerteza de forma puramente experimental, os elementos medidos devem ser descritos com o maior nível de detalhe possível, e estratégias exemplares de medição e de avaliação das especificações (alta densidade de pontos, critérios consistentes com as normas de especificação de produto) devem ser adotadas na calibração. Desta forma, diferenças relativas às estratégias de amostragem e associação dos elementos matemáticos entre as medições da calibração (referência) e da avaliação da produção estarão sendo consideradas.

3.3 PROPOSTA DO MÉTODO

O efeito da interação entre o processo de medição e as variações do processo de produção poderá ser observado quando as tendências estimadas com várias peças calibradas apresentarem diferença significativa entre si.



Figura 13 - Modelo utilizado para avaliação da incerteza.

O método proposto consiste basicamente um utilizar um número p de peças calibradas, e medidas n vezes conforme os critérios utilizados na ISO 15530-3. Cada peça apresentará estimativas para tendência (b_j) e desvio padrão das medições ($s_{p,j}$) (Figura 13). Considerações importantes com relação ao método apresentado são que as peças utilizadas devem: ser representativas das variações esperadas do processo de fabricação; e calibradas usando estratégia de medição e método de avaliação de referência (alta densidade de pontos, avaliação consistente com as especificações de produto).

As equações que constituem o modelo estatístico utilizado para avaliar as componentes consideradas constam no anexo F.2.4.5 do ISO GUM na forma contínua, e serão aqui apresentadas na forma discreta, de acordo com o método de avaliação proposto.

A tendência média (\overline{b}) (Eq. F.7a do ISO GUM) será incorporada à incerteza de medição conforme os quatro métodos descritos anteriormente, e uma comparação dos resultados entre métodos será conduzida. A tendência média para o caso discreto é apresentada na Equação 8.

$$\overline{b} = \frac{1}{p} \sum_{j=1}^{p} b_j$$
 (Eq. 8)

A parcela de incerteza u_p é avaliada como sendo a média quadrática dos desvios padrão individuais observados através das medições de cada peça (Eq. F.7c do ISO GUM). A média quadrática pode ser utilizada como estimativa global da dispersão do procedimento de medição desde que os desvios padrão individuais estejam sob controle estatístico (o mesmo vale para a calibração das peças). O teste para verificação do controle estatístico pode ser realizado com auxílio de uma carta de desvio padrão com limites 3 sigma. Caso a estatística esteja fora de controle, propõe-se utilizar o maior valor encontrado. A equação na forma discreta, juntamente com o número de graus de liberdade para essa componente, é apresentada na Equação 9.

$$u_p = \hat{s}_p = \sqrt{\frac{1}{p} \sum_{j=1}^{p} (s_{p,j})^2}$$
 $\upsilon_p = p(n-1)$ (Eq. 9)

A dispersão das tendências observada entre peças com relação à tendência média é estimada pelo desvio padrão das tendências individuais (Eq. F.7b do ISO 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 (\overline{b}). Deste modo, é justificável que o caso particular abordado pelo GUM possa ser generalizado para outras distribuições com forma conhecida. A equação na forma discreta para a variância das tendências, juntamente com seu número de graus de liberdade, é apresentada na Equação 10.

$$s_w^2 = \frac{1}{p-1} \sum_{j=1}^p (b_j - \overline{b})^2$$
 $\upsilon_w = p-1$ (Eq. 10)

Como a variância das tendências (s_w^2) está contaminada pelas variâncias da medição (\hat{s}_p^2) e da calibração (\hat{s}_{cal}^2) , sugere-se uma separação de variâncias [57], considerando inclusive a variância da calibração, se disponível no certificado. Depois de realizada essa separação, é obtida componente u_w (Equação 11).

$$u_{w} = \begin{cases} \sqrt{s_{w}^{2} - (\hat{s}_{p}^{2}/n_{p} + \hat{s}_{cal}^{2}/n_{cal})} se \ s_{w}^{2} > (\hat{s}_{p}^{2}/n_{p} + \hat{s}_{cal}^{2}/n_{cal}) \\ 0 \qquad se \ s_{w}^{2} \le (\hat{s}_{p}^{2}/n_{p} + \hat{s}_{cal}^{2}/n_{cal}) \end{cases}$$
(Eq. 11)

Os limites de controle da carta de tendências (Figura 13) são baseados em limites 3 sigma, definidos pelas variâncias combinadas da calibração $(\hat{s}_{cal}^2, quando disponível)$ e da medição (\hat{s}_p^2) . Esse teste estatístico pode ser utilizado como estimador da robustez da estratégia de medição adotada frente às variações do processo de fabricação presentes, sendo desejável que não se observem pontos fora dos limites.

3.3.1 Simulações numéricas

No escopo deste trabalho foram realizadas duas simulações numéricas. A primeira procurou identificar qual dos métodos apresentados na Tabela 3 apresentava melhor desempenho no que diz respeito à probabilidade de abrangência e ao valor da incerteza. A segunda simulação estudou, para o método apontado como mais adequado pela simulação anterior, a influência do número de peças e o número de repetições.

Os parâmetros da primeira simulação foram:

- A tendência média b, expressada em múltiplos da componente up, relativa ao erro de repetitividade da tarefa específica de medição (b/up = 0; 1; 2; 4 e 8).
- A incerteza devida à interação entre o processo de medição e às variações provenientes do processo de fabricação u_w, também expressada em múltiplos da componente u_p (u_w/u_p = 0; 1; 2; 4 e 8).
- O número de peças *p* usado para estimar a incerteza de medição (*p* = 3; 5; 7 e 10).
- O número de medições repetidas n, realizadas em cada peça
 p_i (n = p = 3; 5; 7 e 10).

A incerteza de calibração não foi incluída na simulação, pois o método deve gerar níveis de confiança satisfatórios mesmo que a calibração apresente um valor de incerteza hipoteticamente igual a zero. Na prática, a calibração pode influenciar tanto a tendência média quanto a variação da tendência, e essa influência deve ser contemplada pela componente u_{cal} .

Para cada combinação dos parâmetros acima foram realizadas 10.000 simulações conforme a seqüência a seguir:

- 1. Geração de uma matriz de valores medidos (1.000 peças e 1.000 medições por peça). A medição de cada peça é contaminada por uma tendência obtida por amostragem de uma distribuição normal com média \overline{b}/u_p e desvio-padrão u_w/u_p . As 1000 medições de cada peça diferem no valor do erro de repetitividade, amostrado aleatoriamente de uma distribuição normal com média b_j/u_p e desvio-padrão u_p .
- Obtenção de uma amostra de *p* peças e *n* medições por peça por amostragem aleatória dentro da matriz de 1.000 x 1.000 valores medidos.

- 3. Estimação das incertezas expandidas utilizando as quatro abordagens detalhadas na Tabela 1, a partir dos valores da amostra de p peças e n medições por peça. O coeficiente de expansão para uma probabilidade de abrangência alvo de 95,45% foi obtida com base no número de graus de liberdade efetivo, calculado pela equação de Welch-Satterthwaite. A separação de variâncias conforme apresentada pela Equação 11 foi efetuada para todos os métodos.
- Contagem dos elementos da matriz que se encontram dentro de cada intervalo de incerteza estimado no passo anterior e cálculo da probabilidade de abrangência correspondente.

Os intervalos de incerteza médios estimados para cada combinação dos parâmetros foram utilizados, junto à probabilidade média de abrangência correspondente, para determinar qual dos equacionamentos da Tabela 1 fornece uma melhor solução para avaliação de incerteza. Em princípio, será eleito o equacionamento que forneça os menores intervalos de incerteza, porém garantindo uma probabilidade de abrangência de no mínimo 95,45%, para todo o domínio dos parâmetros de entrada.

Uma segunda simulação numérica foi realizada para achar o número mínimo de peças e repetições que resultam em uma estimativa confiável da incerteza de medição (i.e., baixa variabilidade das incertezas). O procedimento foi similar ao descrito acima, mas eliminou-se o requisito n = p e limitou-se a exploração de $u_w/u_p = 0$ e 2. A estatística avaliada nessa segunda simulação foi o desvio padrão das incertezas de medição para as distintas combinações de número de peças e número de repetições após 50.000 iterações.

3.4 RESULTADOS

Esta seção apresenta os resultados para alguns dos casos avaliados. As Figura 14 e Figura 15 mostram as probabilidades de abrangência médias obtidas com 10.000 iterações.



Figura 14 - Probabilidades de abrangência médias geradas para 3 peças e 3 repetições/peça.



Figura 15 - Probabilidades de abrangência médias geradas para 10 peças e 10 repetições/peça.

De forma geral, pode-se observar que o comportamento das probabilidades de abrangência obtidas com os distintos métodos melhora quando aumenta o número de graus de liberdade.

Com relação ao método SUM U_{MAX} , pode-se verificar que as probabilidades de abrangência resultantes para todos os níveis de \overline{b}/u_p e u_w/u_p se encontram acima dos 95,45%. Também se pode verificar que para um número de graus de liberdade maior, a probabilidade de abrangência tende a aproximadamente 97,7%. Isso é previsível, dado que uma das caudas da distribuição normal fica

totalmente contida no intervalo, devido à incorporação da tendência na incerteza. Esse comportamento pode ser observado também para o método SUM*U* com valores elevados de \overline{b}/u_p .

O método $U_{\rm e}$ apresentou probabilidades de abrangência bem abaixo do esperado. Como mencionado, os coeficientes publicados foram estimados com base teórica (número de graus de liberdade infinito), não sendo apropriado para casos onde o número de graus de liberdade é restrito.

Com relação ao método SUM*U* pode-se observar que para um número de graus de liberdade baixo e valores de \overline{b}/u_p baixos (e notadamente quando $u_w/u_p \approx 2$), os intervalos de confiança gerados se encontram bem abaixo do esperado. Esse fato deve-se à ocorrência de tendências amostrais, que deslocam os intervalos de incerteza indevidamente. Um teste de significância poderia ser utilizado para definir quando uma tendência pode ser desconsiderada, mas isso pode acarretar que tendências reais sejam omitidas, prejudicando o intervalo para casos em que $u_w > \overline{b}$. Assim mesmo, esse método não se mostrou tão inadequado quanto relatado em [55].

O método RSS $u_{\rm B}$ apresenta um comportamento bastante particular do ponto de vista da probabilidade de abrangência para os distintos níveis de tendência e de sua variação. De fato, para relações u_w/u_p e \overline{b}/u_p elevadas e número de graus de liberdade baixo, o intervalo de confiança médio gerado resulta menor que 95,45%. O método RSS $u_{\rm A}$ mostrou, de forma geral, probabilidades de abrangência consideravelmente superestimadas.

As Figura 16 e Figura 17 apresentam os intervalos de incerteza médios obtidos após 10.000 iterações para dois níveis distintos de número de graus de liberdade.



Figura 16 - Intervalos de incerteza médios gerados para 3 peças e 3 repetições/peça.



Figura 17 - Intervalos de incerteza médios gerados para 10 peças e 10 repetições/peça.

Percebe-se um aumento significativo dos intervalos de incerteza médios para números de graus de liberdade reduzidos, o que é esperado uma vez que o coeficiente de expansão é consideravelmente maior nesses casos.

Entre os métodos, o que apresentou os maiores intervalos de incerteza foi o RSS*u*_A, acompanhado de probabilidades de abrangência superestimados, como já mencionado. Os menores intervalos de incerteza são obtidos, como esperado, pelo método SUM*U*.

Comparando-se o método SUM U_{MAX} e o método RSS u_B para números de graus de liberdade baixos, pode-se notar que na região onde \overline{b}/u_p e u_w/u_p são simultaneamente altos, os intervalos de incerteza do último são mais baixos que do primeiro, resultando porém em probabilidades de abrangência abaixo de 95,45%. Para valores simultaneamente baixos de u_w/u_p e altos de \overline{b}/u_p , o método RSS u_B apresenta intervalos de confiança superiores à SUM U_{MAX} .

A Figura 18 mostra a variação do desvio padrão das incertezas de medição para as distintas combinações de número de peças e número de repetições após 50.000 iterações, para o método SUM U_{MAX} . Para $u_w/u_p = 0$, se verifica que a dispersão da incerteza depende igualmente do número de peças e do número de repetições por peça, apresentando pouca variação para $p \ge 3$ e $n \ge 3$. Torna-se mais fortemente dependente do número de repetições apenas para número de peças p < 3.



Figura 18 - Dispersão (1σ) das incertezas de medição para as distintas combinações de número de peças e número de repetições, para o método SUM*U*_{MAX}.

No gráfico da dispersão da incerteza para $u_w/u_p = 2$, pode-se observar que a variação é fortemente dependente do número de peças utilizadas, com o número de repetições por peça não tendo influência significativa mesmo com poucas repetições. Esse fato se deve ao número de graus de liberdade da componente u_w ser função apenas de número de peças, enquanto da componente u_p ser função do número de peças e de repetições por peça. Quando a componente u_w assume valores significativos, é necessário um

número de peças $p \ge 5$ para obter uma estimativa de incerteza de medição confiável.

3.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE O MÉTODO

O ISO GUM recomenda fortemente que os efeitos sistemáticos conhecidos sejam corrigidos. Entretanto, especialmente em avaliações de características GPS com máquinas de medir por coordenadas, a correção desses efeitos nem sempre é praticável. Nesses casos, os efeitos sistemáticos devem ser incorporados à incerteza de medição de modo tal que a rastreabilidade seja assegurada.

Pelas simulações realizadas, o método mais adequado é o SUM U_{MAX} . Esse método, apesar de apresentar intervalos de incerteza maiores, engloba um conjunto de vantagens como a simplicidade no cálculo da incerteza (comparado com método U_e), praticidade na aplicação (intervalo de incerteza simétrico), e, principalmente, probabilidades de abrangência mais estáveis com as variações das componentes de incerteza e sempre acima (mas não exageradamente) da probabilidade de abrangência almejada, neste trabalho definida em 95,45%.

Com relação ao modelo estatístico avaliado, pelas simulações pode-se afirmar que ele é válido, com algumas considerações. Primeiramente, nas simulações foram utilizadas apenas distribuições normais. O modelo não perde a validade no caso de outras distribuições serem consideradas. Entretanto, as estatísticas devem ser adaptadas à distribuição adequada. Particularmente para o caso de características GPS com valores verdadeiros pequenos frente à dispersão do processo de medição, podem ocorrer distribuições com terceiro momento (*skewness*) significativo, e o desvio padrão poderá ser subestimado.

Desde o 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. A infra-estrutura e a competência para tais desafios são raras no Brasil e mesmo no mundo. A segunda limitação diz respeito ao custo

da calibração, já que para avaliar incerteza em presença de uma componente u_w significativa deverão ser usadas cinco ou mais peças calibradas com alta densidade de pontos. A terceira limitação se refere à execução do experimento na própria MMC sob avaliação. Estes equipamentos estão, em geral, dedicados à medição de produto e pode ser difícil dispor do tempo necessário para medir as peças calibradas repetidas vezes.

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-científicio em medição por coordenadas.

3.6 ANÁLISES ADICIONAIS

Algumas análises adicionais podem ser conduzidas a partir das medições realizadas com o método das múltiplas peças calibradas. Uma delas foi citada (gráficos de controle das tendências médias e desvios padrão da medição). A segunda, que será agora descrita, é uma análise das fontes de variabilidade do processo de medição, modificação no estudo de *R&R* de um sistema de medição de acordo com o MSA [5].

3.6.1 Análise das fontes de variabilidade do processo de medição

Nessa análise, são consideradas as fontes de variabilidade que podem estar atuando sobre os limites das cartas de controle estatístico da produção, sendo elas a repetitividade e a interação entre o processo de medição e a variabilidade do processo de produção. São utilizadas as mesmas medições realizadas para avaliação da incerteza. As estatísticas de dispersão podem ser estimadas pelos desvios padrão (no MSA são estimadas pela amplitude). Os índices serão mantidos de acordo com a especificação técnica ISO 15530-3.

A repetitividade R_p (VE no MSA) é calculada pelo desvio padrão médio corrigido, como mostra a Equação 12, onde $s_{p,j}$ são os desvios padrão obtidos para cada peça, p é o número de peças, e n_p é o número de repetições por peça. O coeficiente c_4 pode ser obtido de tabelas estatísticas, e depende do número de repetições por peça.

$$R_{p} = \frac{\overline{s}_{p}}{c_{4}(n_{p})} = \frac{\frac{1}{p} \sum_{j=1}^{p} s_{p,j}}{c_{4}(n_{p})}$$
(Eq. 12)

A variabilidade devido à interação entre o processo de medição e as variações do processo de produção (R_w) no MSA é denominada *within part variation*. Entretanto, o MSA procura excluir essa fonte como parte do estudo de *R&R*. Com o método das múltiplas peças calibradas é possível estimá-la, pois existem valores de referência para as peças. Seu valor (Equação 13) pode ser calculado pela componente s_w (Equação 10), corrigido pelo coeficiente c_4 (com tamanho do subgrupo igual ao número de peças) e pela separação de variâncias, onde n_{cal} é o número de repetições por peça efetuadas na calibração (quando disponível) e \bar{s}_{cal} é a média aritmética dos desvios padrão da calibração de cada peça (quando disponível).

A variabilidade do processo de produção R_m (*VP* no MSA) pode ser estimada pelo desvio padrão dos valores médios obtidos na calibração (Equação 14), corrigido pelo coeficiente c_4 (com tamanho do subgrupo igual ao número de peças) e pela separação das variâncias (Equação 15). O MSA sugere ainda que seja importada de um estudo de capacidade, caso disponível.

$$s_m^2 = \frac{1}{p-1} \sum_{j=1}^p (x_{cal,j} - \overline{x}_{cal,j})^2$$
 (Eq. 14)

$$R_{m} = \begin{cases} \frac{1}{c_{4}(p)} \sqrt{s_{m}^{2} - \overline{s}_{cal}^{2} / n_{cal}} & se \ s_{m}^{2} > \overline{s}_{cal}^{2} / n_{cal} \\ 0 & se \ s_{m}^{2} \le \overline{s}_{cal}^{2} / n_{cal} \end{cases}$$
(Eq. 15)

A variabilidade total R_t é obtida pela soma das variâncias das componentes R_p , R_w , e R_m . O restante do estudo é conduzido como no MSA. O parâmetro avaliado é a relação percentual entre as variações do processo de medição e a variação total encontrada ($\% R_p \& R_w$).

3.6.2 Gráfico de controle das tendências médias e desvios padrão das medições

O gráfico de desvios padrão das medições é utilizado como avaliador da consistência do processo de medição. Caso os desvios padrão estejam sob controle estatístico, a média dos desvios padrão pode ser utilizada como estimador da repetitividade do processo de medição. Caso não esteja, é sugerido o uso do maior desvio padrão encontrado. Os limites de controle superior e inferior para o gráfico dos desvios padrão da medição são calculados de acordo com a Equação 16.

$$CL = \bar{s}_p \pm 3. \frac{\bar{s}_p \cdot \sqrt{1 - c_4^2(n_p)}}{c_4(n_p)}$$
 (Eq. 16)

O gráfico de controle das tendências médias permite ao avaliador verificar se há interação significativa entre o processo de medição e a variabilidade do processo de produção. Caso todas as tendências estejam sob controle, não se pode afirmar haver interação significativa entre processo de medição e variações do processo de produção. Os limites de controle superior e inferior para o gráfico das tendências são calculados de acordo com a Equação 17.

$$CL = \overline{b} \pm 3. \sqrt{\left(\frac{\overline{s}_{cal}}{c_4(n_{cal}).\sqrt{n_{cal}}}\right)^2 + \left(\frac{\overline{s}_p}{c_4(n_p).\sqrt{n_p}}\right)^2}$$
(Eq. 17)

4 Ambiente de Análise para Avaliação da Medição de Perfis por Scanning

Os softwares de medição por coordenadas geralmente apresentam um conjunto de ferramentas gráficas (em alguns casos também estatísticas) que permitem ao avaliador obter informações sobre as medições com um maior nível de detalhe. Entretanto, nem todas as ferramentas adequadas a avaliações de perfis de forma se encontram disponíveis nos softwares de medição. Também, a avaliação de vários perfis de modo simultâneo (p. ex. para comparação de perfis entre medições, ou entre perfis medidos e perfis de referência) não é encontrada nos softwares de medição.

Este capítulo apresenta um ambiente de análise de perfis extraídos por *scanning* 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*, auxiliando na sua otimização. Os algoritmos foram implementados utilizando a linguagem MATLAB 6.5. No estágio atual de desenvolvimento, o ambiente conta com ferramentas para avaliação de circularidade, incluindo rotinas de processamento desenvolvidas para lidar com duas situações típicas de medições por *scanning*: a presença de pontos atípicos e o espaçamento não uniforme dos pontos adquiridos.

4.1 FERRAMENTAS DE ANÁLISE

As ferramentas de análise são dividas em dois tipos: ferramentas de análise de perfis e ferramentas de estatísticas. Nessa seção será apresentada uma visão geral das ferramentas. As rotinas de processamento utilizadas serão apresentadas mais adiante.

4.1.1 Ferramentas de análise de perfis

As ferramentas de análise de perfis foram implementadas para fornecer informação detalhada sobre o processo de medição de perfis no modo

scanning, permitindo uma análise das fontes de erro que atuam sobre o processo. As ferramentas utilizadas para as avaliações dos perfis de circularidade são: o gráfico polar (presente em praticamente todos os softwares de medição), o gráfico de análise do conteúdo harmônico (presente em alguns softwares comerciais), o gráfico da eliminação de *outliers*, e o gráfico da distribuição angular dos pontos.

Gráfico polar centrado de circularidade

O gráfico polar de circularidade permite avaliar de modo qualitativo a magnitude e a orientação dos desvios de forma e o efeito dos ruídos presentes nos mesmos. Quando superfícies com perfil conhecido são avaliadas (padrões geométricos ou perfis calibrados), pode-se extrair informação qualitativa sobre quais erros geométricos ou dinâmicos estão atuando sobre a MMC.

No ambiente 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 obtidos. A Figura 19 mostra o gráfico polar de circularidade de um perfil de circularidade real medido com uma MMC por *scanning*.





Gráfico do conteúdo harmônico

O gráfico do conteúdo harmônico ou periodograma (obtido pela transformação do Fourier do perfil) fornece uma complementação ao gráfico polar, permitindo a análise das componentes de freqüência (e suas amplitudes) presentes no perfil. É extremamente útil para identificar as componentes de freqüência dominantes do perfil, fornecendo informações importantes sobre as características do processo de produção. Quando superfícies com perfil conhecido são avaliadas (padrões geométricos ou perfis calibrados), pode-se extrair informação quantitativa sobre erros geométricos ou dinâmicos atuando sobre a MMC, permitindo também identificar as freqüências dos ruídos presentes nas medições.

No ambiente desenvolvido, são plotados simultaneamente os espectros de freqüências antes e após a filtragem, o que auxilia na avaliação da influência dos ruídos presentes sobre os perfis de circularidade obtidos. Também foi implementada a opção de plotar o espectro de freqüências do perfil antes da eliminação de *outliers*, de modo que se possa investigar a origem dos mesmos nas medições. A Figura 20 mostra o gráfico do conteúdo harmônico correspondente ao perfil da Figura 19, com a opção de visualização do espectro antes da eliminação desativada, onde se pode verificar uma ovalização (componente 2 OPR) dominante.



Figura 20 - Gráfico do conteúdo harmônico do perfil de circularidade mostrando o espectro de freqüências antes (em verde) e depois (em azul) da filtragem (filtro Gaussiano, freqüência de corte de 50 OPR).

Gráfico da eliminação de outliers

O gráfico da eliminação dos pontos atípicos (ou *outliers*) permite verificar a presença, a magnitude e a posição sobre o perfil de pontos atípicos resultantes do processo de aquisição. Funciona como um alerta ao avaliador, pois os *outliers* podem ser devidos a partículas não removidas da superfície da peça durante a limpeza da mesma, ou a um pico de vibrações no momento da aquisição. A análise pode ser feita em conjunto com o gráfico do conteúdo harmônico, para identificar a causa da geração dos pontos atípicos. A Figura 21 mostra o gráfico de eliminação de *outliers* correspondente ao perfil da Figura 19.



Figura 21 - Gráfico de eliminação de *outliers*, com perfil antes (em magenta) e depois (em verde) da eliminação dos *outliers*.

Gráfico da distribuição angular dos pontos

O gráfico da distribuição angular dos pontos permite avaliar o comportamento do sistema de aquisição operando em altas taxas de aquisição. Os efeitos da distribuição angular dos pontos devem corrigidos quando for realizada uma comparação entre perfis e antes das operações de filtragem com filtros susceptíveis a esse comportamento. A Figura 22 mostra o gráfico da distribuição angular dos pontos de uma medição real realizada com uma MMC a uma taxa de aquisição de aproximadamente 250 pontos/s.



Figura 22 - Gráfico da distribuição angular dos pontos obtido com uma MMC adquirindo a uma taxa de 250 pontos/s.

4.1.2 Ferramentas estatísticas

As ferramentas estatísticas foram desenvolvidas para análise do processo de medição com relação aos requisitos metrológicos das tarefas de medição. O método utilizado para todas as analises estatísticas é o método das múltiplas peças calibradas, descrito anteriormente. As ferramentas estatísticas consistem em análises numéricas e gráficas, e são apresentadas a seguir.

Avaliação da incerteza de medição

O cálculo da incerteza de medição é realizado de acordo com o modelo descrito no Capítulo 3. A componente u_w pode ser estimada por outro método e inserida no ambiente de análise como uma variável de entrada, permitindo o uso de uma única peça no cálculo de incerteza de medição. A incerteza de medição pode ser utilizada para verificar a adequação do sistema de medição para realização da avaliação de conformidade do produto, sendo desejável que sua relação com o intervalo de tolerâncias seja menor que 10%.

Análise das fontes de variabilidade do processo de medição

Essa análise é realizada conforme descrita no Capítulo 3. Pode ser utilizada para verificar a adequação do processo de medição para realizar controle estatístico e avaliação da capacidade do processo de produção. O parâmetro

de avaliação da adequação do processo de medição é a relação percentual $\% R_e \& R_w$, sendo desejável que esteja abaixo dos 10%.

Gráfico de controle das tendências médias e desvios padrão das medições

O gráfico das tendências médias pode ser utilizado para verificar se os desvios geométricos e distorções estruturais de origem dinâmica interagem com as variações dos desvios de forma do processo de produção. É desejável que não haja tal interação, pois ela gera variabilidade nos resultados de medição. Uma interação excessiva pode indicar necessidade de um ajuste geométrico da máquina ou da redução da velocidade de *scanning*.

Os gráficos dos desvios padrão das medições permitem verificar a mesma interação, mas pela variação da repetitividade. Caso haja uma variação significativa, isso pode indicar uma variação do processo de produção do ponto de vista funcional (p. ex. variação da rugosidade ou das ondulações).

A Figura 23 apresenta gráficos de controle construídos a partir de medições reais, onde se pode observar consistência nos desvios padrão entre peças, tendência média não significativa, mas variação significativa entre tendências.



Figura 23 - Gráficos de controle das tendências médias e dos desvios padrão das medições, obtido a partir de medições de retitude em uma geratriz.

4.2 ROTINAS DE PROCESSAMENTO

4.2.1 Importação 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. Distintos softwares de medição utilizam distintos 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 e o software de medição com o qual o perfil foi obtido. Essa rotina permite a aquisição de vários perfis iterativamente, de modo que selecionados os parâmetros de processamento e avaliação, todo o processo de importação dos pontos, processamento e avaliação dos parâmetros geométricos é realizado com um único comando.

Nessa rotina, também é realizado um ajuste inicial dos pontos pelo método dos mínimos quadrados, pois alguns perfis extraídos têm suas coordenadas em relação a um sistema de referências não necessariamente relacionado com o elemento sendo avaliado. Além disso, foi verificado que os processos de interpolação e filtragem eram influenciados (na ordem dos nanometros) pela excentricidade residual (na ordem de alguns micrometros) normalmente presente em perfis adquiridos em máquinas de medir forma.

4.2.2 Eliminação de outliers

Para reconhecimento e eliminação de *outliers* presentes nos perfis extraídos, foram implementados filtros de multi-escala (*multi-scale filters*) utilizando três técnicas: filtro baseado em wavelets, filtro morfológico e filtro com característica de transmissão tipo degrau no domínio da freqüência. Os dois primeiros foram implementados como descrito em [32]. O terceiro é um método proposto, e está em fase de avaliação. Os primeiro testes com este último método apresentaram resultados bastante encorajadores (Figura 26).

A Figura 24 mostra o gráfico polar do mesmo perfil apresentado anteriormente (Figura 21), agora sem o processo de eliminação do *outlier*, e o respectivo conteúdo harmônico com o espectro do perfil contendo o *outlier*.



Figura 24 - Influência do *outlier* sobre o erro de circularidade calculado (à esquerda) e sobre o conteúdo harmônico do perfil (em magenta, à direita).

O processo de reconhecimento e eliminação consiste na divisão do perfil em múltiplas bandas. Para cada banda, o desvio padrão do perfil com relação à média é calculado, e limites 4 sigma (superior e/ou inferior) são criados. Os pontos que caírem fora desses limites serão considerados *outliers*, e serão deslocados para a média da banda. Após avaliação e eliminação dos *outliers* em todas as bandas, o perfil é reconstruído. A Figura 25 mostra o processo de divisão do perfil em múltiplas bandas, para o mesmo perfil apresentado anteriormente (limites de controle não mostrados).



Figura 25 - Divisão do perfil em múltiplas bandas.

Esse mesmo perfil foi avaliado com os três métodos de filtragem. Os resultados podem ser vistos na Figura 26.



Figura 26 - Eliminação do *outlier* utilizando diferentes métodos (perfil reconstruído em verde, perfil bruto em magenta). Acima e à esquerda, o perfil sem passar pela rotina de eliminação. Acima e à direita, filtragem no domínio da freqüência. Abaixo e à esquerda, filtragem morfológica. Abaixo e à direita, filtragem por wavelets.

Pode-se perceber que o método de filtragem no domínio da freqüência apresentou a menor distorção do perfil reconstruído. Os outros dois métodos apresentaram deslocamento do perfil reconstruído na direção do *outlier* (notadamente o método de filtragem por wavelets). Resultados similares foram encontrados em outros perfis avaliados.

4.2.3 Interpolação dos pontos

Para minimizar a influência do espaçamento não uniforme típico de medições por *scanning* a altas taxas de aquisição, foi inserida na seqüência de processamento um rotina de interpolação dos pontos a partir de um *grid* espacial regularmente espaçado. A rotina utilizada é interna do próprio MATLAB, a qual permite interpolação por vários métodos.

Recentemente foi realizada uma avaliação comparativa entre métodos de interpolação para perfis de circularidade [36]. A Figura 27 mostra os resultados obtidos na avaliação do erro de circularidade em perfis simulados (com e sem

ruído), amostrados de modo não uniforme e depois interpolados por distintos métodos. Pode-se perceber que o método de interpolação por *splines* cúbicos apresenta os melhores resultados. Medições realizadas em perfis reais apresentaram resultados semelhantes. Melhorias significativas foram obtidas na comparação de perfis no domínio do espaço após a interpolação por *splines* cúbicos, e as distorções no conteúdo harmônico foram praticamente eliminadas.



Figura 27 - Comparação da tendência do erro de circularidade apresentada pelos perfis não uniformemente espaçados e pelos perfis interpolados pelos quatro métodos [36].

4.2.4 Filtragem digital

Para filtragem digital dos perfis, foi implementado o filtro Gaussiano com 50% de transmissão na freqüência de corte. O processo de filtragem é realizado no domínio da freqüência, utilizando a transformada rápida de Fourier (FFT) disponível no MATLAB.

4.2.5 Ajustes matemáticos

Para o cálculo do círculo de referência, dois métodos de ajuste foram implementados: o ajuste por mínimos quadrados (método Gauss-Newton) e o ajuste por mínima zona (*exchange method*) [32]. As Figura 28 e Figura 29 mostram uma comparação entre os resultados obtidos com os algoritmos de filtragem e ajuste implementados e os resultados obtidos com um software de referência [58].



Figura 28 - Resultados para filtragem pelo filtro Gaussiano com freqüência 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 29 - Resultados para filtragem pelo filtro Gaussiano com freqüência de corte de 50 OPR e ajuste por mínima zona utilizando o software de referência (à esquerda) e o ambiente de análise (à direita).

4.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE O AMBIENTE DE ANÁLISE

O ambiente de análise está em fase de desenvolvimento, mas mostra alguns resultados positivos em termos de implementação. Algumas rotinas e ferramentas adicionais estão previstas. Para filtragem digital, estão em fase de implementação alguns métodos alternativos, como filtro por *splines*, filtro Gaussiano regressivo robusto e filtro morfológico.

Outras ferramentas, também em fase de implementação, visam realizar a comparação entre perfis no domínio do espaço e no domínio da freqüência. Essas comparações têm como objetivo: derivar as funções de transferência de

MMC; calcular a incerteza de medição com referência a perfis calibrados; e realizar ensaios de estabilidade do processo de medição com base no conteúdo harmônico.

Um estudo sobre métodos de eliminação dos *outliers* e métodos alternativos de filtragem para medição de perfis está sendo realizado, e os resultados serão em breve publicados.

5 Estudo de Caso

Com base no método de avaliação da incerteza de medição utilizando múltiplas peças calibradas foram planejados estudos de casos, que até o momento envolveu equipamentos de medição por coordenadas de uma empresa fornecedora do segmento automotivo e de um laboratório acreditado.

Foi selecionado um modelo de peça contendo especificações de forma efetivamente avaliadas pela MMC de suporte à produção. Selecionado o modelo, uma amostra com cinco peças foi aleatoriamente coletada na linha de produção. Essas peças foram medidas em duas etapas, intercaladas pela calibração das mesmas.

Na primeira etapa, as especificações selecionadas foram avaliadas com o procedimento de medição adotado no cotidiano das avaliações da produção. Foram realizados seis ciclos de medição por peça ao longo de uma ou duas semanas. As nuvens de pontos de todas as medições foram exportadas para processamento externo utilizando o ambiente de análise desenvolvido. Ao fim da primeira etapa as peças foram levadas a um laboratório prestador de serviços de calibração acreditado e calibradas utilizando equipamentos e procedimentos de referência.

De posse dos resultados da primeira etapa e da calibração, foi realizada uma avaliação do processo de medição da primeira etapa utilizando o ambiente de análise. Um novo procedimento de medição foi proposto com base no desempenho metrológico do processo de medição visando sua otimização, de modo a atender dois critérios: o cumprimento dos requisitos metrológicos e a redução dos tempos de medição.

Na segunda etapa o novo procedimento de medição foi implementado e uma nova rodada de medições foi realizada. Os resultados foram novamente avaliados pelo ambiente de análise para verificar a ocorrências das melhorias esperadas.
Foram realizadas também algumas medições fora do contexto de otimização, para verificar a interação entre o processo de medição e as variações dos desvios de forma do processo de produção.

5.1 ESTUDO DE CASO: CIRCULARIDADE EM UM TAMBOR DE FREIO

5.1.1 Informações sobre as medições

Características da peça

A peça utilizada neste primeiro estudo de caso foi um tambor de freio, apresentado na Figura 30.



Figura 30 - Medição do tambor de freio na MMC da empresa (à esquerda) e calibração (à direita).

As especificações geométricas de relevância para a medição de circularidade peça encontram-se resumidas na Tabela 4.

Tabela 4 - Características da	a superfície do tambor de	freio sendo avaliada.
-------------------------------	---------------------------	-----------------------

Características da peça					
Especificação:	Circularidade				
Tolerância:	0,012 mm				
Ø Nominal:	200 mm				
Rugosidade:	N/A				
Processo:	Brunimento				

Considerações

- A especificação avaliada foi a circularidade da pista interna;
- A peça não apresenta referência angular definida pelas especificações, mas nesse estudo foi orientada em uma direção preferencial;
- A freqüência de corte do filtro utilizado foi definido pela empresa;
- Foram medidas quatro seções de circularidade (-11, -21, -31 e -41 mm).

Calibração das peças

As peças foram calibradas em um medidor de forma, utilizando diâmetro do apalpador igual das medições, evitando tendências devido a diferentes níveis de filtragem mecânica. O posicionamento do apalpador no sentido vertical é feito manualmente, razão pela qual as peças foram alternadas entre ciclos de medição. Seis ciclos de medição foram realizados. A Figura 31 mostra um ciclo de medição para cada peça, na seção medida a -11 mm do plano de topo.



Figura 31 - Perfis dos cinco tambores de freio calibrados, seção -11 mm.

Pode-se perceber uma predominância das componentes de 2 e 3 OPR nos perfis. Os perfis com componentes de 2 OPR mais pronunciadas (2 e 5) apresentam os maiores erros de forma. Esse processo pode ser modelado pelo caso C da Figura 12.

Medições na empresa – Etapa 1

Os parâmetros de medição utilizados na Etapa 1 encontram-se na Tabela 5.

Parâmetros de medição - Etapa 1					
Velocidade de medição:	60 mm/s				
Força de contato:	0,2 N				
Número de pontos:	1548				
Taxa de amostragem:	148 pts/s				
Diâmetro do apalpador:	4 mm				
Comprimento total do apalpador:	120 mm				
Rigidez estimada:	0,106 mm/N				
Freqüência de corte:	50 OPR				
Amplitude na freqüência de corte:	0,001 mm				
Máximo diâmetro de apalpador:	197 mm				

Tabela 5 - Parâmetros de medição utilizados na Etapa 1 das medições do tambor de freio.

O procedimento de medição utilizado pela empresa alia velocidade relativamente alta com rigidez relativamente baixa do apalpador. O número de pontos do perfil seria inadequado caso fosse utilizada a freqüência de corte recomendada pela norma ISO 12181-2 (diâmetro 200 mm, 500 OPR). Alguns resultados selecionados serão apresentados e discutidos mais adiante.

Medições na empresa – Etapa 2

As principais mudanças entre as etapas 1 e 2 com relação aos parâmetros de medição foram a redução da velocidade e o aumento do número de pontos. Durante a execução das medições da Etapa 2, houve uma parada da máquina para manutenção. Os mancais aerostáticos foram trocados, pois foi verificado que apresentavam rugosidade elevada. Essa etapa foi então repetida, denominando-se Etapa 2a (antes da manutenção) e Etapa 2b (após a manutenção). Os parâmetros de medição utilizados na Etapa 2 encontram-se na Tabela 6.

Parâmetros de medição - Etapa 2a & 2b					
Velocidade de medição:	19 mm/s				
Força de contato:	0,2 N				
Número de pontos:	3696				
Taxa de amostragem:	112 pts/s				
Diâmetro do apalpador:	4 mm				
Comprimento total do apalpador:	120 mm				
Rigidez estimada:	0,106 mm/N				
Freqüência de corte:	50 OPR				
Amplitude na freqüência de corte:	0,001 mm				
Máximo diâmetro de apalpador:	197 mm				

Tabela 6 - Parâmetros de medição utilizados na Etapa 2a & 2b das medições do tambor de freio.

5.1.2 Resultados das medições

Gráfico polar de circularidade e periodograma

A Figura 32 mostra os gráficos polares e de conteúdo harmônico para a calibração e as três etapas (1, 2a e 2b) para a peça 1, ciclo 1 e seção -11 mm.





Figura 32 - Gráficos polares e do conteúdo harmônico (calibração, Etapa 1, Etapa 2a & Etapa 2b, de cima para baixo) para a peça 1, ciclo 1 e seção -11 mm.

Percebe-se que nas medições existe um ruído de alta freqüência que não faz parte do perfil, pois não foi detectado na calibração.

Esse ruído é significativamente reduzido após a redução da velocidade, e também pela manutenção da MMC.

Incerteza de medição

A Tabela 7 apresenta as incertezas de medição calculadas para as três etapas (1, 2a e 2b) para a peça 1, ciclo 1 e seção -11 mm.

Etapa 1					Uncertainty Budget	(ISO/TS 15530-3)
Symbol	Source	Value (um)	k	v	Contribution (um)	% Contribution
U .	Calibration	0.09	1 00	424		2 1%
u _{cal}	Procedure	0.00	1.00	25	0.00	12.8%
u	Workniece	0.57	1.00	4	0.57	85.2%
u _w	Womplece	0.01	1.00	7	0.01	00.270
u _c	Combined	0.61				
b	Mean Bias	0.67				
U	Expanded	2.3	2.65	5	U/Tol	19.2%
Etapa 2a					Uncertainty Budget	(ISO/TS 15530-3)
Symbol	Source	Value (um)	k	v	Contribution (um)	% Contribution
U .	Calibration		1 00	424		3 1%
ucal	Procedure	0.03	1.00	5	0.03	12.5%
u _p	Workniece	0.10	1.00	1	0.10	84 4%
u _w	workpiece	0.40	1.00	4	0.40	04.4%
u _c	Combined	0.50				
b	Mean Bias	0.24				
U	Expanded	1.6	2.65	5	U/Tol	13.3%
Etapa 2b					Uncertainty Budget	(ISO/TS 15530-3)
Cumula al	C					% Contribution
Symbol	Collibration	value (µm)	K	V 404		
u _{cal}	Calibration	0.09	1.00	424	0.09	10.5%
up	Procedure	0.14	1.00	25	0.14	26.7%
u _w	Workpiece	0.22	1.00	4	0.22	62.7%
u,	Combined	0.27				
b	Mean Bias	0.35				
Ŭ	Expanded	1.0	2.32	9	U/Tol	8.3%
-					5,101	/-

Tabela 7 – Incerteza de medição para a Etapa 1, Etapa 2a & Etapa 2b (de cima para baixo).

Pelos valores de incerteza de medição obtidos, observa-se uma melhoria significativa nos resultados de medição entre as etapas.

A principal causa da melhoria entre a Etapa 1 e a Etapa 2a foi a redução da <u>tendência média</u>, o que pode ser atribuído à redução da velocidade de medição.

A principal causa da melhoria observada entre a Etapa 2a e a Etapa 2b foi a redução da <u>variação da tendência entre peças</u>, o que pode ser explicado pelo ajuste da geometria (mecânico ou via CAA) da máquina de medir por coordenadas após a manutenção.

Análise das tendências

Como foi verificado que a variação da tendência entre peças é significativa (de fato, é a maior contribuição para a incerteza expandida), foi realizado um teste, onde as peças foram giradas em 90° com relação às medições anteriores. A Figura 33 mostra o comportamento das tendências para a Etapa 2b (0°) e 2b (90°).



Figura 33 - Variação da tendência entre peças para as peças orientadas a 0° (acima) e a 90° (abaixo).

Outra análise pode ser feita comparando-se o espectro de freqüências de um mesmo perfil (peça 1, -11 mm) medido a 0° e a 90° (Figura 34). A variação das componentes de 2 OPR (ovalização) entre orientações reforça a evidência da interação entre o processo de medição e os desvios de forma das peças.



Figura 34 - Variação na componente 2 OPR devido à rotação de peça 1 em 90°.

6 Considerações Finais

O presente trabalho apresentou um método para avaliação da incerteza de processos de medição por coordenadas utilizando múltiplas peças padrão calibradas. O modelo estatístico adotado se mostrou satisfatório, fornecendo probabilidade de abrangência coerente para as distintas magnitudes assumidas pelas componentes de incerteza.

Esse método encontra sua aplicabilidade em caso de características críticas, com intervalos de tolerância estreitos, e devido à sua abrangência na consideração das fontes de incerteza atuantes em processos e medição por coordenadas, pode ser considerado um método de referência em estudos de caráter acadêmico-científicos nesse campo. A partir dos resultados das simulações foi possível estimar qual o número de peças e de repetições por peça adequados a um estudo de avaliação da incerteza de medição pelo método proposto.

O ambiente de análise de perfis desenvolvido propicia a utilização da informação contida nos perfis adquiridos nas medições, revelando importantes características dos processos de medição de forma por *scanning* em MMC, como ruídos, distorções de origem dinâmica e mesmo desvios geométricos, como ficou evidenciado no estudo de caso realizado.

O uso de gráficos de controle na avaliação dos processos de medição das permite avaliar a robustez das estratégias de amostragem e as influências dos erros geométricos e dinâmicos da MMC sobre as medições de forma. As rotinas implementadas para eliminação de *outliers* e interpolação de perfis não uniformemente espaçados introduzem melhorias significativas na avaliação de perfis de forma.

Este ambiente de análise constitui uma ferramenta essencial para a otimização dos processos de medição de forma em MMC. Está sendo desenvolvido como um protótipo conceitual de aplicativo, podendo ser integrado a softwares de medição para execução de análises detalhadas do processo de medição.

76

Referências

- 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, *Dimensionig and Tolerancing*. American Society of Mechanical Engineers, USA.
- [3] AIAG, ASQ, Advanced Product Quality Planning & Control Plan (APQP). Reference Manual, First Edition, Automotive Industry Action Group, Troy, MI, USA, 1995.
- [4] 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.
- [5] AIAG, ASQ, *Measurement Systems Analysis (MSA)*. Reference Manual, Third Edition, Automotive Automotive Industry Action Group, Troy, MI, USA, 2002.
- [6] ISO VIM, International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology. Published Jointly by BIPM, IEC, FCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, Geneva, Switzerland, 2008.
- [7] ISO GUM, *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*. Published Jointly by BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, Geneva, Switzerland, 1995.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] ISO 10012:2003, Measurement Management Systems Requirements for Measurement Processes and Measuring Equipment. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

- [11] H. Kunzmann, et al., Productive Metrology: Adding Value to Manufacture. Annals of the CIRP, Vol. 54/2/2005, pp. 691-704.
- [12] 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.
- [13] ISO 14660-1:1999, Geometrical Product Specifications (GPS) Geometrical features Part 1: General terms and definitions. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [14] ISO/TS 12780-1:2003, Geometrical Product Specifications (GPS) Straightness Part
 1: Vocabulary and parameters of straightness. International Organization for
 Standardization, Geneva, Switzerland.
- [15] ISO/TS 12781-1:2003, Geometrical Product Specifications (GPS) Flatness Part 1: Vocabulary and parameters of flatness. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [16] ISO/TS 12180-1:2003, Geometrical Product Specifications (GPS) Cilindricity Part 1: Vocabulary and parameters of cylindrical form. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [17] ISO/TS 12181-1:2003, Geometrical Product Specifications (GPS) Roundness Part 1: Vocabulary and parameters of roundness. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [18] A.L. de Oliveira, A.R. de Sousa, Validação de Processos de Medição por Coordenadas em Operações de Controle da Qualidade. Terceiro Congresso Brasileiro de Metrologia: Metrologia para a Vida, Recife, PE, Brasil, setembro 2003.
- [19] DIN 4760, Gestaltabweichungen, Deutsches Institut Für Normung, Deutschland, 1982.
- [20] D.J. Whitehouse, Handbook of Surface Metrology, Institute of Physics Publishing. Bristol, UK, Philadelphia, USA, 1994.
- [21] 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.
- [22] H. VonWeingraber, Zur Definition der Oberflächenrauheit Werkstattstechnik. Masch. Bau, vol. 46, 1956.

- [23] ISO 11562:1996, Geometrical Product Specifications (GPS) -- Surface texture: Profile method -- Metrological characteristics of phase correct filters. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [24] ISO/TS 12780-2:2003, Geometrical Product Specifications (GPS) Straightness Part
 2: Specification operators. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [25] ISO/TS 12781-2:2003, Geometrical Product Specifications (GPS) Flatness Part 2: Specification operators. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [26] ISO/TS 12180-2:2003, Geometrical Product Specifications (GPS) Cilindricity Part 2: Specification operators. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [27] ISO/TS 12181-2:2003, Geometrical Product Specifications (GPS) Roundness Part 2: Specification operators. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [28] VDI/VDE 2617-2.2:1999, Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten Kenngrössen und deren prüfung Formmessung. VDI-Verlag, Düsseldorf, Deutschland.
- [29] VDI/VDE 2631-3:1999, Form measurement Characteristics and selection of filters. VDI-Verlag, Düsseldorf, Deutschland.
- [30] VDI/VDE 2631-1:1999, Form measurement Principals for the measurement of geometrical deviations. VDI-Verlag, Düsseldorf, Deutschland.
- [31] J. Raja, B. Muralikrishnan, S.Fu, *Recent advances in separation of roughness, waviness and form.* Precision Engineering, vol. 26, no. 2, 2002.
- [32] J. Raja, B. Muralikrishnan, Computational Surface and Roundness Metrology. Springer-Verlag London Limited, 2009.
- [33] ISO/TS 16610-1:2006, Geometrical product specifications (GPS) -- Filtration -- Part 1: Overview and basic concepts. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [34] O. Jusko, F. Lüdicke, F. Wäldele, High Precision Form Measurements with Coordinate Measurement Machines. Chemnitz. p. 341-351, 2000.

- [35] 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.
- [36] 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 (accepted, waiting publication).
- [37] 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. Aachen, 2005. 111 f. Masterarbeit - Lehrstuhl für fertigungsmesstechnik und Qualitätsmanagement -WZL/RWTH/AACHEN.
- [38] VDI/VDE 2617-3:1989, Genauigkeit von Koordinatenmeßgeräten; Kenngrößen und deren Prüfung; Komponenten der Meßabweichung des Gerätes. VDI-Verlag, Düsseldorf, Deutschland.
- [39] Reinshaw. Revo. Disponível em <u>http://www.renishaw.com/en/6658.aspx</u>. Acessado em 30.07.2009.
- [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] T. Pfeifer, *Production Metrology*. Oldenbourg Verlag, München 2002.
- [42] A. Weckenmann, T. Estler, G. Peggs, D. McMurtry, *Probing Systems in Dimensional Metrology*. Annals of the CIRP, Vol. 53, No. 2, 2004.
- [43] R.G. Wilhelm, R. Hocken, H. Schwenke, Task Specific Uncertainty in Coordinate Measurement, Manufacturing Technology, Vol. 50, No. 2, 2001.
- [44] 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.
- [45] A. Weckenmann, H. Eitzert, et al., Functionality-Oriented Evaluation and Sampling Strategy in Coordinate Metrology, Precision Engineering, Vol. 17, No. 4, October, 1995.
- [46] A. Weckenmann, M. Knauer, H. Kunzmann, The influence of measurement strategy on the uncertainty of CMM measurements, Manufacturing Technology, Vol. 47, No. 1, 1998.

- [47] R. Edgeworth, R. G. Wilhelm, Measurement uncertainty due to workpiece error interaction with sampling period, in Machining Impossible Shapes, G.J. Olling, B.K. Choi, R.B. Jerard (Eds.), Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [48] K.D. Summerhays, J.M. Baldwin, D.A. Campbell, R.P. Henke, A versatile tool for the evaluation of CMM task-specific measurement uncertainty, Proceedings of the 2005 ACMC Annual Workshop, Canada, 2005.
- [49] F.P. May, F.A. Arenhart, G.D. Donatelli, Avaliação computacional da incerteza devido à interação entre a estratégia de medição e a geometria da peça em medição por coordenadas, V Congresso Latino Americano de Metrologia, Curitiba, Brasil, 2007.
- [50] J.-P. Kruth, N. Van Gestel, P. Bleys, F. Welkenhuyzen, Uncertainty determination for CMMs by Monte Carlo simulation integrating feature form deviations, Manufacturing Technology, Vol. 58, No. 1, 2009.
- [51] 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.
- [52] 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.
- [53] 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.
- [54] V. Synek, Attempts to include uncorrected bias in the measurement uncertainty, Talanta, Vol. 65, 2005.
- [55] G.E. O'Donell, D.B. Hibbert, *Treatment of bias in estimating measurement uncertainty*, Analyst, Vol. 130, 2005.
- [56] B. Magnusson & S. L. R. Ellisonx, Treatment of uncorrected measurement bias in uncertainty estimation for chemical measurements, Anal Bioanal Chem, 2008.
- [57] 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.
- [58] Digital Metrology. Sigma Round. <u>http://www.digitalmetrology.com</u>. Acessado em 30.07.2009.