

SENSIBILIDADE NA ANÁLISE DE FORMA EM FUNÇÃO DA QUANTIDADE DE HARMÔNICAS POR REVOLUÇÃO

Claudinei José de Oliveira

Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica - PUC Minas
Av. Dom José Gaspar 500, CEP-30535610, Coração Eucarístico – Belo Horizonte - MG
claudineijo@gmail.com

Ernani Sales Palma

Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica - PUC Minas
palma@pucminas.br

Wisley Falco Sales

Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica - PUC Minas
wisley@pucminas.br

Resumo. *Este trabalho aborda os aspectos onde o efeito da filtragem e a quantidade de harmônicas por revolução pode alterar o resultado final de medição de forma geométrica e tem o objetivo de comparar várias faixas de filtragem e os resultados encontrados. Nas análises de forma circular (circularidade e cilindridade) a quantidade de harmônicas em torno de uma revolução pode aumentar ou diminuir o valor final da medição, cabendo a quem faz a análise definir o número ideal de harmônicas a ser utilizada na medição sendo que a metodologia consiste em usar o mesmo corpo de prova e variar as faixas de filtragem. Os filtros gaussiano (estatístico) e ISO 2CR (eletrônico) vêm atuar na análise de forma alterando os perfis primários originais e gerando novos perfis, conforme a natureza de cada filtro. Os efeitos de filtragem muitas vezes vêm alterar até os resultados de incerteza de medição.*

Palavras-chave: *Harmônicas, filtragem, forma, perfil, incerteza.*

1. INTRODUÇÃO

Os erros de forma nada mais são do que desvios geométricos de uma forma real em relação ao sólido perfeito. Essas imperfeições apresentam características macrogeométricas que podem comprometer o funcionamento de certos componentes. Todas essas características têm um papel fundamental no funcionamento e desempenho aos quais se propõem independentes do processo de fabricação que os originou. Problemas de desgastes prematuros, vibrações e retenção de filme de lubrificação podem ser atribuídos a essas características tribológicas.

Os processos de fabricação muitas vezes se deparam com problemas ligados a essas imperfeições. Muitas das superfícies fabricadas seja por usinagem, injeção de material ou por outros métodos de fabricação podem apresentar esse tipo de não conformidade.

O processo de filtragem do erro de forma é uma variável que pode mudar os critérios de uso de determinados componentes, esse parâmetro pode influenciar diretamente a análise de um perfil. Logo conhecer os erros de forma dos produtos manufaturados é essencial para as aplicações às quais os componentes se propõem.

Para se conhecer as características da superfície, aplica-se à filtragem elétrica do sinal do perfil, a partir de um transdutor indutivo juntamente com um *software* que faz o processamento dos dados. Quando a medição estiver descrita como sendo não filtrada isto se refere ao perfil bruto, sem o processamento eletrônico ou por *software* do sinal do perfil.

1.1. Desvios de forma

As superfícies geradas nos processos de fabricação não são superfícies perfeitas, existem detalhes que só podem ser observados quando estas são ampliadas várias vezes em relação ao seu tamanho original. Quando são observadas com recursos apropriados estas superfícies apresentam irregularidades que dependem do tipo de processo que deu origem à superfície. As Figuras 1 e 2 são exemplos de erros de forma de circularidade e coaxialidade.

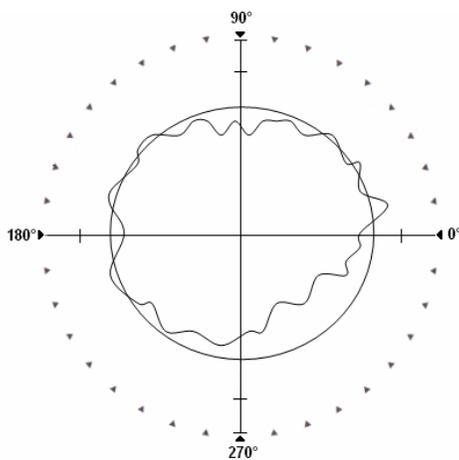


Figura 1. Desvio de circularidade.

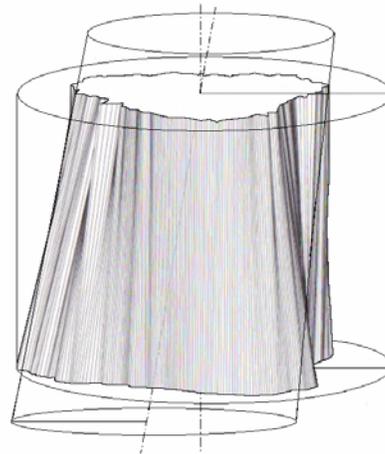


Figura 2. Desvio de coaxialidade.

Existe uma gama de erros de forma, sendo que cada um interage de maneira funcional com o tipo de utilização do componente, eles possuem uma simbologia que é normalizada pela ISO 1101:2004 e são divididos em categorias. As categorias são: Forma por elementos isolados, orientação por elementos associados e posição por elementos associados.

1.2. Sistemas de medição

Os sistemas de medição são caracterizados por um conjunto de componentes onde se tem um apalpador de ponta esférica que toca na superfície, um sistema indutivo composto por uma bobina, uma unidade de tratamento de sinais e um software que converte o sinal em forma gráfica. Os *softwares* têm a capacidade de simular as características de filtragem ISO 2CR e gaussiana.

1.3. Sistemas de filtragem

O tipo de filtro selecionado dependerá dos requisitos da análise e esses requisitos devem estar em conformidade com qualquer padrão em particular.

Segundo (Whitehouse, 1994 [1]), o filtro opera na forma da onda e conforme a onda é recebida é necessário limpar o sinal antes de poder dar resultados úteis. Assim a quantidade de dados utilizáveis em uma análise está reduzida na eficiência do filtro.

O filtro ISO 2CR foi padronizado para ter uma transmissão de 75% da amplitude máxima no ponto de corte selecionado. Isso significa que as amplitudes das irregularidades que possuírem espaçamento igual ao comprimento de corte serão reduzidas para 75% do seu valor real.

A filtragem gaussiana tem um comportamento distinto em relação a um filtro eletrônico. Ele se comporta como uma função matemática aplicada aos dados do perfil. O filtro gaussiano é uma média ponderada do perfil, onde os valores se distribuem na forma gaussiana (distribuição normal). Esse filtro tem uma função interpoladora, ou seja, ele ameniza a amplitude do sinal dando mais suavidade aos contornos da superfície (Whitehouse, 1994[1]).

A função de ponderação para o filtro gaussiano possui a equação de probabilidade gaussiana.

$$f(x) dx = \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \right] \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (1)$$

As características de transmissão são estruturadas a partir de dois componentes que são: características de transmissão da linha média e as características de comprimento de onda do perfil.

A característica do filtro é determinada a partir da função de ponderação, por meio da transformada de Fourier.

Efeito das filtragens ISO 2CR e gaussiana na análise de forma geométrica

Os filtros ISO 2CR e gaussiano se comportam de forma análoga na análise de forma geométrica. O que deve ser levado em conta é que a análise de forma geométrica é uma análise macro de uma superfície. Nas Figuras 3 e 4 são mostrados atuação dos filtros ISO 2CR e gaussiano na análise de forma geométrica em uma faixa de 15-500 UPR (*Undulations Per Revolution*) harmônicas por 15 revoluções.

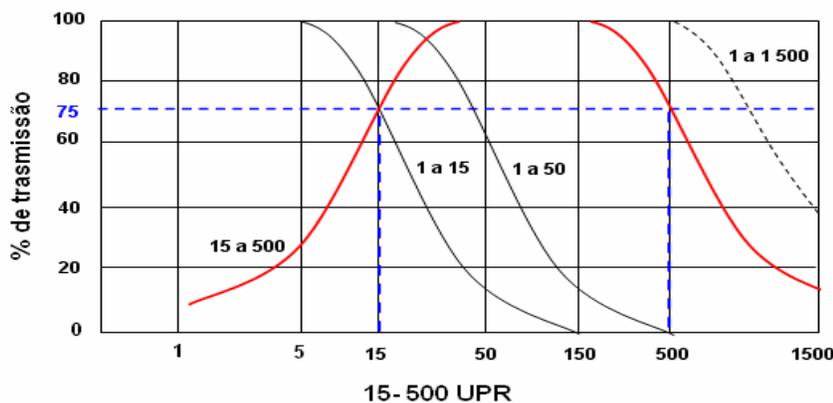


Figura 3. Filtragem de forma geométrica com filtro ISO 2CR (Taylor Hobson, 2000 [2]).

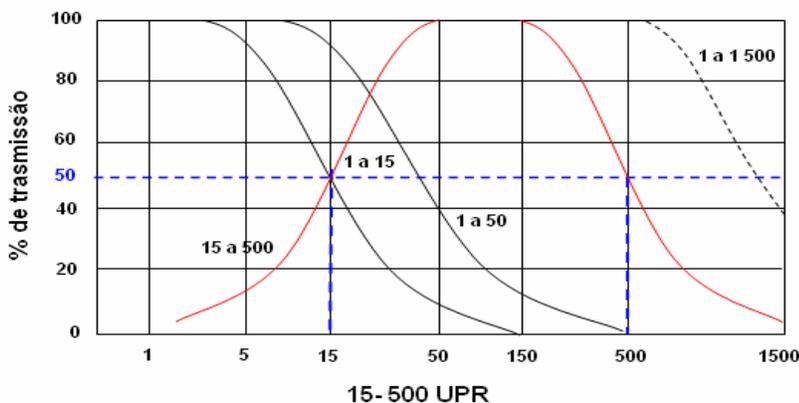


Figura 4. Filtragem de forma geométrica com filtro gaussiano (Taylor Hobson, 2000 [2]).

2. REFÊRENCIAS PARA ANÁLISE DE FORMA

Segundo Whitehouse (1994) [1], um perfil pode ser dividido da seguinte maneira: análise sem filtragem (perfil P), análise de rugosidade (perfil R), análise de ondulação (perfil W) e análise de forma.

O perfil P é composto de rugosidade, ondulação e forma. O perfil R, apenas de rugosidade e o perfil W de ondulação. A forma é uma análise macrogeométrica e é analisada em separado.

2.1. Processo de filtragem dos perfis das superfícies

Quando um perfil vai ser dimensionado é necessário separar os componentes que estão integrados em sua totalidade. Um perfil pode ser decomposto em uma série de características como pode ser visualizado nas componentes da Figura 5.

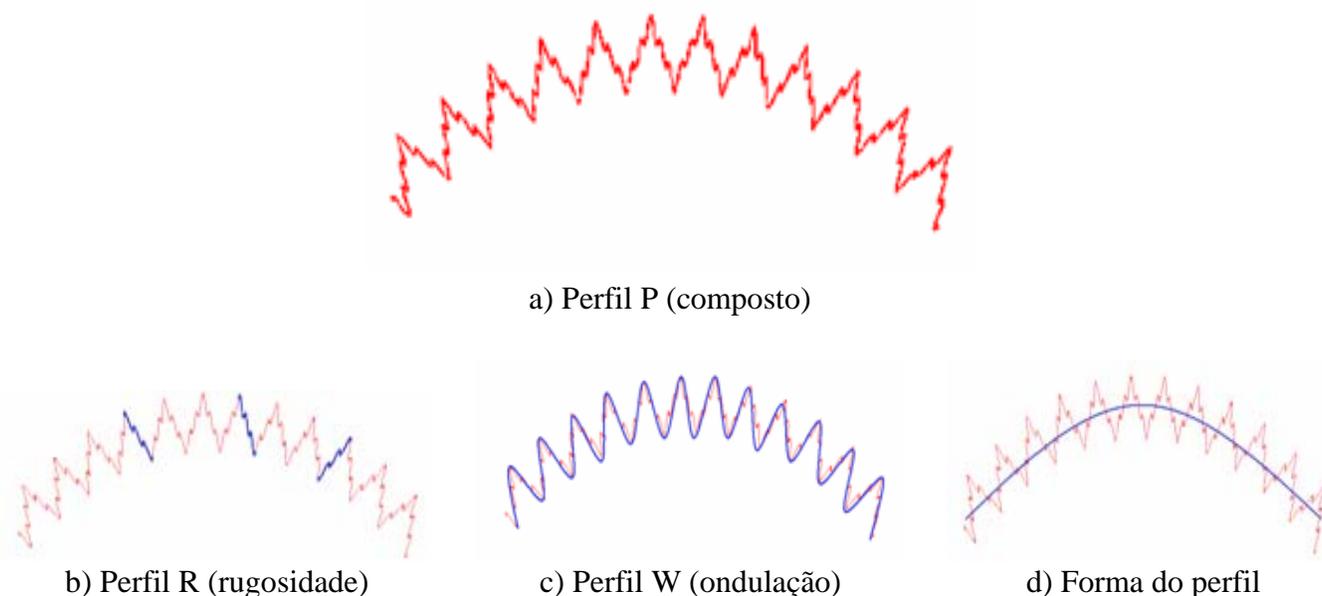


Figura 5. Componentes de um perfil primário.

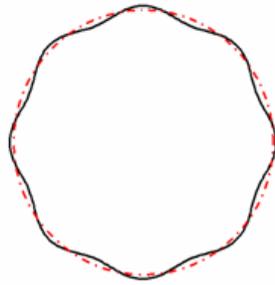
Quando as superfícies são mensuradas é necessário se retirar componentes de ondas que não fazem parte do perfil e que são oriundos de vibrações ou outras fontes de interferência.

É comum usar filtros eletrônicos tipo passa-alta/ passa-baixa, filtragem mecânica pelos apalpadores dos equipamentos e *Cutt-offs*. Estes são intervalos selecionados ao longo de perfis de comprimento, onde a quantidade de pontos pode ser variável de acordo com a sensibilidade da análise. As medições de forma por revolução ainda usam filtros UPR (*Undulations Per Revolution*) que são baseadas nas Transformadas de Fourier. A Fig. 6 mostra ao efeito da filtragem UPR.

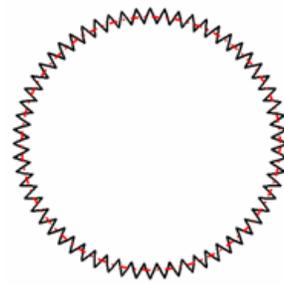
2.2. Ondulações por revolução (UPR)

As análises de forma em seções circulares são feitas através da revolução do componente em torno do seu próprio eixo. A sensibilidade da análise é dada conforme a quantidade de harmônicas analisadas em uma revolução.

A quantidade de harmônicas tomadas na análise pode por em evidência características da superfície. Uma análise 1:15 UPR isola a vibração captada em uma revolução e mede apenas os desvios da forma (remove a 60ª harmônica). Já uma análise 15:500 UPR elimina o erro de forma e analisa apenas a vibração contida na revolução (remove a 8ª harmônica). A Figura 6 coloca lado a lado para visualização do efeito da filtragem.



a) Filtro 1:15 UPR



b) Filtro 15:500 UPR

Figura 6. Efeito do filtro em função da quantidade de harmônicas (Taylor Hobson, 2000 [2]).

3. REFERÊNCIAS PARA ANÁLISE DE FORMA GEOMÉTRICA

Cada superfície fabricada possui uma aplicação específica, e de acordo com o regime de trabalho destas superfícies, as análises devem ser feitas em pontos máximos, mínimos ou médios do perfil (ISO 1101).

3.1. Linha de Mínimos Quadrados (MQ)

A linha de Mínimos Quadrados (MQ) é uma linha de referência média habitualmente usada, a linha reta de mínimos quadrados é usada para um melhor ajuste dos dados de medição, para a avaliação do perfil primário. Ela é posicionada de maneira que a soma dos quadrados dos desvios do perfil a partir da linha seja mínima, como é mostrado na Fig. 7. Isso fornece uma linha de referência única através dos dados de perfil (ISO 1101:2004 [3]).

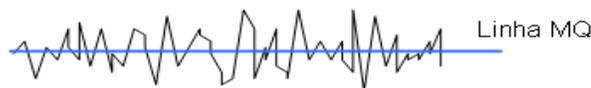


Figura 7. Linha de referência MQ (Mínimos Quadrados).

3.2. Linhas de Mínima Zona (MZ)

A referência por zona mínima é definida por um par de linhas retas, paralelas que incluem apenas o perfil completo, de maneira que a distância entre as linhas (a zona) seja mínima (ISO 1101:2004). A linha de referência exibida é a posição média entre estas duas linhas e à qual todos os cálculos de parâmetro se referenciam. A Figura 8 mostra onde as linhas MZ são posicionadas.

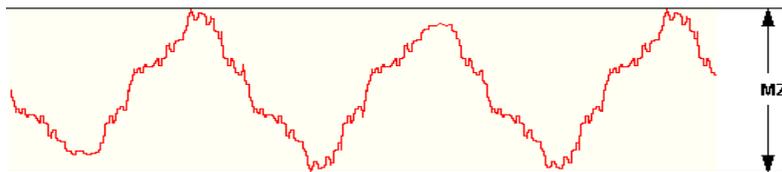


Figura 8. Explicação gráfica de linhas MZ (Whitehouse, 1994[1]).

4. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Esse trabalho foi desenvolvido no laboratório de metrologia da FIAT Powertrain, onde temperatura e umidade são controladas rigorosamente, para atender os requisitos da ISO TS 16969 e o equipamento utilizado se encontrava calibrado e em perfeitas condições de uso.

Todas as análises foram feitas em um eixo de transmissão, cuja seção analisada foi à sede do retentor, pois essa seção passa pelos processos de retificação e lixamento a seção analisada é evidenciada na Figura 9.



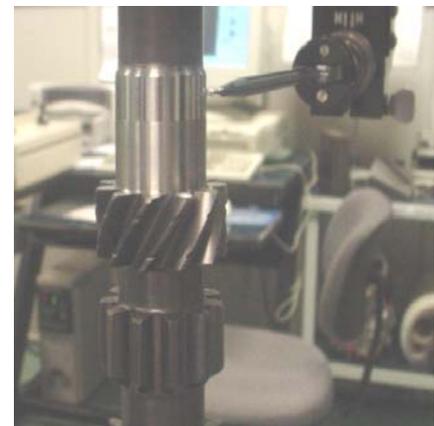
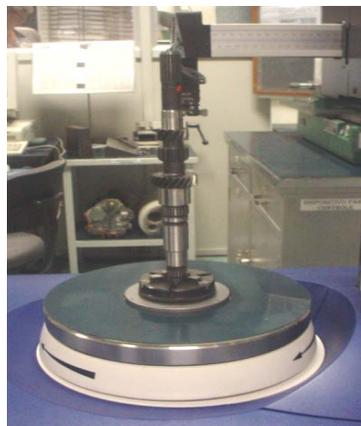
Figura 9. Eixo primário (árvore primária).

Foram analisadas condições de funcionamento da peça e a confiabilidade e repetitividade do equipamento utilizado na medição através do levantamento do cálculo de incerteza de medição.

5. ANÁLISE DE FORMA GEOMÉTRICA

O medidor de forma utilizado na experimentação é um equipamento fabricado pela empresa *Taylor Hobson*. Este equipamento é mostrado na Fig. 10 (a). A medição é feita através de contato direto com a superfície a ser analisada. O medidor de forma geométrica é capaz de analisar uma superfície plana ou cilíndrica e fornecer os valores dos desvios encontrados em relação à forma geométrica ideal.

Antes da medição, a peça precisa passar por um processo de alinhamento e nivelamento antes de iniciar a medição Fig 10 (b). O sistema de apalpagem é constituído de uma bobina indutiva e haste de fibra de carbono com uma esfera de safira sintética fixada na ponta, como é mostrado na Fig. 10 (c).



a) Medidor de forma geométrica

b) Alinhamento da peça

c) Medição por contato

Figura 10. Sistema de medição de forma geométrica por revolução.

6. ANÁLISE DAS INCERTEZAS DAS MEDIÇÕES DE FORMA

Após as medições de circularidade e cilindridade, foi necessário levantar o grau de confiabilidade dos resultados, através da determinação da incerteza de medição ISO GUN 1997 [4]. O grau de abrangência usado neste trabalho é de 95,45% de confiabilidade.

Antes foi necessário verificar se existiam variações consideráveis entre os valores obtidos nas medições, que poderiam comprometer os resultados obtidos.

O teste de *Dixon* (ISO 5725 [5]) foi aplicado onde foi possível verificar se existiam “outliers” nas medições, que são valores representados pelos erros aleatórios que poderiam estar presentes nas medições.

O teste foi aplicado nos resultados obtidos com filtragem gaussiana e ISO 2CR em todos os parâmetros de desvios de forma que foram analisados por revolução, sendo que nenhum ficou fora do valor tabelado pelo teste.

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados dos desvios padrão das medições de circularidade e cilindridade com filtragem gaussiana e ISO 2CR estão na tabela 1. Nessa tabela se encontram todos os valores dos desvios padrões encontrados na faixa de medição. Vale ressaltar que as medições foram feitas por contato na superfície da peça, onde uma esfera de safira (\varnothing 5 mm) minimizou os efeitos dos sulcos da textura superficial, assim evidenciando os contornos dos desvios de forma. Como foram feitas mais de uma medição no ponto, levantou-se a aleatoriedade pelo desvio padrão das 5 medições.

Tabela 1. Desvios padrão dos erros de cilindridade e circularidade em função do filtro.

| Faixa de filtragem | Filtro gaussiano | | Filtro ISO 2CR | |
|--------------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| | Característica | | Característica | |
| | Cilindridade (μm) | Circularidade (μm) | Cilindridade (μm) | Circularidade (μm) |
| 1:15 UPR | 0,0179 | 0,0249 | 0,0217 | 0,0274 |
| 1:50 UPR | 0,0167 | 0,0295 | 0,0402 | 0,0707 |
| 1:150 UPR | 0,0691 | 0,1006 | 0,1256 | 0,1560 |
| 1:500 UPR | 0,1469 | 0,2076 | 0,1544 | 0,2136 |

Todos os desvios padrão foram colocados na forma de gráficos, onde são comparadas a filtragem gaussiana e ISO 2CR. A figura 11 representa a variação do desvio padrão da cilindridade em relação à faixa de filtragem e ao tipo de filtro utilizado na análise. A figura 12 representa a variação do desvio padrão da circularidade em relação à faixa de filtragem e ao tipo de filtro utilizado na análise. A mesma tendência repete-se na medição de circularidade com a filtragem ISO 2CR.

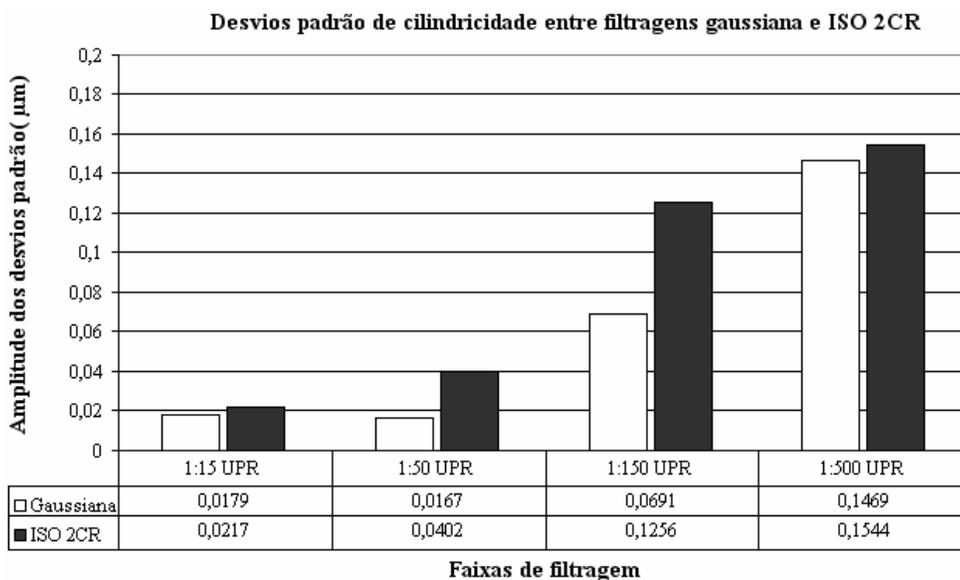


Figura 11. Variação dos desvios padrão nas medições de cilindridade.

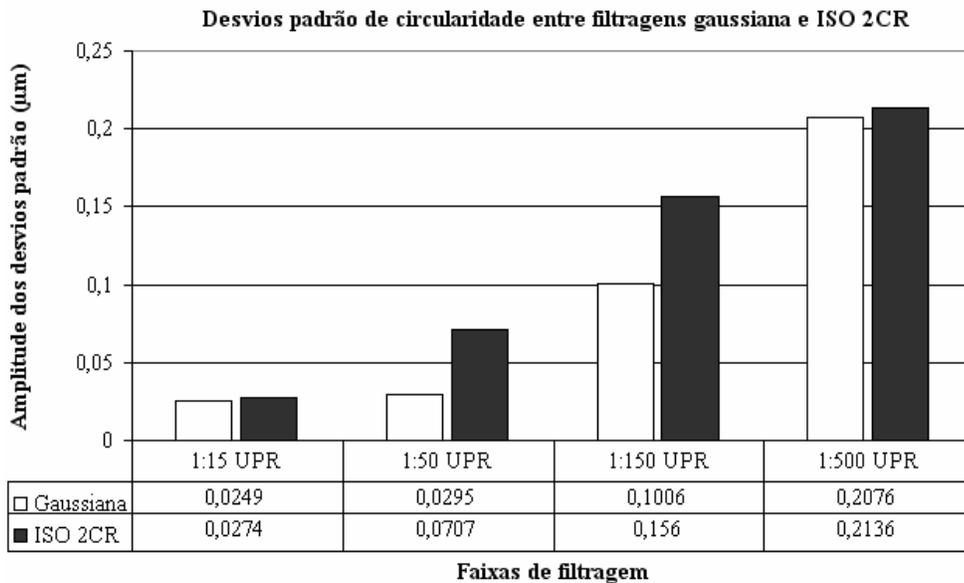


Figura 12. Variação dos desvios padrão nas medições de circularidade.

Observa-se que a utilização de filtros ISO 2CR provocou uma maior amplitude dos desvios padrão. Esta diferença fica bastante evidente nas faixas de filtração 1:50 e 1:150 UPR.

7.1. Incerteza de medição de forma

O cálculo da incerteza padronizada Tipo A foi realizado pelo desvio padrão das medições de forma. As incertezas Tipo B consideradas foram as seguintes: **0,1° C de variação da temperatura durante os ensaios; Coeficiente de dilatação térmica da liga de aço; Coeficiente de dilatação térmica da safira do apalpador; Incerteza herdada do termohigrógrafo; Comprimento analisado; Diâmetro medido; Resolução do equipamento.**

Com base nos desvios padrão dos erros de forma, além das demais grandezas de influência, as incertezas para cada parâmetro medido foram determinadas. As figuras 13 e 14 representam as incertezas encontradas nos resultados de cilindricidade, circularidade, retilidade e paralelismo com filtração gaussiana e ISO 2CR.

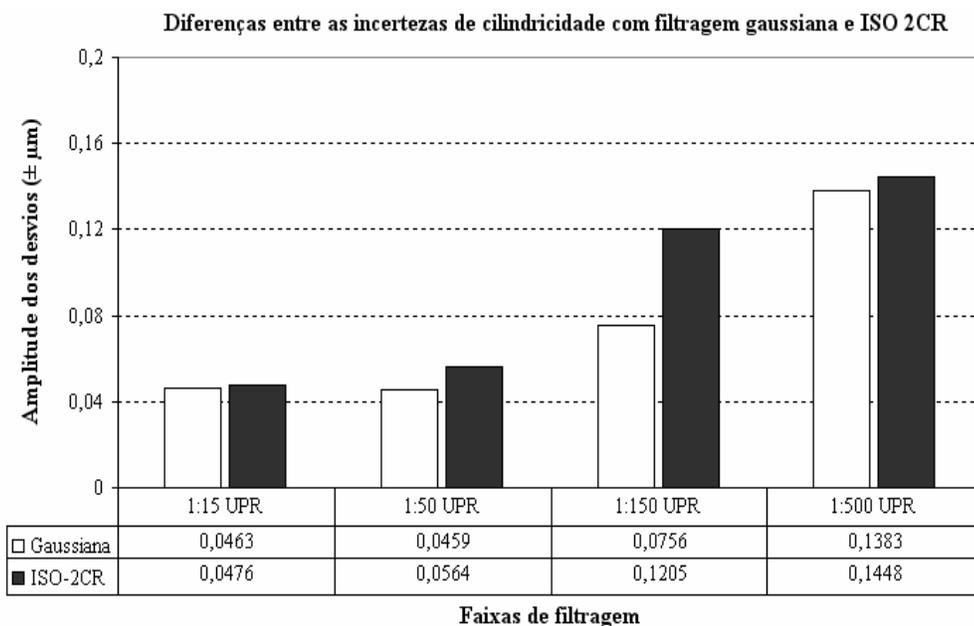


Figura 13. Incertezas das medições de cilindricidade.

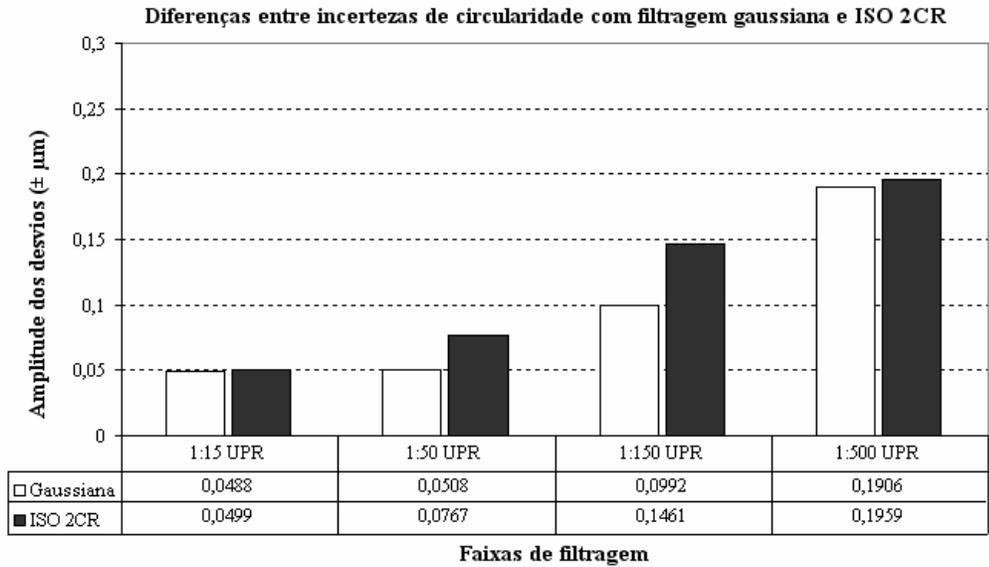


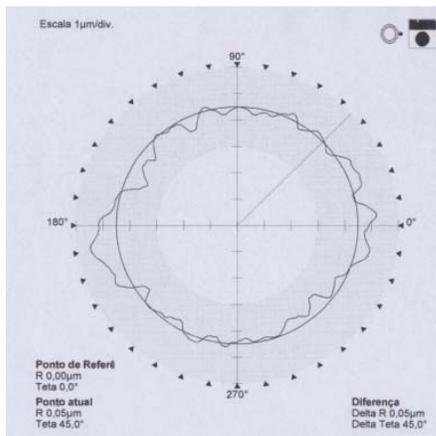
Figura 14. Incertezas nas medições de circularidade.

8. DISCUSSÕES SOBRE OS RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DE FORMA

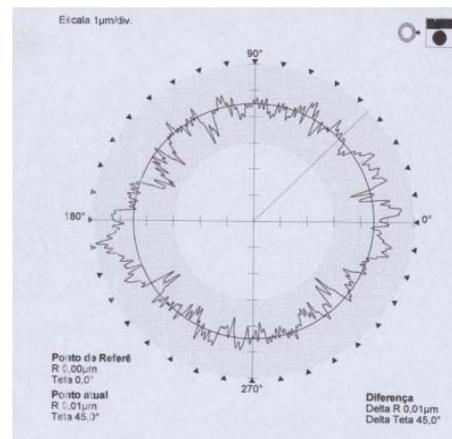
Devido à característica do filtro gaussiano de arredondar a amplitude dos picos, existirá um número muito maior de picos totalmente intersecantes à linha de referência com filtragem ISO 2CR do que com a filtragem gaussiana, o filtro gaussiano arredondará os picos minimizando-os na análise.

A menor diferença encontrada com filtro gaussiano em medições de forma se deve a característica que este filtro possui de arredondar os picos em saídas de vales profundos, isso acontece tanto em análises circulares como em retilíneas.

À medida que se aumenta a quantidade de harmônicas analisadas ao longo de uma revolução, aumenta-se também a probabilidade de arredondamento de picos, o que explica a diferença dos resultados entre as análises dos perfis com filtro gaussiano e ISO 2CR. As Figuras 15 (a) e (b) e 16 (a) e (b) mostram como os filtros ISO 2CR e gaussiano atuam nos perfis, o aumento da quantidade de harmônicas utilizadas aumenta a sensibilidade da análise. À medida que a sensibilidade na análise da forma aumenta, também aumenta o valor correspondente à análise, ou seja, quanto mais harmônicas são consideradas maior é o resultado da medição.

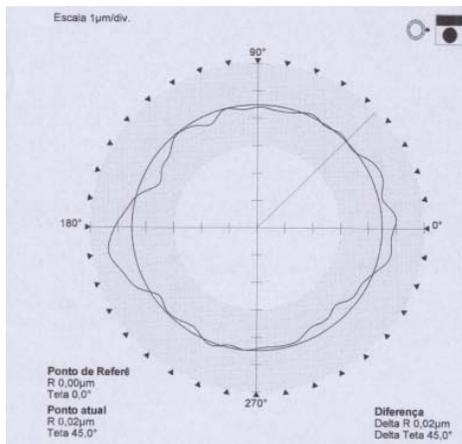


a) Análise 1:15 (UPR) com filtro ISO 2CR.

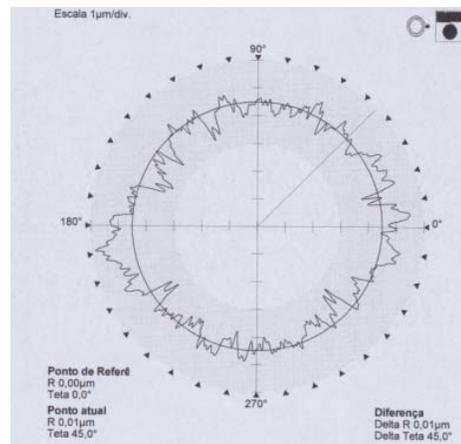


b) Análise 1:150 (UPR) com filtro ISO 2CR.

Figura 15. Efeito do filtro ISO 2CR nas medições de forma em faixas de filtragem distintas.



a) Análise 1:15 (UPR) com filtro gaussiano.



b) Análise 1:150 (UPR) com filtro gaussiano.

Figura 16. Efeito do filtro gaussiano nas medições de forma em faixas de filtragem distintas.

9. CONCLUSÕES SOBRE AS MEDIÇÕES DE FORMA

- Dependendo do tipo de aplicação do componente, a análise com filtragem gaussiana pode-se mostrar mais eficiente devido ela ser menos sensível que a ISO 2CR.
- A quantidade de ondulações utilizadas na análise também influencia no resultado da medição. Quanto mais ondulações são usadas em uma análise, mais sensível ela se torna e com isso pode ser que o perfil analisado não corresponda fielmente às características para as quais ele foi fabricado, ou seja, super dimensionado para a aplicação prevista.
- As incertezas são diferentes em função do tipo de filtro.

AGRADECIMENTOS

A Fiat Powertrain e Fiat Automóveis S. A. pela disponibilidade dos equipamentos necessários à realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A) documentos impressos

livros

1. Whitehouse, David J. Handbook of Surface Metrology. Leicester – England, 1994.
2. Taylor Hobson Precision. Guide to Surface Texture Parameters, 2000.

Normas

ISO 1101. Technical drawings - Geometrical Tolerancing - Tolerancing of Form, Orientation, Location and Run-out - Generalities, Definitions, Symbols, Indications on Drawings (ISO Book), 2004.

ISO GUM. Guide Uncertainty Measurement. (Instituto Nacional de Metrologia, Duque de Caxias: INMETRO), 1997.

ISO 5725-2. Accuracy (trueness and precision) of Measurement Methods and Results-Part 2: basic method for the Determination of Repeatability and Reproducibility of a Standard Measurement Method, 1994.