



Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

**Dissertação de Mestrado**

**Avaliação da Influência de Sistemas de  
Filtragem Aplicados a Topografia de  
Superfície em Usinagens**

**Claudinei José de Oliveira**

**Orientador:** Prof. Wisley Falco Sales, Dr.  
**Co-Orientador:** Prof. Ernani Sales Palma, Dr - Ing.

Belo Horizonte, 20 de dezembro de 2004.



Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

## **Dissertação de Mestrado**

# **Avaliação da Influência de Sistemas de Filtragem Aplicados a Topografia de Superfície em Usinagens**

**Claudinei José de Oliveira**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC Minas como parte dos requisitos para obtenção do título de MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA MECÂNICA.

**Orientador:** Prof. Wisley Falco Sales, Dr.

**Co-Orientador:** Prof. Ernani Sales Palma, Dr - Ing.

### **Banca Examinadora:**

Prof. Wisley Falco Sales, Dr. - PUC Minas - Presidente, Orientador  
Prof. Ernani Sales Palma, Dr. - Ing. - PUC Minas - Co-Orientador  
Prof. Marcelo Becker, Dr. - PUC Minas - Membro Interno  
Prof. Sandro Cardoso Santos, Dr. - CEFET/MG - Membro Externo  
Prof. Roberto Márcio Andrade, Dr. - UFMG - Membro Externo

Belo Horizonte, 20 de dezembro de 2004.

A Deus,  
aos meus pais, José Alpino de Oliveira e  
Idalina Margarida de Almeida,  
a minha querida “dona onça” Simônia,  
a minha filha Hanna,  
a meus irmãos, Nívia e Ricardo,  
a todos os meus amigos.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos Professores Wisley Falco Sales, Ernani Sales Palma pelo apoio e orientação neste Trabalho.

À Fiat-GM Powertrain, uma empresa que busca sempre o sucesso, além de uma grande escola que prepara continuamente seus profissionais para pensar, criar e superar desafios.

Ao Engenheiro César Rocha gerente da unidade Operativa Transmissões e o Sr. Marc Meigs, que conseguiram ver em mim, habilidades que aos olhos de outros, não foram vistas, ou simplesmente ignoradas, obrigado pela oportunidade.

Aos meus amigos João Bernardes, Altino M. Filho, Denílson, Wallisson, Lúcia, Laudelino, Saionara, Ângela e a aqueles de que não me lembrei o nome.

Aos meus colegas de trabalho Márcio Zarattini e João Bosco, grandes conhecedores dos assuntos abordados, obrigado pela ajuda na preparação deste trabalho.

Aos colegas da sala de engrenagem.

À Qualidade Manufatura Powertrain por propiciar o ambiente e os recursos para elaboração deste trabalho.

A todos, o meu muito obrigado.

## RESUMO

Este trabalho aborda os aspectos de medição onde o efeito da filtragem na análise dos resultados pode alterar o resultado final de medição de forma e rugosidade. Na análise 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 utilizadas na medição. Na análise ao longo de comprimentos determinados, como os desvios de retitude e paralelismo, os pontos de corte (*cut-offs*) que são determinados também podem alterar o resultado de medição. Na análise de textura superficial (rugosidade), os filtros utilizados podem mudar sutilmente ou mesmo drasticamente os resultados de medição, tudo em função da quantidade de pontos por *cut-off* tomados para análise. Os filtros gaussiano (estatístico) e ISO 2CR (eletrônico) vêm atuar na análise de forma e textura superficial 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.

## **ABSTRACT**

This work investigates the measurement aspects taking into account the effect of the filtration in the analysis of the results, the final result of form measurement and roughness may be altered according to the types of filters. In the analysis in a circular way (roundness and cylindricity), the amount of harmonics around a revolution can increase or reduce the final value of the measurement, the one who makes the analysis may define the ideal number of harmonics to be used in the measurement. In the analysis along certain lengths, as the straightness deviations and parallelism, the cut points (cut-offs) determined can also alter the measurement result. In the analysis of superficial texture (roughness), the used filters can change subtly or even drastically the measurement results; everything in function of the amount of points for cut-off taken for analysis. The gaussian filters (statistical) and ISO 2CR (electronic), influence the form analysis and superficial texture altering the original primary profiles and generating new profiles, according to the nature of each filter. The filtration effects usually come to alter even the results of measurement uncertainty.

## Lista de Símbolos e Abreviaturas

2D = Duas Dimensões

3D = Três Dimensões

Fig. = Figura

Tab. = Tabela

X e Y = Plano bi-dimensional

$\surd$  = Acabamento superficial com desbaste de material

$\lambda_c$  = Comprimento analisado

$\phi$  = Distorção de fase

UPR = Ondulações Por Revolução

2CR = Dois Capacitores e um Resistor

*Cut-off* = Ponto de corte

P = Perfil de rugosidade composto

R = Perfil de rugosidade filtrado

W = Perfil de ondulação filtrado

$\frac{dz_i}{dx}$  = Derivada no ponto

$R_a$  = Média aritmética dos desvios da superfície

$R_q$  = Raiz quadrada da média dos quadrados do perfil

$R_t$  = Altura máxima de rugosidade

$R_z$  (DIN) = Média dos cinco maiores picos e maiores vales de um perfil

RHSC = Contagem de pontos altos de rugosidade

$R_{pm}$  = Média aritmética dos valores dos picos abalizados em um comprimento

$R_{3y}$  = Média do terceiro pico e terceiro vale analisado em todos os *cut-offs*

$R_c$  = Média das amplitudes contidas no perfil

$R_p$  = Altura máxima de pico a linha média

$R_s$  = Média dos espaçamentos dos picos

$R_{tm}$  = Média das amplitudes máximas de todos os *cut-offs*

$R_v$  = Profundidade máxima do vale a linha média

$R_{3z}$  = Média do terceiro pico em todos os *cut-off*

$R_m$  = Razão de material (fração de contato)

$R_{pk}$  = Região de pico no perfil

$R_k$  = Região de máximo contato

$R_{vk}$  = Região de vale no perfil

$R_{ku}$  = Distribuição e forma dos picos em um perfil

MQ = Média quadrática

MZ = Mínima zona

$S_a$  = Desvio do plano médio de rugosidade

$S_q$  = Desvio das alturas dos picos em relação ao plano médio

$S_z$  = Altura dos dez pontos no plano

$S_k$  = Assimetria da superfície em relação a plano médio

$S_{ku}$  = Distribuição e forma dos picos na superfície

$U_a$  = Incerteza Tipo A

$U_b$  = Incerteza Tipo B

$U_c$  = Incerteza combinada

$U$  = Incerteza expandida

$\nu_{\text{eff}}$  = Graus de liberdade efetivos

$\nu$  = Grau de liberdade

$K$  = Fator de abrangência

# ÍNDICE

<b>Capítulo 1</b>	<b>1</b>
Introdução	1
1.1 Histórico	2
1.2 Objetivos gerais do trabalho	3
1.2.1 Objetivos específicos	3
1.3 Organização do trabalho	4
<b>Capítulo 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>6</b>
2.1 Superfícies reais de engenharia	6
2.1.1 Tipos de acabamento.	7
2.2 Sistemas de medição	8
2.2.1 Quantidade de pontos para análise.	13
2.2.2 Larguras de bandas ( <i>cut-off</i> )	15
2.2.3 Importância da largura de banda	15
2.3 Sistema de filtragem	16
2.3.1 Efeitos dos tipos de filtro	17
2.3.2 Filtro ISO 2CR	18
2.3.3 Filtro gaussiano	20
2.3.4 Dados descartados na medição de textura superficial	24
2.3.5 Efeito <i>aliasing</i> .	25
2.3.6 Efeito dos filtros nos resultados	26
2.4 Parâmetros de textura superficial em topografia 2D e referências para análise de forma	27
2.4.1 Parâmetros de rugosidade mais utilizados.	29
2.4.2 Referências para análise de textura superficial e forma	45

2.4.3 Visão geral de parâmetros.	47
2.4.4 Normalização de análise.	49
2.5 Textura superficial com análise 3D	50
2.5.1 Métodos de medição	50
2.5.2 parâmetros de topografia 3D mais utilizados	54
2.5.3 Visão geral de parâmetros de topografia 3D mais utilizados	57
2.6 Tendências nas medições de topografia de superfície	58
2.7 Incerteza de medição	59
2.7.1 Construção das hipóteses de trabalho	59
2.7.2 Determinação da função de medição	61
<b>Capítulo 3 – PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS</b>	<b>65</b>
3.1 Materiais	65
3.1.1 Descrição das etapas de fabricação	66
3.2 Metodologia empregada nos ensaios experimentais	68
3.2.1 Medidor de forma geométrica	69
3.3 Medidor de textura superficial	71
3.4 Análise das incertezas	75
<b>Capítulo 4 – ANÁLISE DOS RESULTADOS</b>	<b>77</b>
4.1 Resultados das medições de forma	77
4.2 Resultado das medições de rugosidade	79
4.3 Resultado das medições 3D	81
4.4 Análise da incerteza das medições	85
4.4.1 Erro de forma	85
4.4.2 Textura superficial (rugosidade)	90



# Capítulo 1

## Introdução

Quando se fala em textura superficial (rugosidade), sempre vem à idéia do parâmetro  $R_a$ . Este é apenas um dos parâmetros de dimensionamento dentro do universo de análise de textura.

As texturas superficiais são imperfeições derivadas dos vários processos de fabricação de uma superfície, podendo essas imperfeições apresentar características macrogeométricas (erro de forma) e microgeométricas (rugosidade).

A Engenharia Mecânica se depara com muitos problemas ligados a superfícies conformadas, seja por usinagem, injeção de materiais ou por outros métodos de fabricação.

A textura superficial, ou simplesmente a rugosidade destas superfícies, tem um papel fundamental no funcionamento ao quais estas se propõem.

O atrito e a rugosidade estão diretamente ligados. A engenharia pesquisa formas de diminuir, ou até mesmo aumentar o atrito entre as superfícies, dependendo da sua aplicação.

As imperfeições remanescentes dos diversos processos de obtenção das superfícies esta diretamente ligada ao grau de acabamento.

Atualmente, a engenharia procura conhecer e selecionar parâmetros de rugosidade que melhor dimensionem as características especificadas nas

superfícies. O processo de filtragem também é uma variável que influencia diretamente na obtenção destes parâmetros.

Hoje já se sabe como é importante conhecer a topografia gerada nas superfícies beneficiadas e relacioná-la a capacidade produtiva e de ajuste.

Os desvios geométricos, ou simplesmente erros de forma, também são características que podem comprometer o funcionamento de certos componentes. O erro de forma nada mais é do que o desvio entre uma forma geométrica ideal e a forma real obtida.

Logo conhecer os valores da textura superficial e os erros de forma é essencial para se adequar o processo produtivo.

Para se conhecer as características da superfície, aplica-se a 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. Histórico**

Desde a revolução industrial na Inglaterra, as tecnologias de fabricação vêm evoluindo, mas sempre o atrito está presente na determinação da vida útil dos componentes de máquinas e nos custos de manutenção. Assim, a única forma de atenuar o efeito do atrito é conhecendo as irregularidades das superfícies.

Alemanha e Inglaterra eram os países mais desenvolvidos no começo do século e foram os primeiros a iniciar os estudos neste campo da Tribologia.

Em meados da 1ª Grande Guerra, ambos os países já dominavam como controlar a rugosidade média das superfícies, e aplicaram esta tecnologia em seus parques industriais.

A Alemanha no período da 2ª Grande Guerra aplicou amplamente os resultados das pesquisas sobre textura superficial nas máquinas de guerra.

Desde então, as pesquisas não pararam e é sabido das vantagens de se fabricar produtos dentro de certos parâmetros de rugosidade.

As principais tecnologias no controle de forma geométrica e textura superficial ainda são de domínio inglês e alemão, e como esses dados são filtrados e analisados pelos rugosímetros e medidores de forma geométrica ainda deixam dúvidas, portanto se faz necessário o estudo do comportamento dos perfis, de acordo com o tipo de filtro que usa para mensurar as superfícies em questão.

Observa-se nos últimos 15 anos, que diversos pesquisadores têm investigando a relação entre a avaliação da textura superficial, medida no plano (x e Y), e as suas limitações. Novas formulações e instrumentações necessárias para a avaliação tridimensional da superfície estão em desenvolvimento, (Stout, 1992 e Thomas, 1998).

Outras justificativas para a realização deste trabalho são os problemas que ocorrem dentro do processo produtivo (Fiat – GM powertrain), relacionados à forma geométrica e textura superficial, além do problema relacionado à escassa literatura científica específica disponibilizada aos ambientes acadêmicos e industriais.

## **1.2. Objetivos gerais do trabalho**

O objetivo deste trabalho consiste em avaliar, por meio de ensaios experimentais, a aplicação de sistemas de filtragem em parâmetros de textura superficial e forma geométrica em componentes provenientes do processo de fabricação.

### **1.2.1. Objetivos específicos**

O objetivo geral do trabalho foi dividido nos seguintes objetivos específicos:

- Avaliar a confiabilidade dos equipamentos envolvidos através de cálculo de incertezas;
- Realizar ensaios comparativos entre tipos de filtros;
- Relacionar os resultados de cada sistema de filtragem com as características funcionais dos componentes;
- Estabelecer uma metodologia para especificação do filtro em função da necessidade e dos parâmetros de topografia de superfície;
- Avaliar estatisticamente os resultados, com um mínimo de 95% de confiabilidade;

### **1.3. Organização do trabalho**

Na apresentação do texto, este trabalho foi subdividido em capítulos. No presente, faz-se uma introdução ao trabalho, enfocando o estudo e mostrando os principais objetivos.

No Capítulo 2 apresenta-se a “Revisão Bibliográfica” do assunto, no qual foram abordados os temas sobre filtragem e os aspectos tribológicos entre superfícies. Esse Capítulo tem como objetivo proporcionar o entendimento básico das teorias relevantes ao trabalho, promover um maior aprofundamento no estudo e entender os comportamentos observados nos ensaios experimentais.

O Capítulo 3 trata dos “Procedimentos Experimentais”, onde são apresentadas as metodologias, os materiais, os equipamentos para a realização dos experimentos e dos instrumentos de medição utilizados neste trabalho.

No Capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios experimentais realizados, confrontando as possíveis diferenças encontradas no processo de filtragem.

As “Discursões dos Resultados” são apresentadas no Capítulo 5.

No Capítulo 6 as “Conclusões” visam complementar o presente trabalho.

As “Referências Bibliográficas” são apresentadas após o Capítulo 6.

As páginas finais deste trabalho são reservadas para os anexos que compõem este trabalho, como Norma específica tomada como referência.

## Capítulo 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordados os tópicos relevantes para o desenvolvimento do trabalho proposto. Ele foi dividido nos seguintes tópicos: superfícies reais de engenharia, sistemas de medição, sistemas de filtragem, parâmetros de topografia de superfície, tendências nas medições de topografia de superfície e análise de incertezas.

#### 2.1. SUPERFÍCIES REAIS DE ENGENHARIA

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, as orientações (sentido) das irregularidades dependem do tipo de processo que deu origem à superfície.

Deve-se salientar que as superfícies reais de engenharia são compostas do perfil sem filtragem, ou seja, compostas de forma, ondulação e rugosidade.

Segundo Whitehouse *et al.* (1970) a qualidade gerada na superfície determina muitas características da peça trabalhada tais como sua efetividade de lubrificação e a vida de componentes que estão diretamente em contato, entre outros.

Em uma superfície podem ser encontradas muitas outras marcas como trincas produzidas por impacto térmico, transferência de material e crateras produzidas por fratura de grão (Thomas, 1982).

As superfícies podem ser representadas de duas formas: representação 2D como na Fig. 2.1 e 3D como pode ser visto na Fig. 2.2.

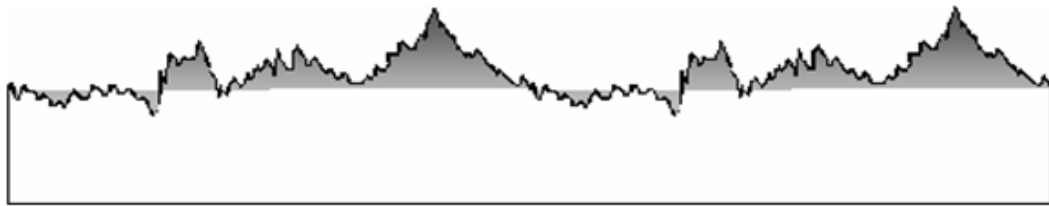


Figura 2.1 - Superfície real vista em duas dimensões (2D).

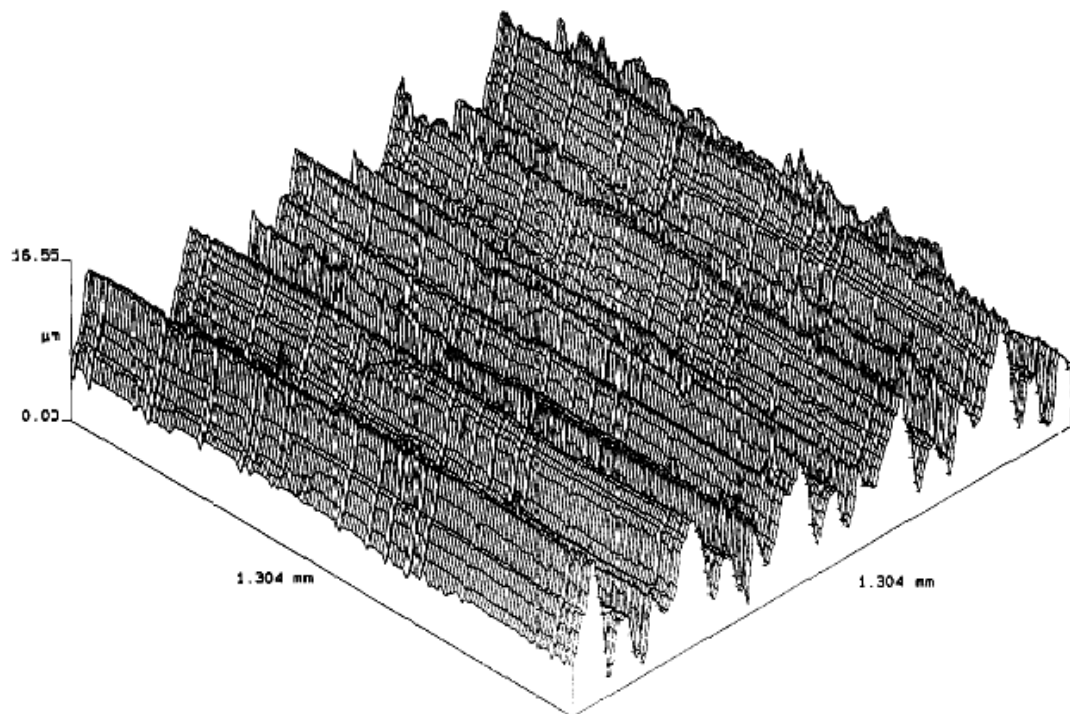


Figura 2.2 - Superfície real vista em três dimensões (3D) (Dong et al,1992).

### 2.1.1. Tipos de acabamento

Cada processo depende de sua especificação, podendo gerar superfícies distintas umas das outras.

A maneira de analisar uma superfície está relacionada às orientações dos sulcos provenientes do processo de fabricação, conforme mostrado na Fig. 2.3 (Whitehouse, 1994).

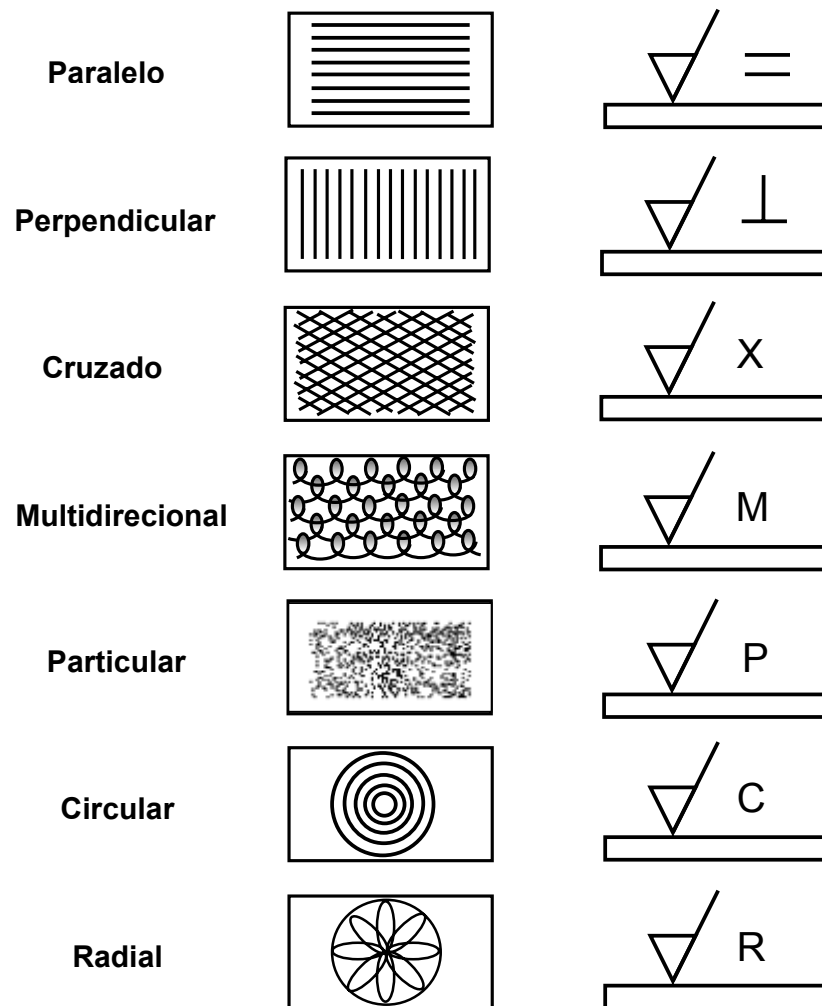


Figura 2.3 - Tipos de acabamento (Whitehouse, 1994).

## 2.2. SISTEMAS DE MEDIÇÃO

A maneira na qual uma superfície é mensurada implica diretamente no resultado encontrado. O valor mais aproximado do ideal é quando as medições são feitas perpendiculares aos sulcos remanescentes dos processos de fabricação, (Whitehouse, 1994).

Existe um grande número de itens que podem afetar os resultados de uma medição de superfície, os principais são: o comprimento e forma do apalpador, o avanço e o ataque do apalpador, as características do amplificador, a precisão do raio a ser medido, e efeitos de filtragem mecânica.

### i. Comprimento e forma do apalpador

O comprimento do apalpador pode influenciar no resultado de uma medição caso o apalpador não esteja balanceado. A forma do apalpador também pode não representar com fidelidade os contornos da superfície.

### ii. Avanço e ataque de flanco do apalpador

O ataque de flanco é a posição em que um dos lados do apalpador toca na superfície para começar a medição.

A velocidade de avanço juntamente com o ângulo de ataque que o apalpador possui pode influenciar no resultado de uma medição, dependendo do tipo de acabamento da superfície. Pode haver variações consideráveis em medições repetidas, se a velocidade de avanço e o ângulo de ataque no flanco do apalpador não tiverem condições ideais de percorrerem a superfície.

Quando o contato com o componente não é feito com a extremidade do apalpador resultados errôneos são obtidos, como é mostrado nas Figuras 2.4 e 2.5.

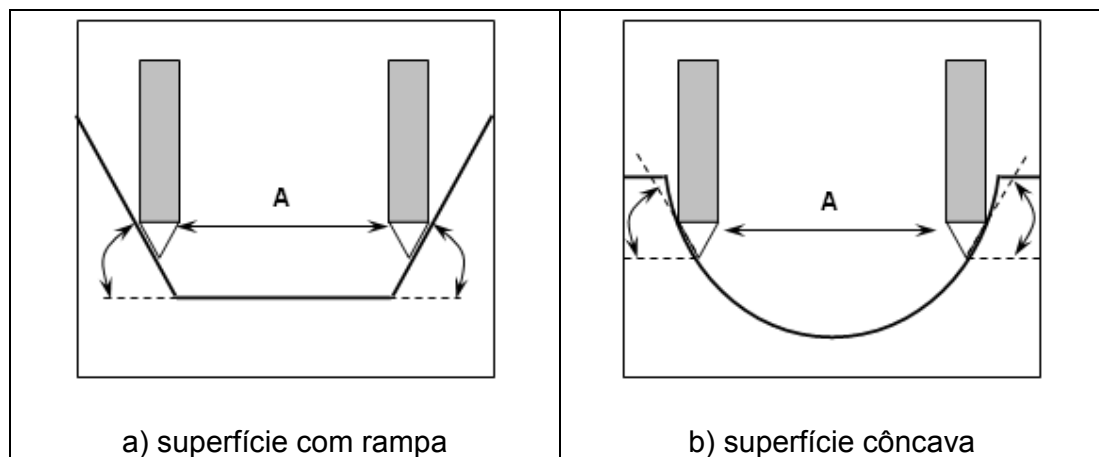


Figura 2.4 - Ângulo de ataque do apalpador (Taylor Hobson, 2000).

Como pode ser observado na Fig. 2.4, dependendo do contorno da superfície, este efeito de captar dados errôneos pode ser maior ou menor.

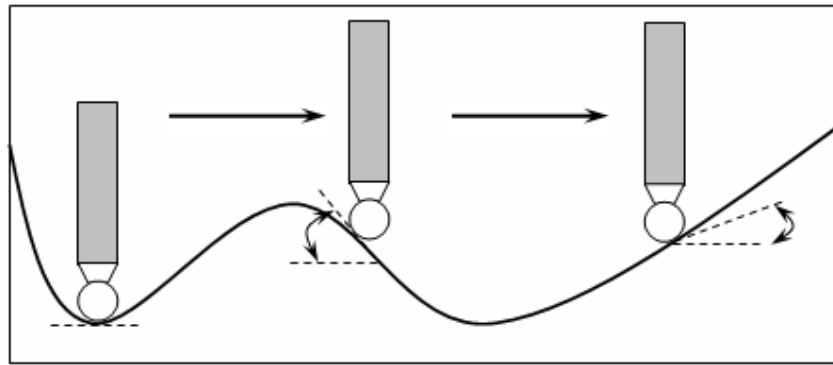


Figura 2.5 - Variação no ponto de contato da esfera (Taylor Hobson, 2000).

Como é mostrado na Fig. 2.5, devido à ponta do apalpador ser esférica, existe variação no ponto de contato em relação aos contornos da superfície.

### iii. Características do amplificador

Todos os sistemas amplificadores eletrônicos possuem um limite superior finito para a faixa de frequência. A faixa de frequência é normalmente restrita a fim de melhorar a influência do ruído. (Whitehouse, 1994).

A quantidade de ruído introduzida é diretamente relacionada à largura de banda, ou seja, a frequência do sinal capturado pelo sistema é de alta resolução. Assim é comum projetar um amplificador capaz de capturar a frequência mínima necessária (Whitehouse, 1994).

Quando o instrumento de medição utiliza um gravador de gráficos para fornecer um gráfico do perfil, a resposta mecânica do sistema do gravador introduzirá uma limitação adicional em altas frequências a qual define os limites para a largura de banda e neste caso podem induzir ruído ao sistema.

### iv. Precisão da medição de raio

Ao medir um pequeno raio, a rugosidade da superfície pode influenciar a precisão do resultado obtido. Para superfícies com raios maiores, a

precisão da medição depende mais da calibração do equipamento do que do sentido de avanço do apalpador.

A precisão pode ser influenciada pelos seguintes aspectos: condição da ponteira, o acabamento da superfície a ser mensurada, o erro de forma da superfície, etc.

Quaisquer efeitos anormais além destes fatores degradarão ainda mais a precisão de medição do raio, conforme a Fig. 2.6 (Taylor Hobson, 2000).

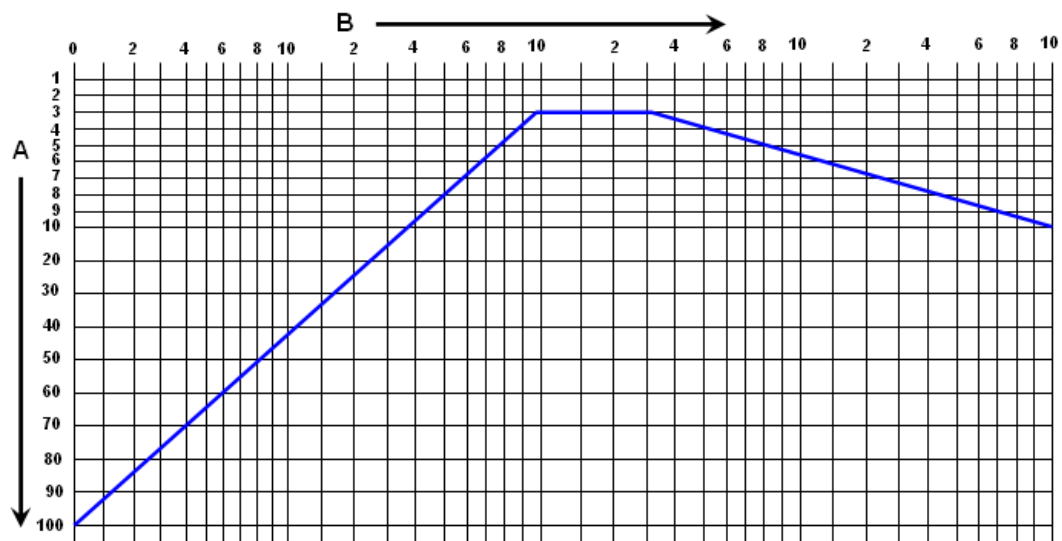


Figura 2.6 - Condição da precisão para medições de raios

Onde:

A = % de precisão do raio nominal

B = Precisão do raio (mm)

Observa-se na Fig. 2.6 uma proporcionalidade, onde à medida que o percentual de precisão do raio nominal aumenta, também aumenta a precisão do valor medido no raio.

#### **v. Efeitos de filtragem mecânica**

Os resultados podem ser influenciados pelas dimensões da extremidade da ponteira (apalpador). A ponta do apalpador possui um raio com as dimensões entre 2 e 5  $\mu\text{m}$ .

Em uma medição o movimento da ponteira seguirá com precisão os contornos da superfície que está sendo copiada. No entanto, conforme a curvatura da superfície aumenta, há uma tendência da ponteira suplantar quaisquer depressões com um pequeno raio, reduzindo sua sensibilidade para os componentes de comprimento de onda curtos.

A declaração acima é verdadeira, em superfícies de comprimento de onda constante. Superfícies mais suaves em geral possuem um comprimento de onda mais curto e assim podem frequentemente ser mais suscetíveis aos efeitos da filtragem mecânica do que em superfícies mais ásperas (Whitehouse, 1994).

A geometria do apalpador em relação à superfície nem sempre é capaz de entrar e copiar completamente uma depressão de um perfil, devido aos sulcos serem menores que o diâmetro da extremidade da ponteira. Com isso ela será completamente desviada por uma elevação de formato semelhante ao da superfície. A figura 2.7 mostra o apalpador se deslocando sobre a superfície com duas vistas distintas: uma vista macro sem detalhes da superfície e outra micro com detalhes da superfície. O efeito de filtragem da extremidade da ponteira dependerá, portanto da simetria ou assimetria do perfil da superfície.

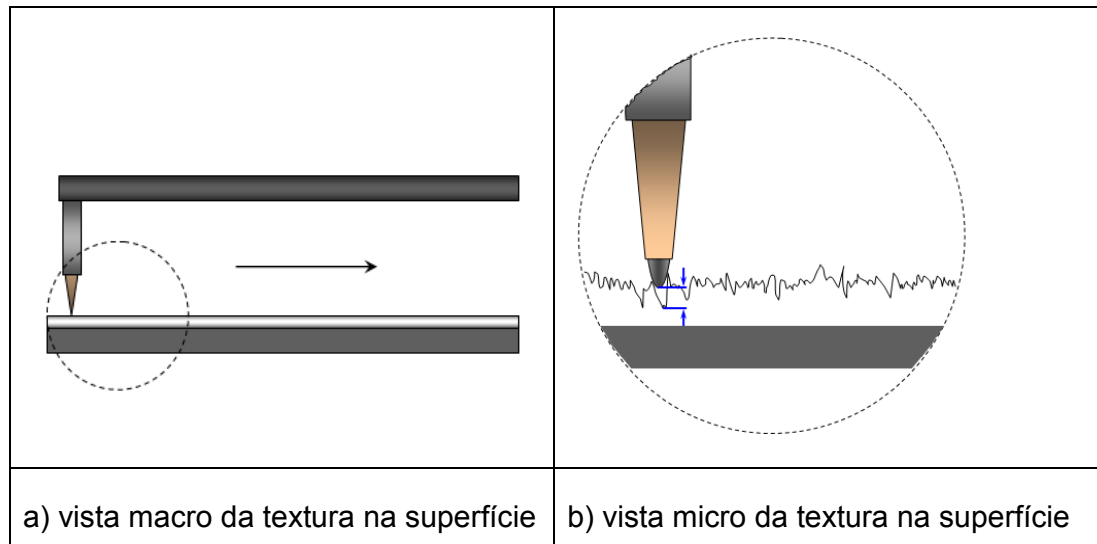


Figura 2.7 - Ponta do apalpador sobre a superfície com duas vistas.

### 2.2.1. Quantidade de pontos para a análise

O número máximo de pontos coletados em um perfil é 120.000. A partir de 100 pontos por *cut-off* já se tem uma representatividade razoável da superfície. O registro dos dados é executado em intervalos que podem variar de 2,5  $\mu\text{m}$  a 0,25 mm.

As seguintes condições devem ser observadas:

- ✓ Pelo menos cinco pontos devem ser utilizados para corte passa baixas, não é necessário ser um número inteiro. A utilização de no mínimo cinco pontos é a condição mínima para ponderar uma média de baixa frequência para o corte;
- ✓ A razão de redução dos dados deve ser um número inteiro;
- ✓ A razão de largura de banda máxima é 1000: 1;
- ✓ Com exceção dos cortes passa-baixas de 0,08 mm em espaçamento de 0,25 mm em espaçamento de 1  $\mu\text{m}$ , as larguras de banda só podem ser formadas a partir de uma razão dos comprimentos de corte padrão. Esse procedimento fornece razões de largura de banda de 100:1, aproximadamente 300:1 e 1000:1.

A redução dos dados é realizada para diminuir o número de pontos utilizados em cálculos. Esse procedimento é executado utilizando um filtro de alisamento que requer uma razão de redução de número inteiro. Nas Tabelas 2.1 e 2.2 são mostradas as combinações de largura de banda disponíveis (Taylor Hobson, 2000).

O filtro de alisamento estabiliza a frequência do sinal.

Tabela 2.1 - Largura de banda disponível em um espaçamento de 2,5  $\mu\text{m}$ .

Corte				Razão da largura de banda	Razão de redução	pontos
Passa - alta		Passa - baixa				Passa - alta / Passa - baixa
mm	pontos	mm	pontos	-----	-----	-----
0,08	320	0,00125	5	64:1	1	320/ 5
0,25	1000	0,0025	10	100:1	2	500/ 5
0,8	3200	0,008	32	100:1	5	640/ 6,4
0,8	3200	0,0025	10	320:1	2	1600/ 5
2,5	10000	0,025	100	100:1	20	500/ 5
2,5	10000	0,008	32	312,5: 1	5	2000/ 6,4
2,5	10000	0,0025	10	1000:1	2	5000/ 5
8,0	32000	0,08	320	100:1	64	500/ 5
8,0	32000	0,025	100	320:1	20	1600/ 5
8,0	32000	0,008	32	1000:1	5	6400/ 6,4

Tabela 2.2 - Largura de banda disponível em um espaçamento de 1  $\mu\text{m}$ .

Corte				Razão da largura de banda	Razão de redução	pontos
Passa - alta		Passa - baixa				Passa - alta / Passa - baixa
mm	pontos	mm	pontos	-----	-----	-----
0,25	250	0,005	5	50:1	1	250/ 5
0,8	800	0,008	10	100:1	1	800/ 8
2,5	2500	0,0025	25	100:1	5	500/ 5
2,5	2500	0,008	8	312,5: 1	1	2500/ 8
8,0	8000	0,08	80	100:1	16	500/ 5
8,0	8000	0,025	25	320:1	5	1600/ 5
8,0	8000	0,008	8	1000:1	1	8000/ 8
25,0	25000	0,25	250	100:1	50	500/ 5
25,0	25000	0,08	80	312,5: 1	10	2500/ 8
25,0	25000	0,025	25	1000:1	5	5000/ 5

### **2.2.2. Largura de bandas (*Cut-off*)**

Existem limites para o conteúdo do comprimento de onda de uma superfície que podem afetar uma medição.

O limite superior é definido pelo comprimento do próprio avanço transversal de medição. Os outros limites são definidos pela extremidade da ponteira, pela resposta elétrica ou mecânica do sistema de medição e a taxa de amostragem com as quais os dados de perfil são digitalizados antes de serem processados por um computador. Portanto, a descrição da filtragem em termos de corte é simplificada, uma vez que ela sugere que não há limite inferior para os comprimentos de onda de superfície que possam ser detectados.

É mais preciso descrever a resposta de um instrumento como estando dentro de uma banda de comprimentos de onda, isto é, entre o comprimento de onda de corte e o menor comprimento de onda que possa ser detectado. Essa é a largura de banda do instrumento e normalmente é expressa com a razão dos dois comprimentos de onda limites. Para a maior parte dos casos, uma razão de largura de 100:1 demonstrou ser adequada (Taylor Hobson, 2000).

### **2.2.3. Importância da largura de banda**

Uma largura de banda constante é importante para os componentes multiprocessados atender os seguintes requisitos:

- i. Os parâmetros relacionados à inclinação ou a curvatura são muito sensíveis aos comprimentos curtos de onda e podem ser dominados por eles. O uso de uma largura de banda constante garante que as medições realizadas serão de igual para igual (Whitehouse, 1994).
- ii. Os sistemas convencionais permitem que a geometria da ponteira defina o limite inferior da largura de banda. Como a geometria não é facilmente definida ou controlada, é preferível o uso de uma largura de banda que possa ser definida (Taylor Hobson, 2000).

- iii. O uso de largura de banda selecionável permite que uma correlação sensível de medições seja realizada em um comprimento de avaliação longa (Taylor Hobson 2000).

### 2.3. SISTEMAS DE FILTRAGEM

A maneira em que os instrumentos de ponteira respondem aos diferentes espaçamentos das características de superfície foi tradicionalmente descrito como perfil não filtrado.

O comprimento de onda de corte é definido por um filtro que remove os componentes de comprimento de onda mais longos dos dados do perfil. A convenção utilizada em Engenharia Eletrônica para descrever tal filtro é passa alta.

Um filtro passa-alta remove os componentes de comprimento de onda mais longo do sinal do perfil (Whitehouse, 1994).

Segundo Whitehouse (1994), três fatores produzem características de filtragem distintas e elas podem gerar diferentes resultados nos parâmetros de rugosidade, são elas: a geometria da ponteira, as características elétricas do amplificador e o intervalo de amostras.

O termo “comprimento de onda de corte” refere-se às características de espaçamento de superfície às quais o instrumento irá responder e para que a medição da textura da superfície esteja normalmente na faixa de 0,08 a 8 mm.

Isso significa que um o instrumento definido para um corte de 0,8 mm, quaisquer efeitos de superfície que possuïrem um espaçamento muito superior não serão exibidos no perfil registrado, ou afetarão os parâmetros de textura de superfície calculados pelo instrumento. Isso pode ser conseguido pela filtragem elétrica do sinal do perfil a partir do transdutor ou pela filtragem por *software* durante o processamento de dados.

Quando a medição estiver descrita como sendo não filtrada, isso se refere somente ao processamento eletrônico ou por *software* do sinal do perfil.

Os *softwares* têm a capacidade de simular as características de filtragem ISO 2CR e gaussiana.

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

### 2.3.1. Efeito dos tipos de filtro

O modo mais fácil para separar os componentes de sinal em uma base de frequência é através do uso de filtros. Eles têm a grande vantagem de ajustar em cima de uma curva algum tipo de polinômio.


Segundo (Whitehouse, 1994), 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 efeito de se utilizar diferentes tipos de filtro é demonstrado no caso extremo de um componente com inclinações de perfil vertical. A distorção aparente do perfil real não afeta em muito a avaliação de parâmetros, esta situação é exemplificada na Tab. 2.3, onde é representado o sinal capturado pelo apalpador e o efeito da filtragem ISO 2CR e gaussiana.

Nota-se que o filtro ISO 2CR, nas saídas de vales, tende a criar falsos picos e estes são incorporados na análise.

Já o filtro gaussiano possui a característica de maior estabilidade devido à faixa de corte, com isso falsos picos são retirados da análise.

Tabela 2.3 - Efeito dos tipos de filtro nas análises de textura.

A	Sem filtro	
B	Filtro ISO 2CR	
C	Filtro gaussiano	

### 2.3.2. Filtro ISO 2CR

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 possuem espaçamento igual ao comprimento de corte serão reduzidas para 75% do seu valor real.

As amplitudes das irregularidades com um comprimento de onda menor que a amplitude de corte quase não será alterada. Porém as amplitudes das irregularidades nos comprimentos de onda maiores serão progressivamente reduzidas. Na Fig. 2.8 são apresentados os pontos de corte para esse tipo de filtro na análise de rugosidade.

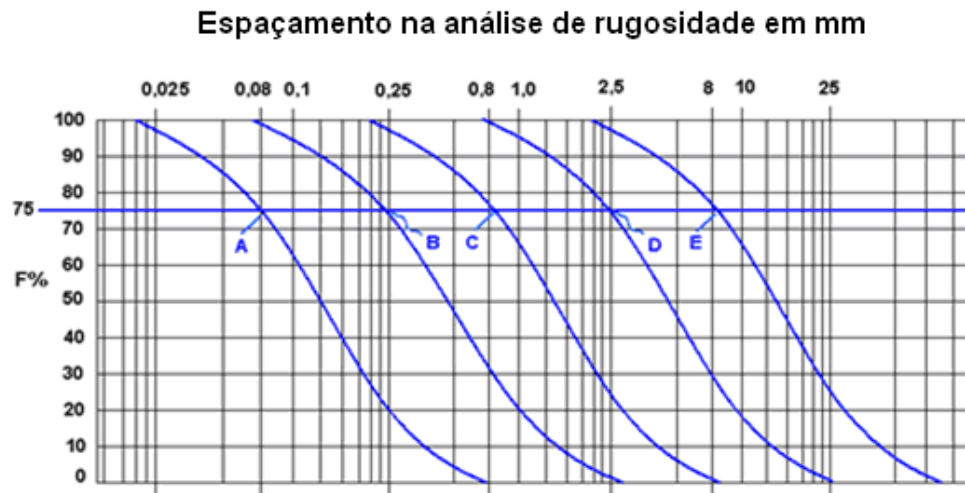


Figura 2.8 - Ação do filtro ISO 2CR no perfil de rugosidade (Taylor Robson, 2000).

Na Fig. 2.9, são mostrados os pontos de corte na análise de ondulação, nota-se que o sentido do sinal e o inverso da rugosidade e os espaçamentos não são os mesmos.



Figura 2.9 - Ação do filtro ISO 2CR no perfil de ondulação (Taylor Robson, 2000).

Os detalhes deste filtro na análise de rugosidade e ondulação são os seguintes:

#### i. Análise de rugosidade

A transmissão de amplitude para uma forma de onda senoidal é definida pela razão de transmissão de amplitude, ou seja:

$$\frac{\text{Entrada}}{\text{Saída}} = \frac{3}{3 + \alpha^2} \quad (2.1 a)$$

Onde:

$$\alpha = \frac{\text{entrada } \lambda}{\text{corte } \lambda} \quad (2.1 b)$$

Há uma distorção de fase ( $\phi$ ) dependente de  $\alpha$  de tal modo que:

$$(\phi) = 2 \left( \tan^{-1} \frac{\alpha}{\sqrt{3}} \right) \quad (2.2)$$

## ii. Análise de ondulação

Os parâmetros de ondulação são definidos da mesma maneira que seus equivalentes de rugosidade, mas as avaliações são realizadas utilizando os dados de superfície que possuem comprimentos de onda superior ao corte selecionado, como é mostrado na Fig. 2.9.

A razão de transmissão de amplitude é igual a:

$$\frac{\text{Entrada}}{\text{Saída}} = \frac{3}{3 + \beta^2} \quad (2.3 \text{ a})$$

Onde:

$$\beta = \frac{\text{corte } \lambda}{\text{entrada } \lambda} \quad (2.3 \text{ b})$$

Existe outra variação do filtro ISO 2CR. Esta variação é conhecida como 2CR-PC, que possui fase corrigida e tem o comportamento aproximado do gaussiano.

### 2.3.3. Filtro gaussiano

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).

Uma propriedade do filtro gaussiano é a capacidade de levar em consideração os dados antes e depois da posição efetiva da ponta do apalpador.

O filtro gaussiano corta em 50% a amplitude máxima da transmissão dentro da banda.

A Fig. 2.10 representa o efeito do filtro gaussiano no perfil de rugosidade, onde pode ser visto o ponto de corte na frequência do sinal.

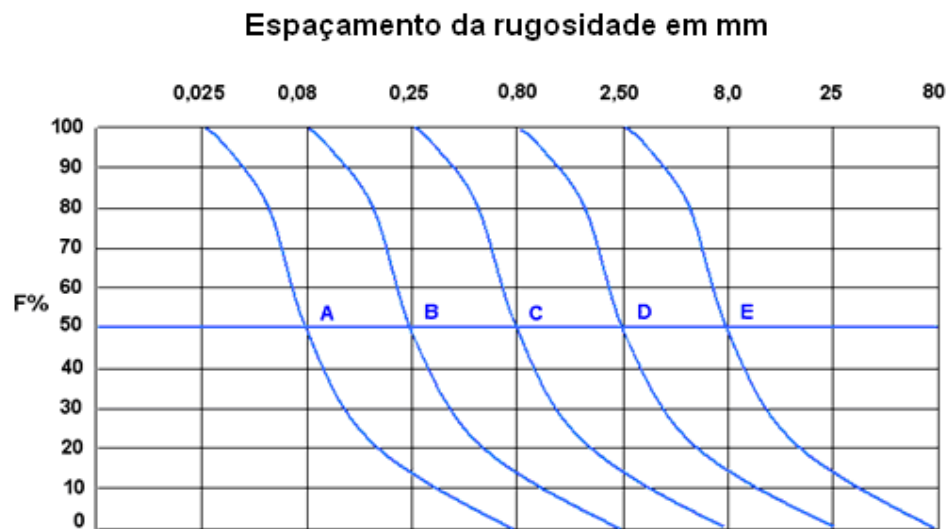


Figura 2.10 - Efeito da transmissão do filtro gaussiano no perfil de rugosidade (Whitehouse, 1994).

A Fig. 2.11, de forma análoga, representa o mesmo efeito no perfil de ondulação, nota-se que o espaçamento é idêntico nos dois casos apenas o sentido da transmissão muda.

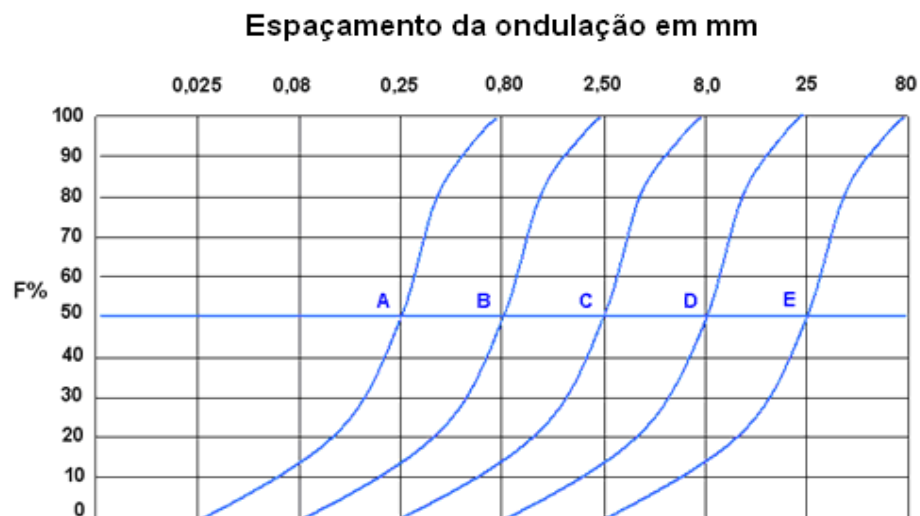


Figura 2.11 - Efeito da transmissão do filtro gaussiano no perfil de ondulação (Whitehouse, 1994).

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

$$f(x) dx = \left[ \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \right] \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (2.4)$$

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.

O perfil de rugosidade é a diferença entre o perfil real e a linha média. A característica do filtro é, portanto a diferença entre as características do comprimento de onda do perfil de rugosidade.

### **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 2.12 coloca lado a lado para visualização o efeito da filtragem.

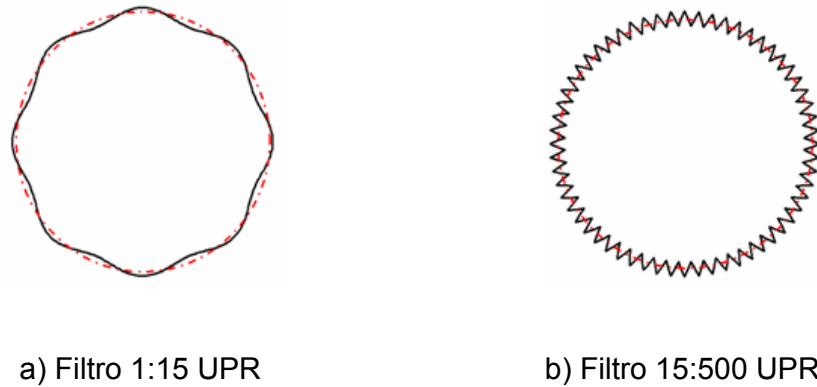


Figura 2.12 - Efeito da filtragem em função da quantidade de harmônicas (Taylor Hobson, 2000).

### 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, enquanto a de textura superficial é uma análise micro da mesma.

Nas Figuras 2.14 e 2.15 são mostrados atuação dos filtros ISO 2CR e gaussiano na análise de forma geométrica em uma faixa de 500 harmônicas por 15 revoluções.

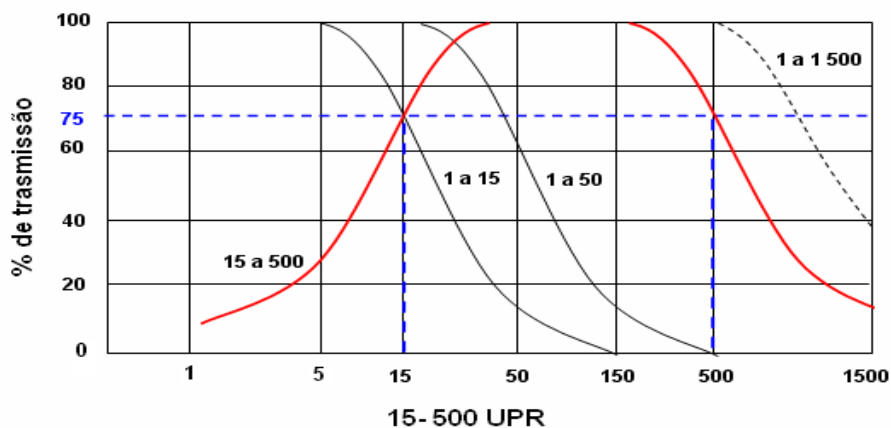


Figura 2.13 - Filtragem de forma geométrica com filtro ISO-2CR (Taylor Hobson, 2000).

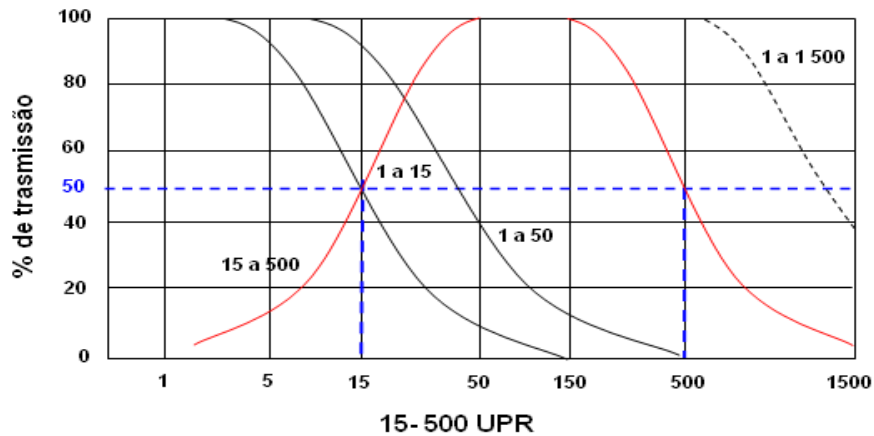


Figura 2.14 - filtragem de forma geométrica com filtro gaussiano (Taylor Hobson, 2000).

### 2.3.4. Dados descartados na medição de textura superficial

As extremidades de qualquer coleta de dados estão sujeitas as distorções. Isso acontece principalmente porque a unidade de avanço transversal requer um tempo para vencer a inércia até a velocidade de medição.

O começo da medição (parte A na Fig. 2.15 e 2.16) é influenciado pela inércia e o final da coleta (parte C na Fig. 2.15 e 2.16) pela frenagem.

Estas partes são desprezadas são mostradas nas Figuras 2.15 e 2.16.

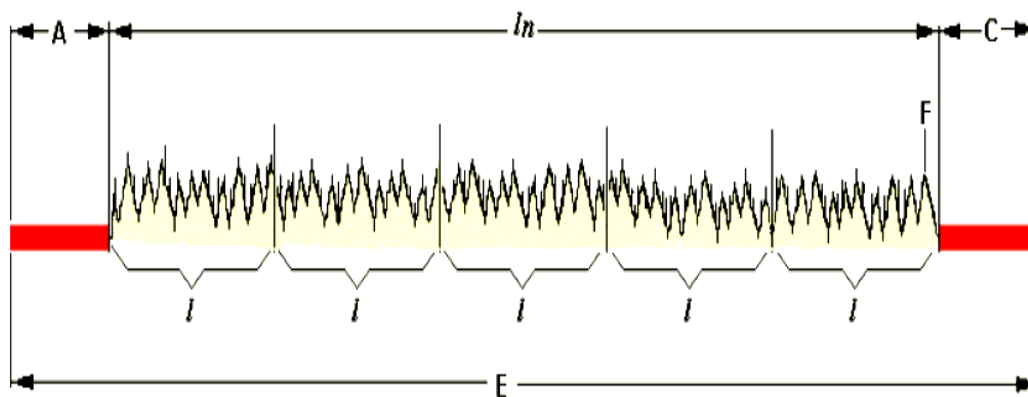


Figura 2.15 - Dados descartados durante a medição (Whitehouse, 1994).

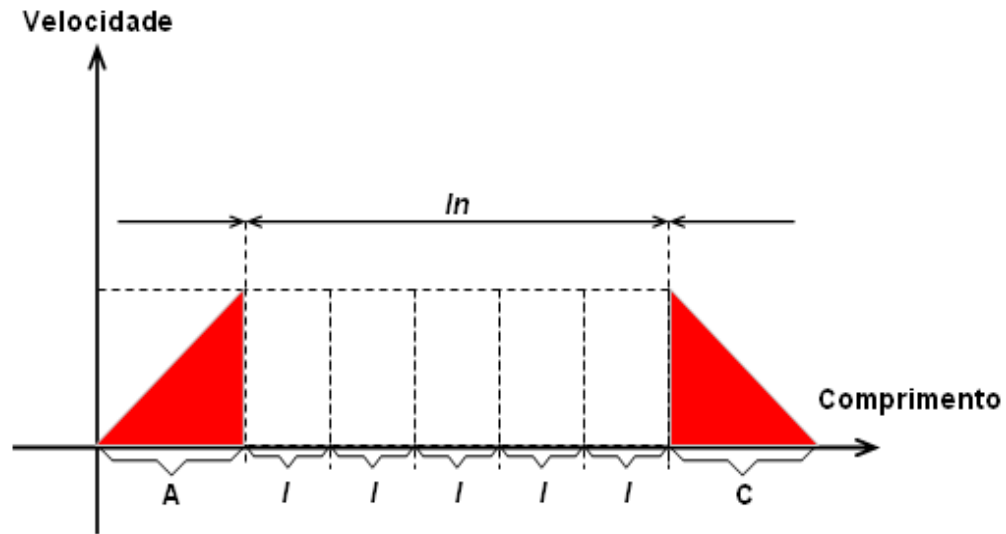


Figura 2.16 - Dados descartados durante a medição.

Há também um requisito para permitir o assentamento do filtro (período para estabilização da frequência). Para minimizar as instabilidades que ocorrem a partir das extremidades do avanço transversal (particularmente o início) estes pontos serão descartados.

A quantidade de dados descartados e sua localização dependem do filtro utilizado. Os filtros atuam da seguinte maneira:

- i. ISO 2CR: os primeiros dois *cut-offs* (pontos de corte) são descartados.
- ii. Gaussiano: metade do primeiro *cut-off* (ponto de corte) e metade do último *cut-off* é descartado;

### 2.3.5. Efeito *aliasing*

Uma complicação para o registro de dados digitais resulta no fenômeno conhecido como *aliasing*.

Quando um perfil contiver uma frequência superior à metade da frequência de amostragem, o processo de amostragem poderá resultar na detecção de uma

freqüência muito mais baixa, resultando um falso perfil como é mostrado na Fig. 2.17.

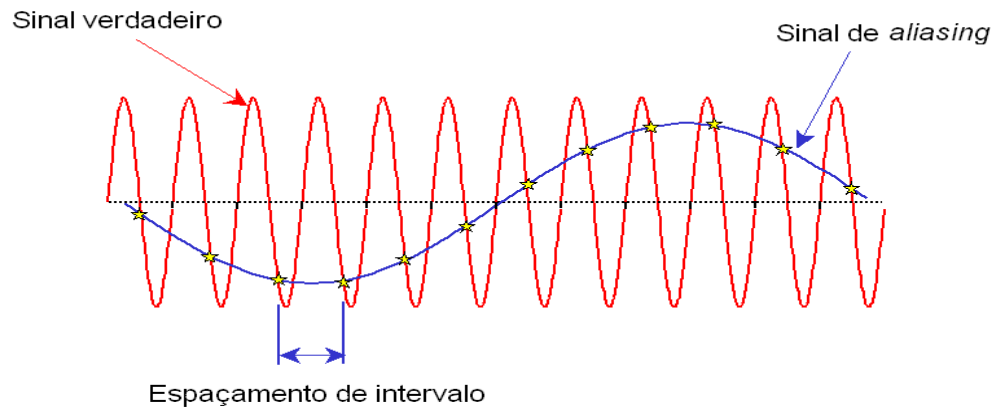


Figura 2.17 - Efeito *aliasing* (Whitehouse, 1994).

A freqüência detectada é a diferença entre as freqüências do perfil de amostragem real.

Se os dados amostrados forem utilizados para criar um gráfico de perfil, o efeito *aliasing* poderia ser o de introduzir componentes de comprimentos de longas ondas no perfil, que não estavam presentes na superfície real.

Para impedir que isso aconteça, é comum fornecer um filtro elétrico que remove todas as altas freqüências indesejadas dos dados de perfil, antes de se obter as amostras.

Este filtro é comumente descrito como um filtro *anti-aliasing* (Taylor Hobson, 2000).

### 2.3.6. Efeito dos filtros nos resultados

As superfícies fabricadas normalmente possuem longos comprimentos de onda em sua textura, e essas ondas tendem ter grandes amplitudes. Isso é uma consequência natural dos processos de fabricação. Quando os parâmetros de

textura superficial forem avaliados a partir dessas superfícies, o limite de comprimento das ondas curtas e a largura de banda se tornarão muito menos significativos que o limite dos comprimentos de ondas longas que estão contribuindo para os valores do parâmetro.

Superfícies de alta precisão que tiverem sido submetidas a uma sucessão de operações de fabricação, nem sempre exibem este mesmo acréscimo na amplitude com o comprimento de onda. O efeito das várias etapas de fabricação remove os componentes com longos comprimentos de onda, deixando somente os comprimentos de onda curtos. (Whitehouse, 1994).

Para essas superfícies, o valor de medição atribuído a algum parâmetro será muito sensível à largura de banda e aos limites de comprimento de onda curtos. Não é de se surpreender que e neste tipo de superfície a maioria das anomalias são encontradas, quando as medições são realizadas utilizando diferentes tipos de instrumento.

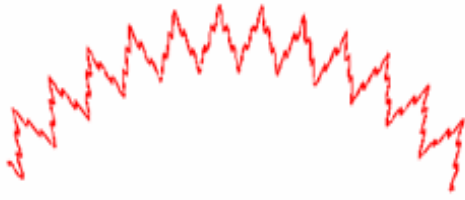
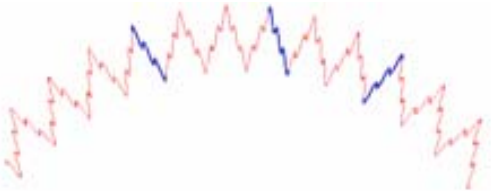
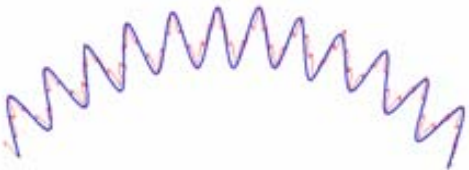
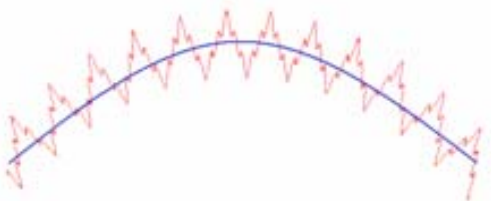
#### **2.4. PARÂMETROS DE TEXTURA SUPEFICIAL EM TOPOGRAFIA 2D E REFÊRENCIAS PARA ANÁLISE DE FORMA**

Segundo Whitehouse (1994), a análise de textura superficial é dividida 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.

Ao longo de vários anos de pesquisa, foram desenvolvidos diversos métodos de mensurar a textura superficial através de parametrizações específicas, sendo que, cada parâmetro se comporta conforme uma função matemática de acordo com cada perfil analisado (Stout *et al* 1990).

A Fig. 2.18 mostra um perfil de superfície sem filtragem e as Figuras 2.19, 2.20 e 2.21 mostram o mesmo perfil, porém filtrado.

	
Figura 2.18 - Perfil P (composto)	Figura 2.19 - Perfil R (rugosidade)
	
Figura 2.20 - Perfil W (ondulação)	Figura 2.21 - Forma do perfil

### Análise gráfica da inclinação (ISO 4287)

A maneira a qual um perfil é analisado está diretamente ligada ao momento em que a ponta do apalpador toca a superfície do perfil. Devido ao apalpador possuir um pequeno raio na ponta, tem-se várias retas tangentes ao longo do perfil, como é mostrado na Fig. 2.22.

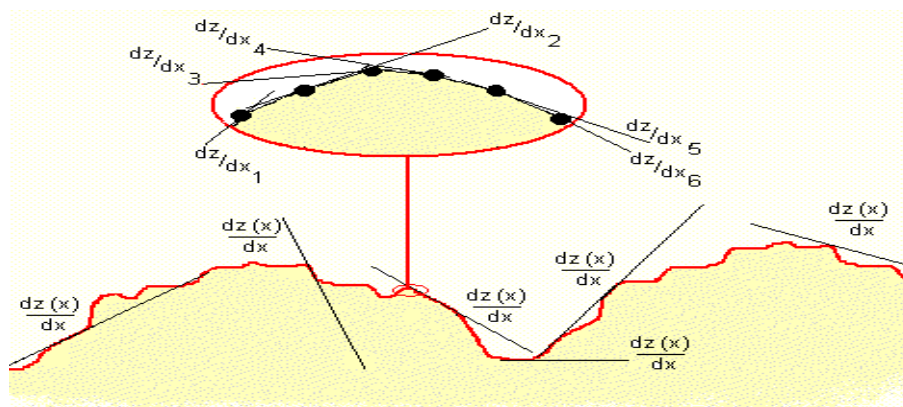


Figura 2.22 - Inclinação da reta tangente no ponto de contato (Taylor Hobson, 2000).

A equação usada para estimar a inclinação local do perfil segundo a norma ISO 4287 e a seguinte:

$$\frac{dz_i}{dx} = \frac{1}{60\Delta X} (z_{i+3} - 9z_{i+2} + 45z_{i+1} - 45z_{i-1} + 9z_{i-2} - z_{i-3}) \quad (2.5)$$

Cada perfil tem suas particularidades e cada perfil gera uma quantidade determinada de parâmetros de textura superficial.

Segundo Whitehouse (1994), os parâmetros de textura superficial são classificados da seguinte maneira: parâmetros médios, parâmetros de pico, parâmetros de vale (série Rk), parâmetros de espaçamento, parâmetros híbridos, parâmetros básicos R e W (ISO 12085-1996), parâmetros de curva.

#### 2.4.1. Parâmetros de rugosidade mais utilizados

##### Média aritmética dos desvios da superfície ( $R_a$ )

O parâmetro  $R_a$  é o mais conhecido de rugosidade, e também o mais usado.

Este parâmetro é calculado a partir da média aritmética dos desvios do perfil, tomando como referência a linha média e é definido sobre um comprimento  $l$  de amostragem como mostrado na Fig. 2.23.

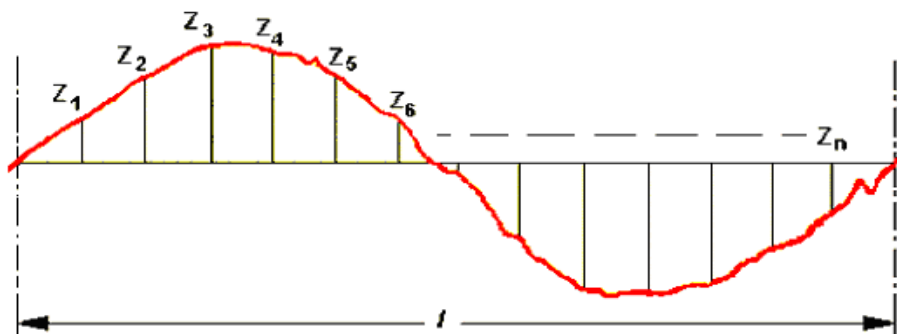


Figura 2.23 - Rugosidade média  $R_a$  (Whitehouse, 1994).

A equação que define a rugosidade média é a seguinte:

$$R_a = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3 + \dots + Z_n}{n} \rightarrow R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (2.6)$$

Sua aplicação na indústria é muito grande e geralmente é usado no acompanhamento em vários processos de fabricação.

Devido à variação do parâmetro  $R_a$  é possível indicar se o processo mudou em alguma variável (velocidade de corte, quantidade de fluidos, etc.). No entanto o  $R_a$  é um parâmetro de natureza média e ele não é tão sensível a mudanças sutis. Dependendo do tipo de processo é ideal que ele seja associado com outro parâmetro.

O parâmetro  $R_a$  está disponível nos instrumentos mais simples.

### **Raiz quadrada das médias dos quadrados ( $R_q$ )**

O parâmetro  $R_q$  é definido como a raiz quadrada da média dos quadrados das ordenadas do perfil  $R$  em relação à linha média em um comprimento  $l$  de avaliação, o gráfico de análise do  $R_q$  idêntico ao gráfico do  $R_a$  Fig. 2,21. A equação que define a rugosidade quadrática média é a seguinte:

$$R_q = \sqrt{\frac{Z_1^2 + Z_2^2 + Z_3^2 + \dots + Z_n^2}{n}} \equiv \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l Z^2(x) dx} \quad (2.7)$$

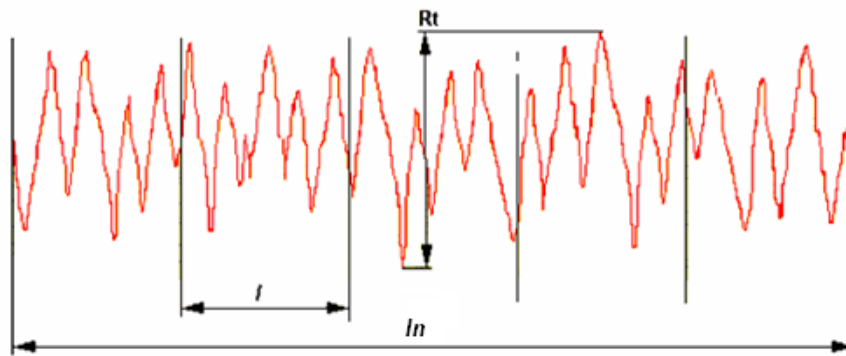
A aplicação maior de  $R_q$  ocorre na indústria de fabricação óptica e eletrônica, devido à capacidade para se descobrir picos espúrios e vales, onde estas imperfeições comprometem a qualidade de imagem potencial e ou distorções locais. A tab. 2.4 mostra a diferença entre os valores que são encontrados entre os parâmetros  $R_a$  e  $R_q$ .

Tab. 2.4: Diferença de resultados entre média aritmética e quadrática.

Valores			Média Aritmética	Média Quadrática
2	2	2	2	2
1	2	3	2	2,16

### Altura máxima de Rugosidade ( $R_t$ )

O parâmetro  $R_t$  define a altura máxima de um pico a um vale no comprimento de avaliação de perfil (isto é a amplitude máxima entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento de avaliação), como e mostrado na Fig. 2.24.

Figura 2.24 - Parâmetro  $R_t$  (Taylor Hobson, 2000).

Onde:

$ln$  = comprimento de avaliação

$l$  = Comprimento de amostragem.

O emprego do parâmetro  $R_t$  vai depender do tipo da superfície, a exemplo de superfícies que serão sedes de retentores não é conveniente à presença de grandes amplitudes entre picos e vales.

### Média das amplitudes dos maiores picos e vales nos *cut-offs* $R_z$ (DIN) / $R_{tm}$

$R_z$  (DIN) também conhecido como parâmetro  $R_{tm}$  é a média de todos os valores  $Z$  no comprimento de avaliação, onde  $Z$  é a altura máxima das rugosidades medidas no comprimento de amostragem, como é mostrado na Fig. 2.25.

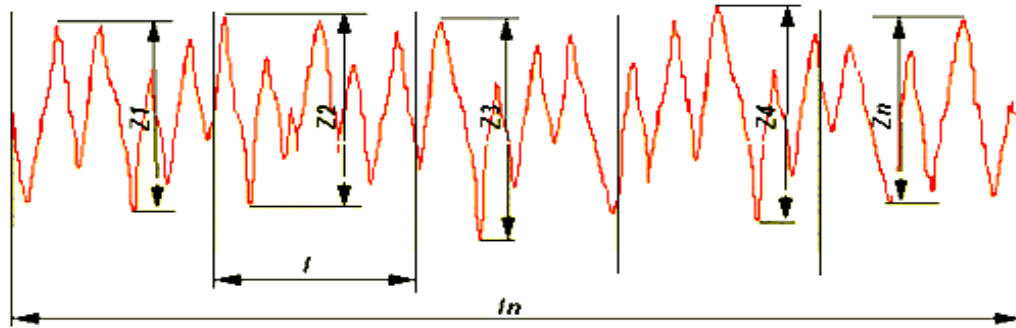


Figura 2.25 - Parâmetro  $R_z$  DIN (Taylor Hobson, 2000).

Onde:

$ln$  = comprimento de avaliação

$l$  = Comprimento de amostragem

A equação que define a rugosidade media é a seguinte:

$$(R_z \text{ (DIN)} = R_{tm}) = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3 + \dots + Z_n}{n} \quad (2.8)$$

A aplicação do parâmetro  $R_z$  é bem parecida ao parâmetro  $R_t$ , a diferença está na consequência de uma amplitude isolada entre pico e vale e na amplitude média entre todos os picos e vales.

### Contagem de Pontos Altos de Rugosidade (RHSC)

O parâmetro Contagem de Pontos Altos de Rugosidade quantifica o número dos picos de perfil completo (dentro do comprimento de avaliação) que se projeta acima da linha de referência predefinida que é ajustada paralela à linha média como é mostrado na Fig. 2.26.

A linha de referência pode ser ajustada para uma profundidade selecionada abaixo do pico mais alto, para uma distância selecionada acima ou abaixo da linha média ou em um percentual da altura da razão de material.

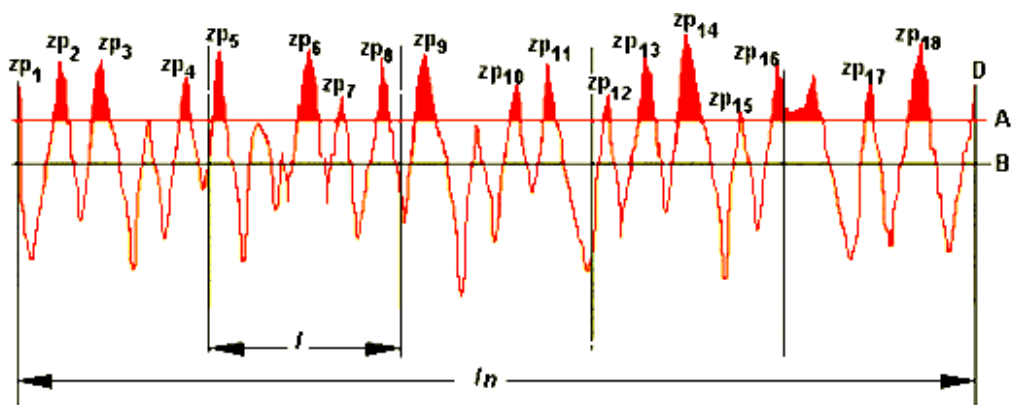


Figura 2.26 - Parâmetro RHSC (Taylor Hobson, 2000).

Onde:

A = linha de referência

B = linha média

$l_n$  = comprimento de avaliação

$l$  = Comprimento de amostragem

A aplicação deste parâmetro está mais voltada, no efeito visual de alguns materiais injetados, e características funcionais de certas superfícies, como cones de engrenagens condutoras.

### Média aritmética de picos ( $R_{pm}$ )

O parâmetro  $R_{pm}$  é a média aritmética dos valores dos picos  $P_1 + P_2 + \dots + P_n$  considerados nos comprimentos  $l$  com referência à linha média, em um comprimento de amostragem, a Fig. 2.27 representa a análise deste parâmetro.

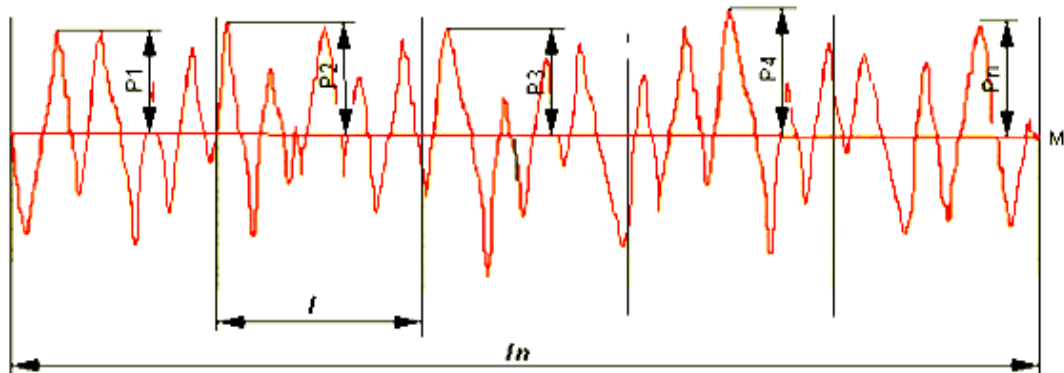


Figura 2.27 - Parâmetro  $R_{pm}$  (Taylor Hobson, 2000).

A equação que define o parâmetro de rugosidade  $R_{pm}$  é a seguinte:

$$R_{pm} = \frac{P_1 + P_2 + P_3 + P_4 \dots + P_n}{n} \quad (2.9)$$

Onde:

A = linha de referência

B = linha média

$ln$  = comprimento de avaliação

$l$  = Comprimento de amostragem.

### Amplitude média do 3º pico e 3º vale no comprimento analisado ( $R_{3y}$ )

Este parâmetro analisa o terceiro pico mais alto, e o terceiro vale mais profundo dentro de todos os *cut-offs* da análise. Posteriormente, a média de todos os valores é calculada conforme mostrado na Fig. 2.28.

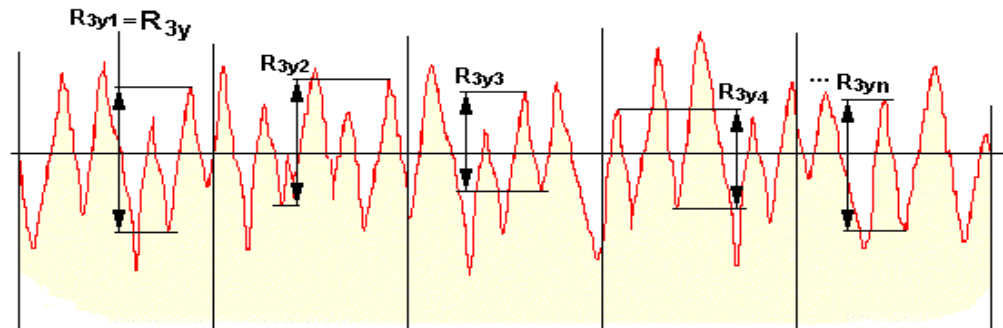


Figura 2.28 - Parâmetro  $R_{3y}$  (Taylor Hobson, 2000).

### Média das amplitudes contidas no perfil ( $R_c$ )

Este parâmetro toma todas as amplitudes de picos e vales da análise fazendo uma média aritmética de todos os resultados, a Fig. 2.29 representa a análise deste parâmetro.

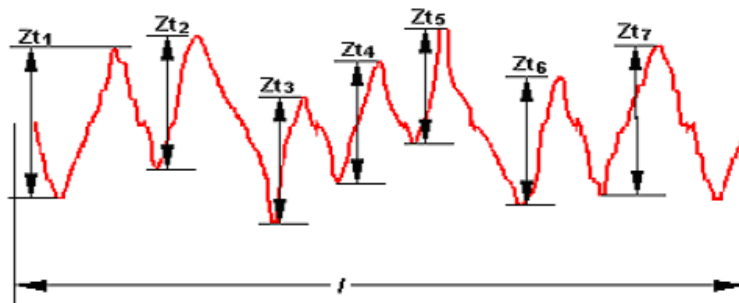


Figura 2.29 - Parâmetro  $R_c$  (Taylor Hobson, 2000).

Onde:

$l$  = comprimento analisado.

A equação que define o parâmetro  $R_c$  e a seguinte:

$$R_c = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Zt_i \quad (2.10)$$

Este parâmetro tem uma natureza média, e vai depender da especificação do processo para seu emprego, este parâmetro tem valores muito aproximados do parâmetro  $R_a$ .

### Altura máxima de pico a linha média ( $R_p$ )

Este parâmetro está relacionado ao maior pico da análise em relação a uma linha média. O  $R_p$  é um parâmetro mais estável em comparação ao  $R_t$ , à Fig. 2.30 mostra como a análise é feita.

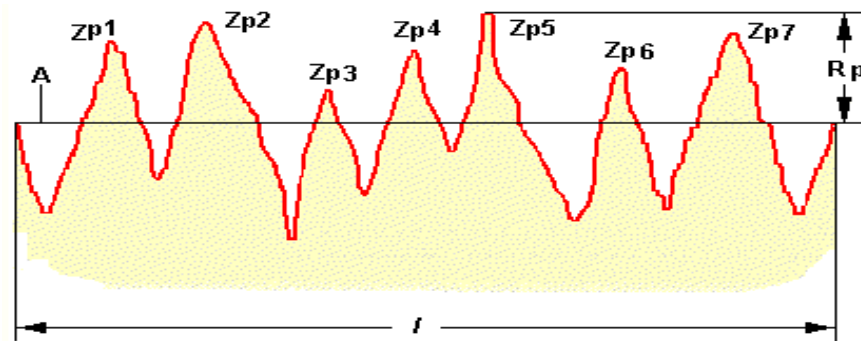


Figura 2.30 - Análise gráfica do parâmetro  $R_p$  (Taylor Hobson, 2000).

Onde:

$A$  = linha média

$l$  = Comprimento de amostragem.

Seu emprego é similar ao parâmetro  $R_t$ , e os resultados das medições são mais estáveis.

### Média dos espaçamentos dos picos ( $R_s$ )

Este parâmetro está associado à distância que existe entre os picos do perfil.

O resultado da análise é obtido através da média aritmética de todos os picos analisados no comprimento de amostragem como é mostrado na Fig. 2.31.

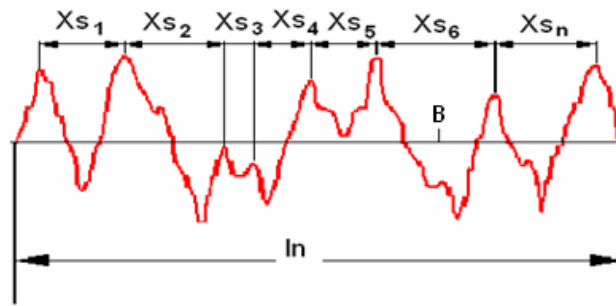


Figura 2.31 - Análise gráfica do parâmetro  $R_s$  (Taylor Hobson, 2000).

A equação que define este parâmetro é a seguinte:

$$R_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} S_i = \frac{(Xs_1 + Xs_2 + \dots + Xs_n)}{n} \quad (2.11)$$

Onde:

$n$  = o número de espaçamento entre picos

$ln$  = comprimento de avaliação.

$B$  = linha média.

### Média das amplitudes máximas de todos os *cut-offs* ( $R_{tm}$ )

Este parâmetro é análogo ao parâmetro  $R_t$ , a diferença entre eles é que o  $R_{tm}$  não utiliza apenas um pico e vale isolado em todo o comprimento analisado, ele utiliza todas as maiores amplitudes dentro dos *cut-offs* como e mostrado na Fig. 2.32.

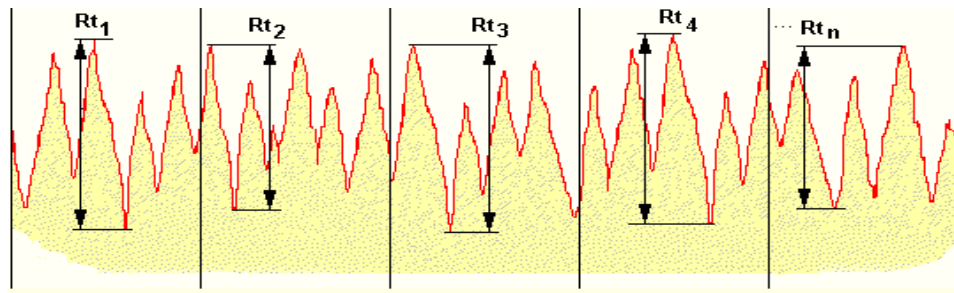


Figura 2.32 - Análise gráfica do parâmetro  $R_{tm}$  (Taylor Hobson, 2000).

A equação que define o parâmetro  $R_{tm}$  é a seguinte:

$$R_{Tm} = \frac{R_{T1} + R_{T2} + \dots + R_{Tn}}{n} \quad (2.12)$$

### Profundidade máxima de vale em relação ao perfil primário ( $R_v$ )

Este parâmetro toma como referência a linha média do perfil e analisa o vale mais profundo em relação à mesma, como é mostrado na Fig. 2.33.

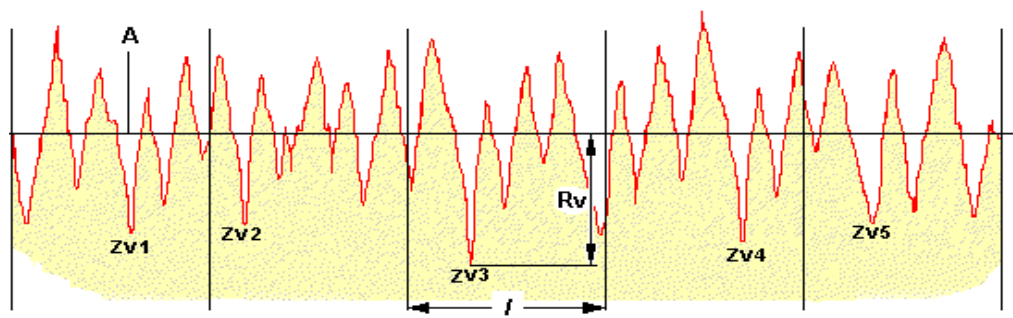


Figura 2.33 - Análise gráfica do parâmetro  $R_v$  (Taylor Hobson, 2000).

Onde:

A = Linha média

l = Comprimento de amostragem.

Seu emprego esta em superfícies que precisam ter características de retenção de fluido.

### Altura do terceiro pico nos *cutt-offs* em relação à linha média ( $R_{3z}$ )

Este parâmetro toma como referência o terceiro maior pico dentro de todos os *cutt-offs*, sua análise é similar ao parâmetro  $R_{3y}$ , o que difere e que este se referencia na linha média do perfil, como é mostrado na Fig. 2.34.

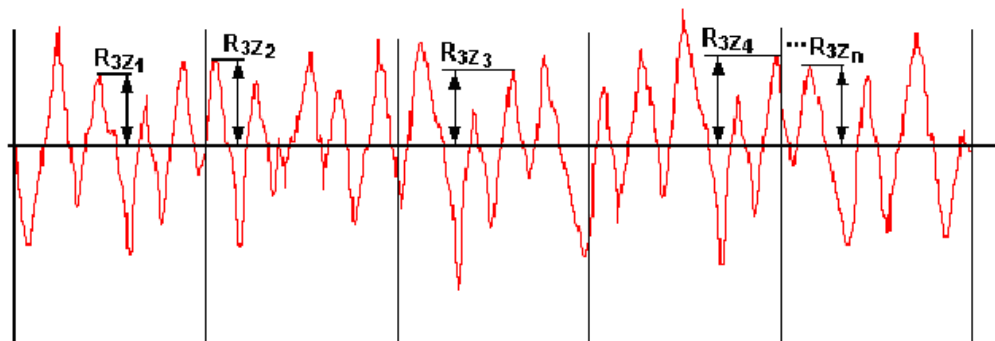


Figura 2.34 - Explicação gráfica do parâmetro  $R_{3z}$  (Taylor Hobson, 2000).

O resultado da análise é a média aritmética de todos os valores encontrados e é dada pela equação:

$$R_{3z} = \frac{R_{3z1} + R_{3z2} + R_{3z3} + \dots + R_{3zn}}{n} \quad (2.13)$$

### Razão de material (Rm) (fração de contato)

O parâmetro razão de material (fração de contato) simula o desgaste que ocorre entre duas superfícies em contato e com movimento relativo entre elas.

Para visualizar como este parâmetro funciona, utiliza-se uma superfície plana abrasiva (uma placa de polimento) repousando sobre o pico mais alto de um perfil.

À medida que o pico se desgasta, a linha de topo de perfil remanescente (a linha de contato) move para baixo do perfil e o comprimento da superfície em contato com a placa de polimento (a superfície de contato) aumenta como é mostrado na Fig. 2.33.

A razão de material é a razão do comprimento da superfície de contato em qualquer profundidade especificada no perfil, em relação ao comprimento de avaliação e é expressa em porcentagem.

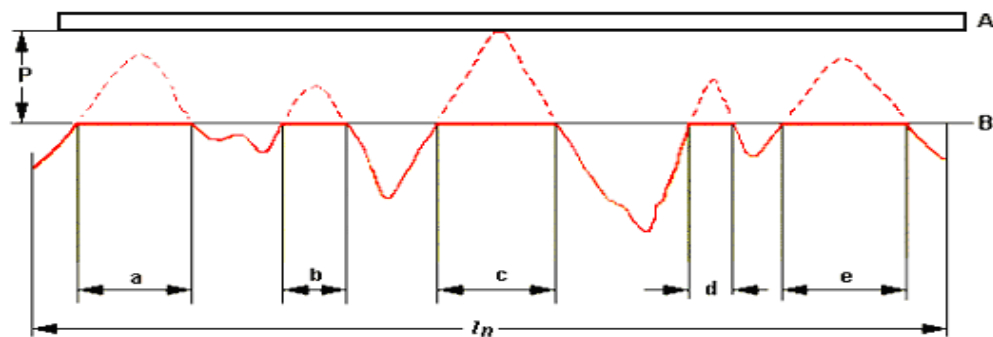


Figura 2.35 - Razão de material em relação a um percentual de contato (Taylor Hobson, 2000).

A equação que define a proporção da razão de material é a seguinte:

$$R m = \frac{a + b + c + d + e}{E} * 100 \% \quad (2.14)$$

Onde:

A = placa de polimento

B = linha de posição

$ln$  = Comprimento de avaliação.

### Razão de material ( $R_m$ ) / curva de Abbott – Firestone

A curva de razão de material possui os limites entre o pico mais alto e o primeiro vale subsequente. A maneira na qual o valor da razão de material varia com a profundidade é possível distinguir diferentes formas do perfil, como é mostrado na Fig. 2.36.

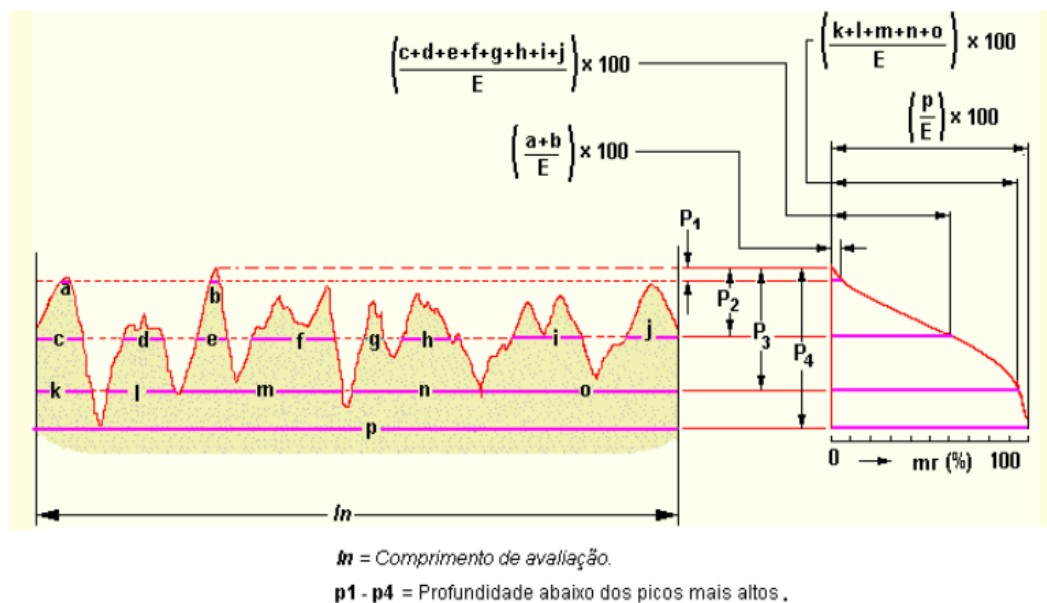


Figura 2.36 - Representação da curva de razão de material (Taylor Hobson, 2000).

### Curva de Abbott-Firestone

A curva de Abbott-Firestone é obtida a partir da razão de material da superfície do perfil em função da profundidade. Ela possui os limites entre 0% e 100%.

A curva é composta por uma série de parâmetros (série  $R_k$ ) que podem ser localizados ao longo do esboço da curva, como é mostrado na Fig. 2.37.

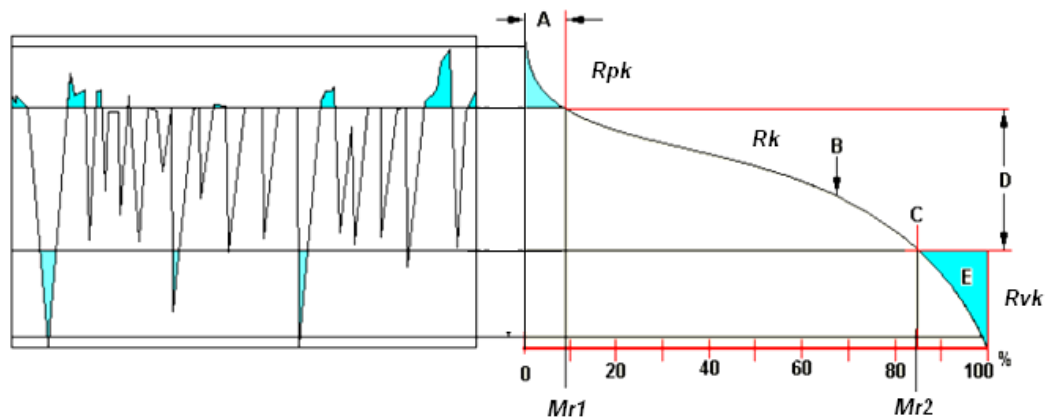


Figura 2.37 - Curva de Abbott-Firestone e parâmetros da série  $R_k$  (Taylor Robson, 2000).

Cada parâmetro dentro da curva destaca informações particulares, que são referentes à região de análise da superfície.

### Região de pico ( $R_{pk}$ )

É o parâmetro associado à região que se desgasta nos primeiros contatos relativos entre as superfícies em contato.

Superfícies que nunca trabalharam em contato apresentam picos que se quebram ou simplesmente deformam plasticamente. A Fig. 2.38 faz uma representação desta região. (Whitehouse, 1994).

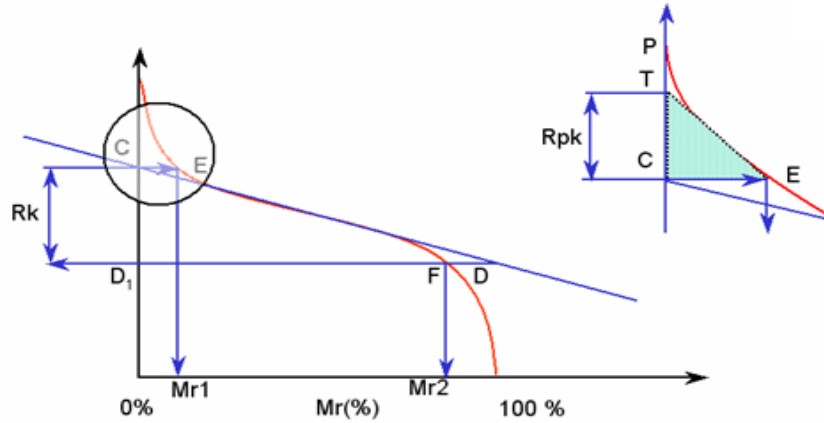


Figura 2.38 - Representação gráfica de  $R_{pk}$ . (Taylor Hobson, 2000).

Uma aplicação de  $R_{pk}$  é na verificação do amaciamento de motores de combustão interna.

**Região de máximo contato ( $R_k$ )**

É o parâmetro associado à parte intermediária da rugosidade e que influencia no desempenho de certas superfícies.

Este parâmetro quantifica a taxa de desgaste das superfícies em contato. A Fig. 2.39 representa como este parâmetro e analisado.

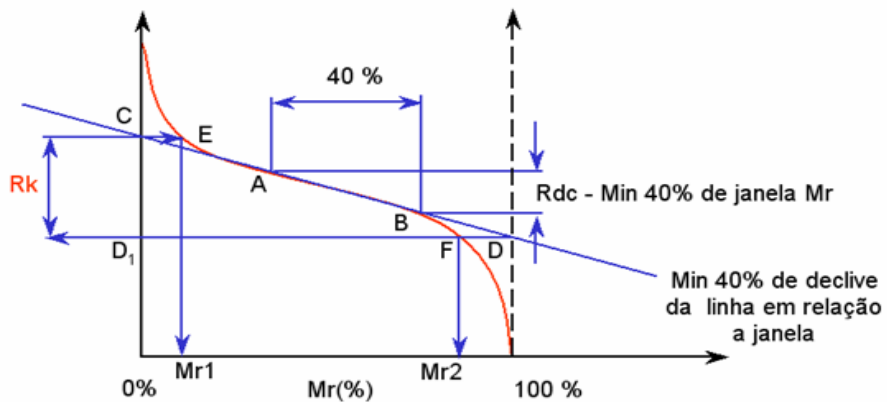


Figura 2.39 - Representação gráfica de  $R_k$  (Taylor Hobson, 2000).

### Região de vale ( $R_{vk}$ )

É o parâmetro que relaciona os sulcos que estão presentes na superfície. Este parâmetro está relacionado com a capacidade da superfície em reter algum tipo fluido. A Fig. 2.40 mostra a curva de um perfil e área de retenção de fluido.

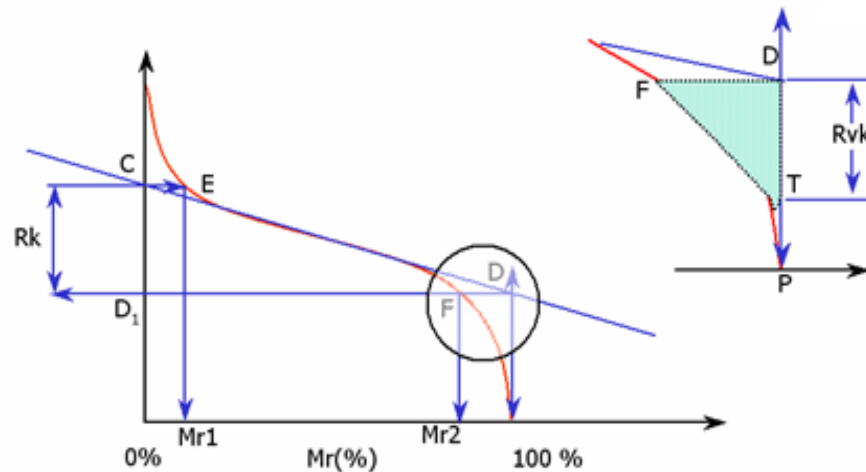


Figura 2.40 - Representação gráfica do parâmetro  $R_{vk}$  (Taylor Hobson, 2000).

Este parâmetro tem grande emprego na indústria automotiva e aeroespacial, pois os motores de combustão interna precisam de pontos específicos de lubrificação e retenção de fluido simultaneamente.

### Distribuição e forma dos picos na superfície ( $R_{ku}$ )

Este parâmetro tem uma natureza estatística e esta associada à distribuição de picos ao longo do perfil.

Se os picos que estão contidos na superfície estão igualmente distribuídos, e sua agudez tem característica aleatória, a análise de  $R_{ku}$  desta superfície irá produzir um valor de referência igual a três, ( $R_{ku} = 3$ ).

Se a análise de  $R_{ku}$  gerar um valor menor que três, a superfície possui picos irregulares e mais achatados ( $R_{ku} < 3$ ).

Se a análise de  $R_{ku}$  gerar um valor maior que três, a superfície possui picos mais agudos e com pouco mais achatamento ( $R_{ku} > 3$ ).

A Fig. 2.41 mostra como o  $R_{ku}$  é caracterizado.

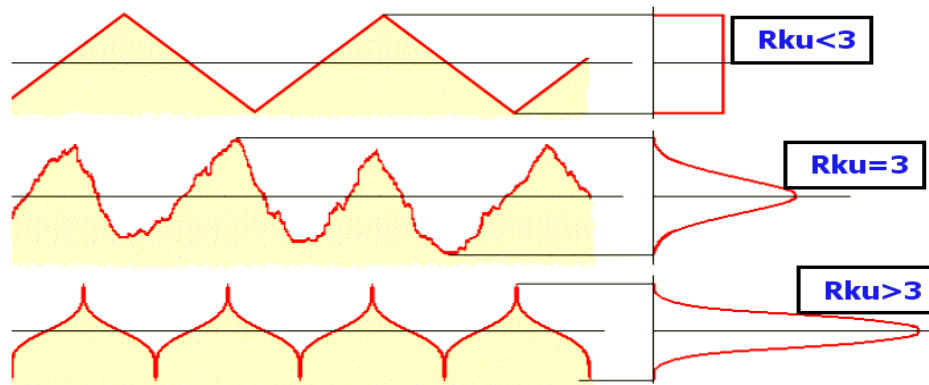


Figura 2.41 - Caracterização do  $R_{ku}$  na superfície (Taylor Hobson, 2000).

O  $R_{ku}$  também é conhecido como medida de curtose (*Kurtosis*), e é relacionado com a medida da agudez do perfil.

O  $R_{ku}$  pode ser usado como um parâmetro que controla as condições de ferramentas. Como uma fresa que vai perdendo o corte à medida que remove uma superfície, então à medida que a ferramenta é usada, ocorre mudança na ação cortante. Este parâmetro deve ser associado com outro para análises mais rigorosas.

#### 2.4.2. Referências para análise de textura superficial e 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).

### Linha de Mínimos Quadrados (MQ)

A linha de Mínimos Quadrados (MQ) é uma linha de referência média habitualmente usada.

Na análise de textura de superfície, a linha reta de mínimos quadrados é usada para um melhor ajuste dos dados de medição, para a avaliação do perfil primário.

A linha MQ é posicionada de maneira que a soma dos quadrados dos desvios do perfil a partir da linha seja mínima, como é mostrado na Fig. 2.42. Isso fornece uma linha de referência única através dos dados de perfil (ISO 1101:1983).

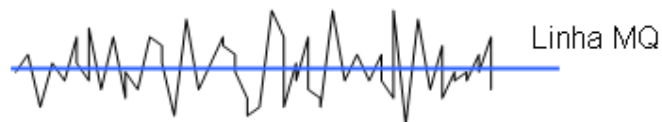


Figura 2.42: Linha de referência MQ (Mínimos Quadrados).

### 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 1101:1983).

A linha de referência exibida é a posição média entre estas duas linhas e à qual todos os cálculos de parâmetro se referenciam. A Fig. 2.43 mostra onde as linhas MZ são posicionadas.

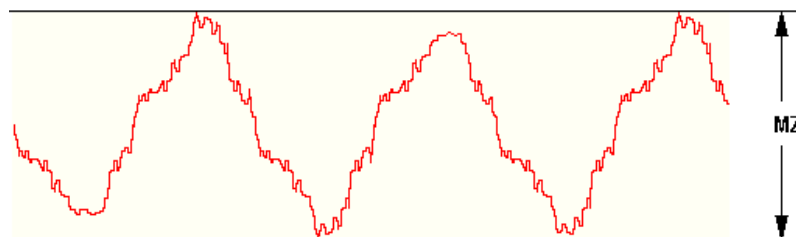


Figura 2.43 - Explicação gráfica de linhas MZ (Whitehouse, 1994).

### 2.4.3. Visão geral de parâmetros

A textura de superfície é quantificada por parâmetros, que se relacionam com certas características da textura. Estes parâmetros podem ser classificados em grupos, de acordo com o tipo de característica que estão medindo.

#### Parâmetros de Amplitude

Os parâmetros incluídos nesta categoria estão mostrados na Tab. 2.5

Tabela - 2.5: Parâmetros de amplitude

Perfil primário	Rugosidade filtrada	Ondulação filtrada
$P_a$	$R_a$	$W_a$
$P_{ku}$	$R_{ku}$	$W_{ku}$
$P_p$	$R_p$	$W_p$
$P_q$	$R_q$	$W_q$
$P_{sk}$	$R_{sk}$	$W_{sk}$
$P_t$	$R_t$	$W_t$
$P_v$	$R_v$	$W_v$
$P_z$	$R_z$	$W_z$
$P_z$ (JIS)	$R_z$ (JIS)	Não consta
$P_c$	$R_c$	$W_c$
Não consta	$R_{3y}$	Não consta
Não consta	$R_{3y}$	Não consta

#### Parâmetros de espaçamento

Estes parâmetros são medições do espaçamento das irregularidades ao longo da superfície (eixo x), independente da amplitude das irregularidades.

Os parâmetros incluídos nesta categoria são os que seguem na Tab. 2.6.

Tabela 2.6 - Parâmetros de espaçamento.

Perfil primário	Rugosidade filtrada	Ondulação filtrada
PHSC	RHSC	WHSC
$P_{Lo}$	$R_{Lo}$	$W_{Lo}$
$P_{pc}$	$R_{pc}$	$W_{pc}$
$P_S$	$R_S$	$W_S$
$P_{Sm}$	$R_{Sm}$	$W_{Sm}$

### Parâmetros híbridos

Parâmetros que se relacionam tanto à amplitude como ao espaçamento das irregularidades de superfície (eixos z e x) ou fornecem uma quantidade tal como uma área ou volume, esses parâmetros são conhecidos como híbridos.

Incluídos nesta categoria são os que seguem na Tab. 2.7.

Tabela 2.7 - Parâmetros híbridos

Perfil primário	Rugosidade filtrada	Ondulação filtrada
$P\Delta_a$	$R\Delta_a$	$W\Delta_a$
$P_{dc}$	$R_{dc}$	$W_{dc}$
$P\Delta_q$	$R\Delta_q$	$W\Delta_q$
$P_{lq}$	$R_{lq}$	$W_{lq}$
$PV_o$	$RV_o$	$WV_o$

### Parâmetros de análise não esféricos

Estes parâmetros se referem à análise específica da forma não esférica.

Incluídos nesta análise estão:  $R_a$ ;  $R_t$ ;  $S_{mx}$ ;  $S_{mn}$ ;  $X_p$ ;  $X_t$ ;  $X_v$ .

### Curvas e parâmetros relacionados

Estes parâmetros são medições do espaçamento das irregularidades ao longo da superfície (eixo x), independente da amplitude das irregularidades.

Os parâmetros incluídos nesta categoria são: perfil primário; curva de amplitude de altura de perfil [ $R_{dc}$ ,  $R_{mr}$ ,  $R_{mr}(c)$ ]; ondulação filtrada [ $W_{dc}$ ,  $W_{mr}$ ,  $W_{mr}(c)$ ].

#### 2.4.4. Normalização de análise

A norma ISO padronizou os *cut-offs* em relação ao  $R_a$  e  $R_z$ , estes valores estão na tab. 2.8.

Tabela 2.8 - *Cut-offs* recomendados ISO 4288 -1996 – Procedimentos determinados conforme ISO 4287 -1997; ISO 11562.

Perfis periódicos	Perfis não periódicos		Cut-off	Duração/ Avaliação da prova
	$R_z$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )		
Distância do espaçamento $S_m$ (mm)				
> 0,013 a 0,04	0,1	0,02	0,08	0,08/0,4
>0,04 a 0,13	>0,1 a 0,5	>0,02 a 0,1	0,25	0,25/1,25
>0,13 a 0,4	>0,5 a 10	>0,1 a 2	0,8	0,8/4
>0,4 a 1,3	>10 a 50	>2 a 10	2,5	2,5/12,5
>1,3 a 4	>50	>10	8	8/40

#### **Short cut-off**

Segundo ISO 4288 – 1996, quando não for possível utilizar os pontos de cortes recomendados por norma, devido a falta de comprimento de apalpagem, deve-se utilizar o *cut-off* mais próximo possível do especificado e relatar o *cut-off* utilizado na medição.

Este procedimento é conhecido como *short cut-off*.

## 2.5.TEXTURA SUPERFICIAL COM ANÁLISE 3D

Segundo Dong (1994), a análise de perfis de superfície 3D tem sido muito evidenciada pela indústria e centros acadêmicos por representar melhor uma superfície, uma vez que todas as superfícies interagem em três dimensões.

Existem diversas vantagens da topografia 3D em relação à 2D, algumas são: Melhor visualização da superfície; maior estabilidade estatística; melhor detecção e análise; muitos métodos de representar os dados.

Porém também existem desvantagens como: Ciclos de medição mais longos; maior arquivamento de dados; visualização mais subjetiva.

### 2.5.1. Métodos de medição

Existem duas maneiras medir uma superfície com análise 3D, uma delas é por contato conforme a Fig. 2.44. A outra é feita através da emissão de um feixe *laser* que incide sobre a superfície, como é mostrado na Fig. 2.45.

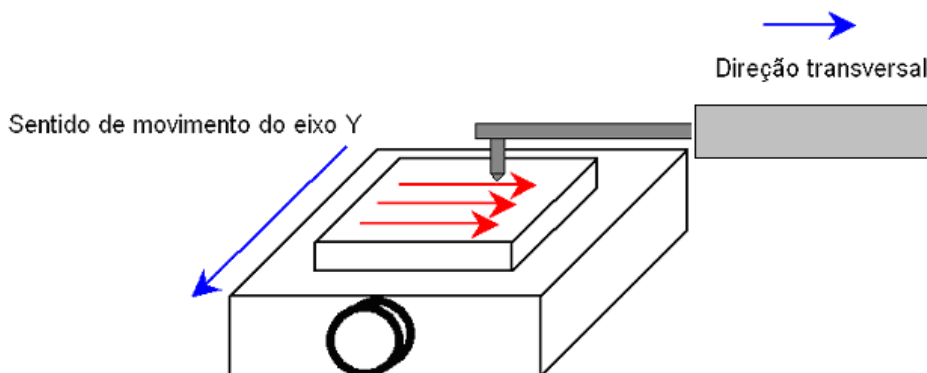


Figura 2.44 - Medição por contato e deslocamento da mesa (Taylor Hobson, 2000).

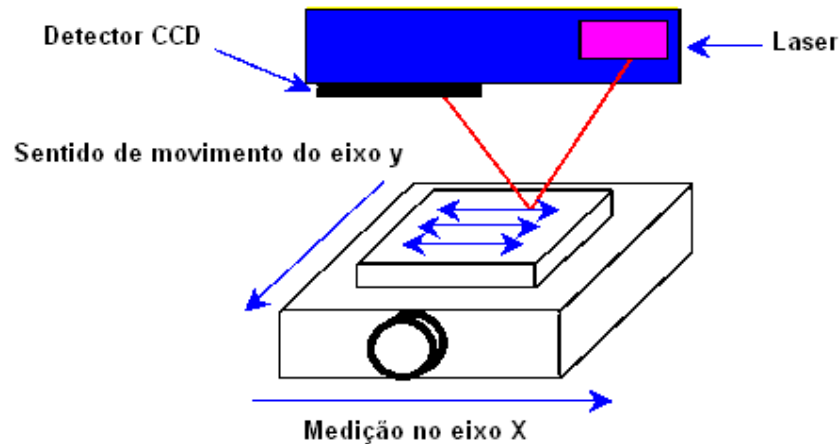


Figura 2.45 - Medição sem contato através de laser (Taylor Hobson, 2000).

A medição da superfície por contato é feita de forma análoga a medição 2D, o equipamento possui uma mesa de passo, onde esta se desloca no sentido dos eixos X e Y com intervalos pré-estabelecidos ou impostos. O eixo Z corresponde à capacidade de captação de sinal da bobina indutiva (capacidade de leitura).

As medições são feitas de acordo com o tipo de perfil e comprimento específico, de acordo com a Tab. 2.7 (pág. 44), de *cut-offs* que é normalizada pela ISO 4288-1996. Quando não for possível utilizar os *cut-offs* tabelados devido ao fato de a área de análise ser muito pequena usar o *short cut-off*.

Para uma análise de topografia 3D, alguns detalhes devem ser observados. A superfície deve ser nivelada conforme a Fig. 2.46 e a forma retirada caso seja um superfície côncava ou convexa, como é mostrado nas Figuras 2.47 e 2.48.

Os picos e vales contidos na superfície são representados por cores, onde o branco, vermelho e amarelo e mais as suas combinações, representam as elevações, o verde e o azul claro a representam as regiões intermediárias, o azul escuro e preto representam os vales.

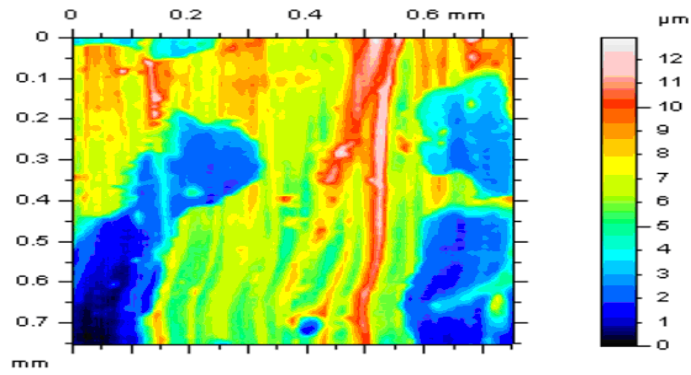


Figura 2.46 - Nivelamento da superfície (Taylor Hobson, 2000).

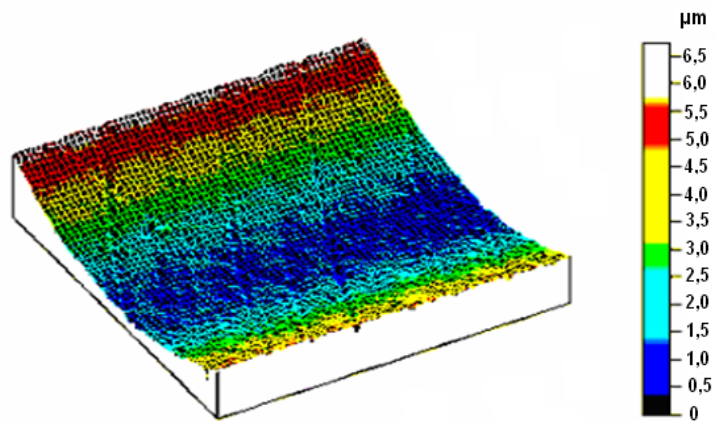


Figura 2.47 - Seção cilíndrica sem remoção de forma (Taylor Hobson, 2000).

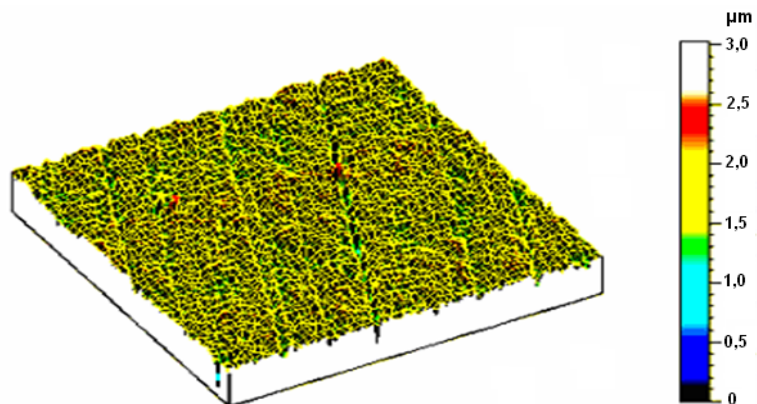


Fig. 2.48 - Seção cilíndrica com forma removida (Taylor Hobson, 2000).

Após a superfície ter sido copiada ou escaneada e passado por um processo de nivelamento, e sua forma ter sido retirada, têm-se uma vista topográfica em 3D contida dentro de limites estabelecidos como é mostrado na Fig. 2.49.

Também é possível ter uma visão da mesma superfície monocromática (axonométrica), como é mostrado na Fig.2.50.

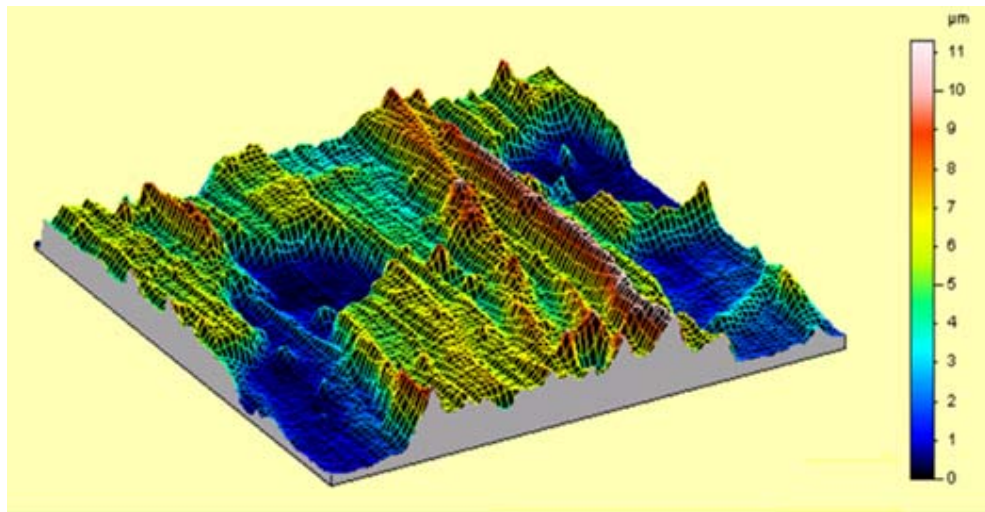


Figura 2.49 - Superfície nivelada e com a forma retirada (Taylor Hobson, 2000).

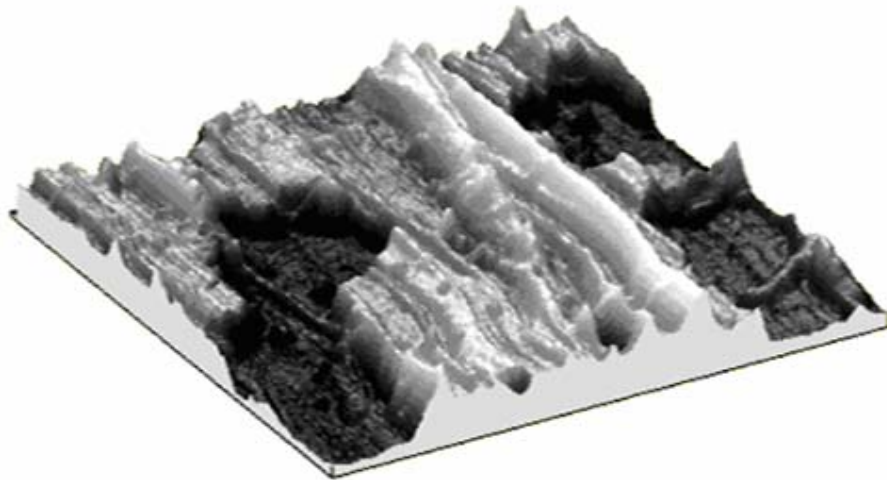


Figura 2.50 - Imagem monocromática da superfície anterior (Taylor Hobson, 2000).

Um dos grandes empregos da topografia 3D são em superfícies com características de vedação e que ao mesmo tempo precisam ser lubrificadas. Um bom exemplo são as sedes de cilindros de motores de combustão interna. A Fig. 2.51 mostra uma seção desta superfície.

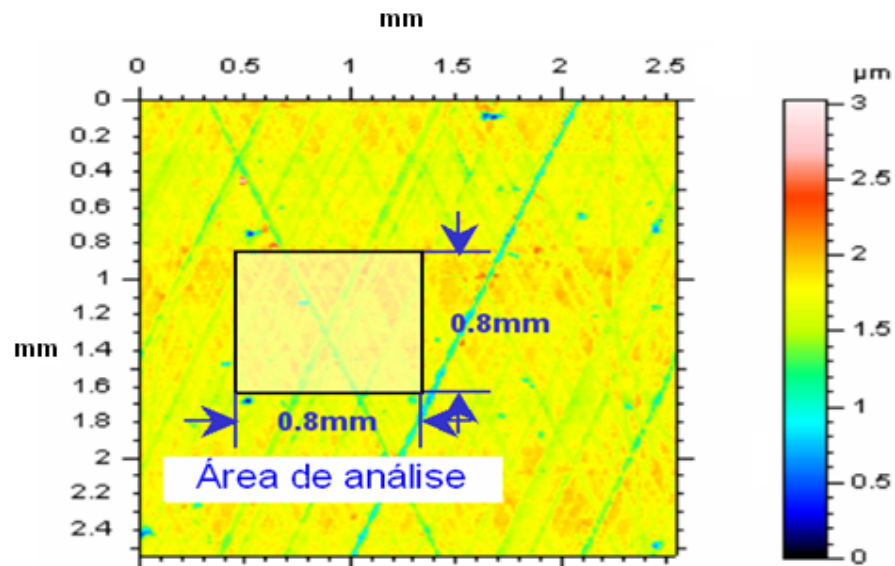


Figura 2.51 - Seção interna de uma sede de cilindro (Taylor Hobson, 2000).

### 2.5.2. Parâmetros de topografia 3D

A rugosidade tridimensional também possui sua parametrização específica. Esses parâmetros são mensurados dentro de uma área delimitada, dentro desta área os valores das medições são estimados estatisticamente a partir de desvio-padrão ou variância.

#### **Média entre os desvios dos picos e vales de uma superfície ( $S_a$ )**

O parâmetro  $S_a$  é baseado na média do desvio-padrão entre picos e vales em uma superfície. O plano médio é igual à metade do valor do desvio padrão encontrado. São usados valores absolutos do perfil.

No dimensionamento 3D este parâmetro não fornece informações de relevância sobre as condições a qual a superfície se apresenta.

### **Desvio das alturas dos picos em relação ao plano médio ( $S_q$ )**

O parâmetro  $S_q$  descreve a altura estatística, baseado na variância (rms) da topografia superficial em relação a um plano médio. Este parâmetro é descrito pela seguinte equação:

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{l_x l_y} \int_0^{l_x} \int_0^{l_y} \eta^2(x, y) dx dy} \approx \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M \eta^2(x_i, y_j)} \quad (2.15)$$

Os comprimentos  $l_x$  e  $l_y$  são da área lateral da amostra.

Devido à variância (rms) acrescentar um maior peso a picos e vales extremos, este parâmetro apresenta maior simplicidade devido os efeitos na fase dos filtros elétricos terem pouca influência, porém a variação sobre a média aritmética apresenta maior influencia.

Em trabalhos estatísticos a variância apresenta maior resultado.

### **Altura de dez pontos no plano ( $S_z$ )**

O parâmetro  $S_z$  é baseado nos cinco picos mais elevados da superfície analisada e nos e cinco vales mais profundos, este parâmetro revela os valores extremos de altura e vale na superfície, e é dado pela equação:

$$S_z = \frac{1}{5} \left( \sum_{i=1}^5 |\eta_{si}| + \sum_{i=1}^5 |\eta_{vi}| \right) \quad (2.16)$$

Nesta equação  $\eta_{si}$  e  $\eta_{vi}$  ( $i = 1, 2, \dots, 5$ ) são os cinco picos mais altos e vales mais profundos, respectivamente.

Devido à existência de um único pico mais elevado e um único vale mais profundo não apresentarem nenhum significado funcional em termos de desgaste, convencionou-se a utilização dos cinco picos mais altos e os cinco vales mais profundos para representar as propriedades mais extremas da superfície.

### **Assimetria da superfície em relação ao plano médio ( $S_k$ ) (*Skewness*)**

O parâmetro  $S_k$  avalia a assimetria dos desvios da superfície em relação ao plano médio.

Este parâmetro é calculado a partir da curva de distribuição de amplitude, avaliando a proporção de picos e vales que variam em torno do plano médio.

Este parâmetro é dado pela equação:

$$S_K = \frac{1}{S_q^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \eta^3(x, y) p(\eta) dx dy \approx \frac{1}{MNS_q^3} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M \eta^3(x_i, y_j) \quad (2.17)$$

Onde  $p(Q)$  é uma função de densidade de probabilidade da superfície residual  $q(x, y)$ .

### **Distribuição e forma dos picos na superfície ( $S_{ku}$ ) (*Kurtosis*)**

O parâmetro  $S_{ku}$  é relacionado com a forma da distribuição de amplitude, contribuindo para avaliar a aleatoriedade do perfil (coeficiente de achatamento).

Essencialmente não há diferença entre o *curtose* de distribuição de alturas de topografia de área 2D. Quando analisado em 3D é determinado da seguinte maneira:

$$S_{Ku} = \frac{1}{S_q^4} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \eta^4(x, y) p(\eta) dx dy \approx \frac{1}{MNS_q^4} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M \eta^4(x_i, y_j) \quad (2.18)$$

Se uma superfície apresenta curtose igual a 3, ela está normalmente distribuída, se for maior que 3, está centralmente distribuída e quando menor que 3, a distribuição da altura está bem dispersa.

### **2.5.3. Visão geral de parâmetros de topografia 3D mais utilizados**

A topografia 3D também é dividida em tipos de parâmetros, estes são classificados em: parâmetros de amplitude; parâmetros espaciais; parâmetros híbridos e parâmetros funcionais.

#### **Parâmetros de amplitude**

Os parâmetros que estão relacionados com a amplitude entre picos e vales e o plano médio da análise são os seguintes:  $S_a$ ;  $S_{ku}$ ;  $S_p$ ;  $S_q$ ;  $S_t$ ;  $S_{sk}$ ;  $S_z$ ;  $S_c$ .

#### **Parâmetros espaciais**

Os parâmetros que estão relacionados com o espaço entre picos e vales são os seguintes:  $S_{pc}$ ;  $S_{ds}$ ;  $S_{td}$ .

#### **Parâmetros híbridos**

Os parâmetros híbridos são combinações de parâmetros de amplitude e parâmetros espaciais, os de uso mais comum são:  $S_{dr}$ ;  $S_{sc}$ ;  $S_{\Delta q}$ .

#### **Parâmetros funcionais**

Os parâmetros com características funcionais são os seguintes:  $S_{tp}$ ;  $S_{bi}$ ;  $S_{ci}$ ;  $S_{vi}$

## 2.6. TENDÊNCIAS NAS MEDIÇÕES DE TOPOGRAFIA DE SUPERFÍCIE

É reconhecido que técnicas de medição de perfil têm sido bastante usadas na indústria e em pesquisas acadêmicas para controle funcional da rugosidade superficial. Porém, a caracterização da topografia de superfície em duas dimensões (2D) envolve vários problemas, fazendo com que a técnica em três dimensões (3D) seja mais utilizada (Dong, 1994).

Ainda segundo (Dong, 1994), muitos problemas envolvendo a definição de parâmetros 2D podem ser associados a equipamentos antigos que não acompanharam a evolução tecnológica.

Outro problema foi o surgimento exagerado de parâmetros, sendo que alguns destes parâmetros são correlacionados.

Segundo Dong (1994), parâmetros correlacionados são redundantes e deveriam ser removidos de qualquer conjunto de parâmetros.

Outro problema que surge na definição de parâmetros é que alguns usuários criticam os parâmetros propostos por outros usuários por não poderem caracterizar propriedades da superfície na qual estão interessados. Assim, eles propõem os seus parâmetros preferidos nas suas aplicações.

Só algumas propriedades topográficas principais relacionadas à geometria, estatística e função devem ser necessariamente descritas (Dong, 1994).

A análise de perfis de superfícies com topografia 3D tem grande influência não só em propriedades físicas e mecânicas de partes em contato, mas também em propriedades ópticas de revestimento de alguns componentes sem contato.

A amplitude e as características espaciais de topografia 3D dominam as aplicações funcionais em campos como o desgaste, atrito, lubrificação, etc. Além disso, o desempenho e a confiabilidade de componentes de engenharia como mancais e engrenagens podem ser aumentados selecionando as características topográficas 3D apropriadas (Dong, 1994).

## 2.7. INCERTEZA DE MEDIÇÃO

Segundo o Guia Para Expressão da incerteza de Medição (1997), a incerteza de medição é o “Parâmetro associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que poderiam ser razoavelmente atribuídos ao mensurando” esta dúvida existe no resultado de qualquer de medição e é estimada estatisticamente com um grau de confiabilidade.

As referências deste guia são as mesmas adotadas pelo INMETRO.

Neste guia o cálculo e a análise de incerteza são embasados nas seguintes etapas: construção das hipóteses de trabalho; determinação da função de medição; cálculo das incertezas padrão Tipo A; cálculo das incertezas padrão Tipo B; cálculo da incerteza combinada; cálculo da incerteza expandida.

Normalmente em metrologia é adotada uma confiabilidade a partir de 95% de confiabilidade (Witte, 2001).

### 2.7.1. Construção das hipóteses de trabalho

Devem ser analisadas todas as condições em que a medição é efetuada, verificando suas influências no cálculo.

Variações isoladas de grande amplitude podem influenciar no cálculo de incerteza, por tanto uma das maneiras de isolar estes *outliers* é aplicando o teste de *Dixon* (ISO 5725).

As etapas para o teste de *Dixon* são as seguintes:

- i. Selecionar os valores das medições;
- ii. Organizá-las em ordem crescente;
- iii. Tomar os valores extremos;

Um exemplo da aplicação do teste em uma amostragem com 10 medições deve ser feito da seguinte maneira:

- i. Toma-se o maior valor extremo, calcula-se a diferença dele pelo segundo maior e dividi-se, pela diferença do segundo maior pelo valor extremo menor.
- ii. Toma-se o segundo menor valor extremo, calcula-se a diferença dele pelo primeiro valor extremo, e dividi-se pela diferença do maior valor extremo pelo menor valor extremo;

$$A_n(suspeita) = \frac{A_{10} - A_9}{A_{10} - A_1} \quad (2.19)$$

$$A_1(suspeita) = \frac{A_2 - A_1}{A_{10} - A_1} \quad (2.20)$$

A interpretação dos resultados é feita da seguinte maneira:

- i. O valor encontrado na divisão das diferenças é comparado com um valor tabelado, encontrado na tabela de Dixon (ver anexo II, pág. 117).
- ii. Se o valor encontrado for maior que o tabelado, exclui-se aquele que extrapola o valor tabelado, ou atenua-se o resultado da medição igualando-o com o segundo maior valor ou segundo menor valor (depende qual dos extremos que extrapolou).

Este método pode ser aplicado em qualquer análise de medição, ou seja, toda vez que se encontrarem valores discrepantes durante o processo de medição.

Após a verificação dos valores mensurados, devem ser levantadas as grandezas de influencia que estão presentes na medição. São grandezas de influencias:

- ✓ Variações nas condições ambientais;
- ✓ Campos magnéticos;
- ✓ Perdas nos cabos de conexão na medição, etc.

### 2.7.2. Determinação da função medição

É o primeiro passo para o cálculo da incerteza. A função de medição estabelece a relação entre o resultado  $Y$  e as grandezas de entrada que dependem do mensurando.

O valor do mensurando depende em geral de  $n$  grandezas de entrada  $X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n$ , relacionadas por uma função  $f$ , conforme a relação abaixo:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n) \quad (2.21)$$

O resultado  $Y$  pode ser determinado através de uma medição direta ou indireta.

No caso da medição direta, pode-se ter uma expressão muito simples do tipo;

$$Y = X \quad (2.22)$$

A medição indireta consiste em determinar  $y$  por meio de  $n$  outras grandezas de entrada  $x_i$ , que definem o mensurando. Neste caso o resultado pode ser determinado com base na média de observações individuais das  $n$  grandezas de entrada como abaixo:

$$Y = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_i, \dots, \bar{x}_n) \quad (2.23)$$

### Cálculo da incerteza padrão Tipo A

A incerteza Tipo A é oriunda da repetitividade e aleatoriedade das medições, e esta é determinada por meios estatísticos a partir de dados obtidos na fase de mensuração da grandeza (Souza, 2001).

A equação que define a incerteza Tipo A é dada pelo desvio padrão experimental da amostra dividida pela raiz quadrada das  $n$  amostras.

$$u_a = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}}{\sqrt{n}} \quad (2.24)$$

### **Cálculo da incerteza padrão Tipo B**

As incertezas Tipo B são obtidas de fontes externas, ou seja, de dados que não são oriundos do processo de medição (INMETRO (ISO GUM), 1997).

Quando as informações sobre a incerteza, ou relacionadas à incerteza, provém de fontes externas, estas informações geralmente correspondem a mais de um desvio padrão para suas distribuições de probabilidade. Por tanto devem ser corrigidas por um fator apropriado (Gonçalves, 2001).

Os tipos mais comuns de incerteza Tipo B são:

- ✓ Incerteza declarada no certificado de calibração do padrão de referência;
- ✓ Incerteza declarada no certificado de calibração do instrumento de medição;
- ✓ A resolução do mensurando;
- ✓ Incerteza associada a constantes que foram tiradas de livros (*handbooks*);

A determinação das incertezas deve ser detalhada, caso a caso de acordo com os equipamentos utilizados (Quiliti, 2003).

### **Incerteza padrão combinada**

Segundo o GEUM (1997), a incerteza padrão combinada é obtida por meio dos valores de várias outras grandezas, sendo igual à raiz quadrada positiva de uma soma de termos, sendo estes as variâncias ou covariâncias destas outras

grandezas, ponderadas de acordo com quanto o resultado da medição varia com mudanças nestas grandezas.

De maneira simplificada é a média geométrica de todas as fontes de incerteza, ou seja, é a raiz quadrada da soma quadrática de todas as fontes de incerteza, ela abrange em torno de 68% de confiabilidade em torno de um valor médio ( $\pm 1\sigma$ ).

$$u_c = \sqrt{u_a^2 + u_b^2 + \dots + u_n^2} \quad (2.25)$$

### **Incerteza expandida**

Grandeza definida em um intervalo em torno do resultado de uma medição com o qual se espera abranger uma grande fração da distribuição dos valores que possam ser razoavelmente atribuídos ao mensurando (GEUM, 1997).

A incerteza expandida, designada por  $U$ , visa a possibilitar a declaração da incerteza do resultado de uma medição, por meio de um intervalo associado a um nível de confiança. Essa incerteza é obtida multiplicando a incerteza combinada ( $u_c$ ) por um fator de abrangência  $k$ , conforme seguinte:

$$U = k.u_c \quad (2.26)$$

O fator de abrangência  $k$  é um fator numérico usado como multiplicador da incerteza padronizada combinada de modo a obter uma incerteza expandida (GEUM, 1997).

Ele determinado a partir da distribuição  $t$  de *Student* com graus efetivos liberdade de para um nível  $p$  de confiança. (ver anexo I, pág. 116).

O Valor dos graus efetivos de liberdade ( $v_{\text{eff}}$ ) é calculado por meio da aproximação dada pela equação de Welch-Satterthwaite (Gonçalves, 2001).

$$v_{eff} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^n \frac{u_a^4}{v_i}} \quad (2.27)$$

No caso de incertezas Tipo B quando  $v_i$ , não for declarado nos certificados de calibração e não poder ser obtido através de literatura ou não puder ser determinado com base na experiência e adotado que:

$$v_i \rightarrow \infty \quad (2.28)$$

Caso o valor obtido para  $v_{eff}$  não seja um número inteiro, deverá ser adotado o inteiro imediatamente inferior para  $v_{eff}$  e a seguir determinando o valor de  $t_{95} = v_{eff}$ .

Esse valor é usado como valor do fator de abrangência  $k_{95}$ , ou seja:

$$k_{95} = t_{95}(v_{eff}) \quad (2.29)$$

Para incerteza expandida normalmente usada tem-se:

$$U = k_{95} \cdot u_c \quad (2.30)$$

## Capítulo 3

### PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Este capítulo vem apresentar as regiões do componente onde serão feitas as diversas medições e os equipamentos empregados na análise de textura superficial e forma geométrica.

Foram avaliados o erro de forma e a textura superficial com a utilização de diferentes tipos de filtros e em diferentes faixas.

Os ensaios foram feitos da seguinte maneira: as análises de forma e rugosidade 2D foram realizadas no diâmetro sede retentor, o qual possui um valor especificado de  $22,8 \pm 0,05$  mm e um comprimento de 8 mm. A peça usada para as medições estava com um diâmetro efetivo de 22,812 mm. A análise de textura 3D foi realizada no diâmetro sede engrenagem 3ª velocidade condutora.

#### 3.1. MATERIAIS

A peça utilizada neste trabalho é o eixo primário (árvore primária) que é um dos componentes que compõem o conjunto moto propulsor do veículo, como é mostrada na Fig. 3.1. Essa peça foi escolhida para esse trabalho devido há problemas de vazamento localizado no diâmetro da sede do retentor e melhor acompanhamento das operações de lixamento.

Esta peça recebe e transmite a força produzida no motor para os outros componentes da transmissão.

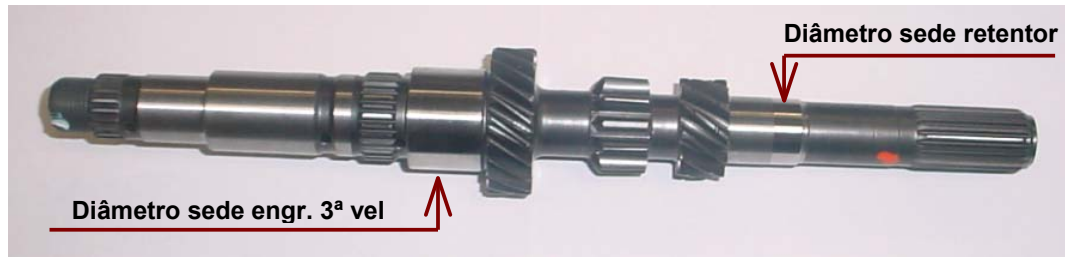


Figura 3.1 - Eixo primário (árvore primária).

Este componente ao longo do processo de fabricação passa por várias etapas tais como usinagem, tratamento térmico, retificação e lixamento.

O material da peça é de aço forjado com baixo teor de carbono e sua estrutura química é  $Fe_{19}MnCr_5$ .

A peça possui aproximadamente 1400g e um comprimento de 339,75 mm. O limite de resistência está entre 100 a 150 kgf/ mm<sup>2</sup>.

O eixo primário, após o processo de usinagem, precisa passar por um segundo processo que é o de tratamento termoquímico, onde lhe é conferida maior dureza superficial.

O tratamento termoquímico é feito com gás metano e amônia em um forno contínuo dividido em varias zonas com atmosfera controlada, onde a temperatura varia de 800 a 920 °C.

### 3.1.1. Descrição das etapas de fabricação

#### Usinagem

O eixo primário é uma peça usinada entre pontas nas etapas de torneamento e rebarbamento.

Na etapa de torneamento esta peça é torneada por um torno monofuso, que é equipado com ferramentas (pastilhas) revestidas por TiC ou TiN.

Na etapa de fresamento os dentes são feitos por fresas tipo caracol integral e facas tipo *fellows*, com substrato de metal duro e também revestidas por TiC ou TiN.

Na etapa de retirada de rebarba as ferramentas (facas) também são revestidas com TiC ou TiN.

Na etapa de *shaving* onde é feito o acabamento interno nos dentes das engrenagens que estão no eixo primário, o substrato da ferramenta é de aço com pequenas ferramentas implantadas (lâminas) nos dentes, que interagem com os dentes da engrenagem do eixo primário, dando o acabamento especificado.

### **Tratamento Termoquímico**

O eixo primário após o processo de usinagem precisa passar por outra etapa que é a de tratamento termoquímico. Onde será conferida à peça maior dureza superficial.

O material utilizado para a fabricação da peça possui baixo teor de carbono e devido a esta característica a peça é levada para um forno com atmosfera controlada e rica em carbono, juntamente com outros gases a peça passa por um processo de carbocementação.

A espessura da camada cementada varia de 0,4 a 0,8 mm e a dureza mínima especificada é de 660 HV.

### **Retificação**

Após a etapa do tratamento termoquímico, a peça passa por deformações causadas pela elevada temperatura e exposição há vários gases.

A operação de retificação é muito importante para a correção destas deformações, já que é exigida uma grande precisão nesta peça.

Alguns dos diâmetros desta peça são sedes de rolamentos e por isso as operações de retífica são muito importantes.

### **Lixamento**

O eixo primário possui uma parte muito específica que é o diâmetro sede do retentor. Esta parte da peça necessita de um acabamento superficial bem distinto das outras, pois picos provenientes do processo de retificação podem comprometer a vida útil do retentor que se aloja sobre esta parte da peça.

O lixamento é feito no sentido oposto ao sentido da retificação para “pentear o perfil”, assim os picos remanescentes são eliminados.

## **3.2. METODOLOGIA EMPREGADA NOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS**

Os ensaios experimentais foram definidos conforme as condições de trabalho da peça, pois irregularidades podem comprometer o desempenho deste componente.

Foram analisadas condições de funcionamento da peça e a confiabilidade e repetitividade dos equipamentos utilizados na medição através do levantamento do cálculo de incerteza de medição dos equipamentos envolvidos.

As características que serão analisadas na peça são as seguintes: erro de forma e textura superficial. Os equipamentos utilizados nos ensaios experimentais foram um medidor de forma e um rugosímetro.

### 3.2.2. Medidor de forma geométrica

O medidor de forma utilizado na experimentação é um equipamento fabricado pela empresa *Taylor Hobson*. Este equipamento é mostrado na Fig. 3.2. 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.



Figura 3.2 - Medidor de forma geométrica.

Antes da medição, a peça precisa passar por um processo de alinhamento e nivelamento antes de iniciar a medição, como é mostrado na Fig. 3.3



Figura 3.3 - Processo de alinhamento e nivelamento da peça.

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. 3.4.

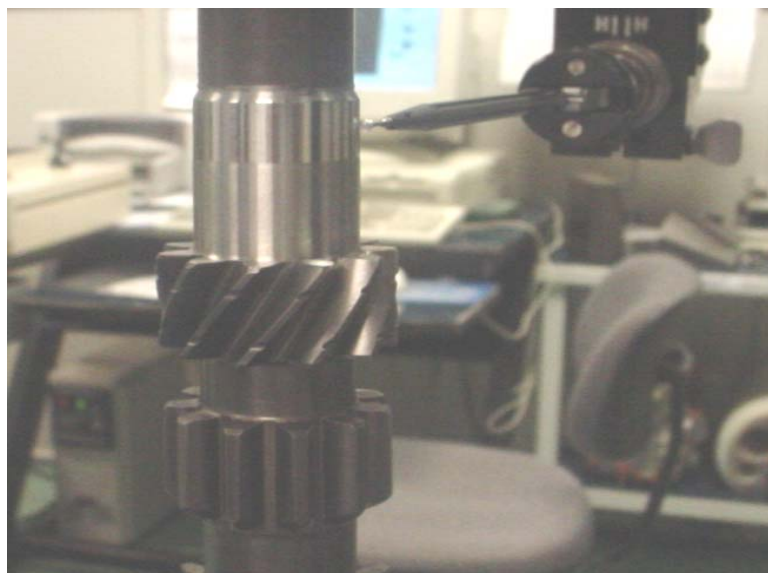


Figura 3.4 - Processo de medição por contato.

### Dados técnicos do equipamento

O medidor de forma modelo *Talyrond 265* é um equipamento eletrônico que opera com *software* em ambiente *Windows*. O equipamento precisa de uma fonte alimentação 220 volts e uma fonte de ar comprimido de 3 bar, pois a mesa niveladora trabalha sobre um filme de ar.

O equipamento tem a capacidade de analisar até 310 mm de comprimento e um diâmetro de 300 mm com uma resolução dos resultados de 0,01  $\mu\text{m}$ .

Os erros de forma controlados foram: cilíndricidade, circularidade, retitude e paralelismo.

### 3.3. MEDIÇÃO DE TEXTURA SUPERFICIAL

Os rugosímetros utilizados na experimentação são equipamentos fabricados pela empresa *Taylor Hobson*.

Estes instrumentos estão mostrados nas Figuras 3.5 e 3.6. A medição pode ser feita através de contato direto com a superfície ou escaneamento *laser*.



Figura 3.5 - Rugosímetro com análise 2D.

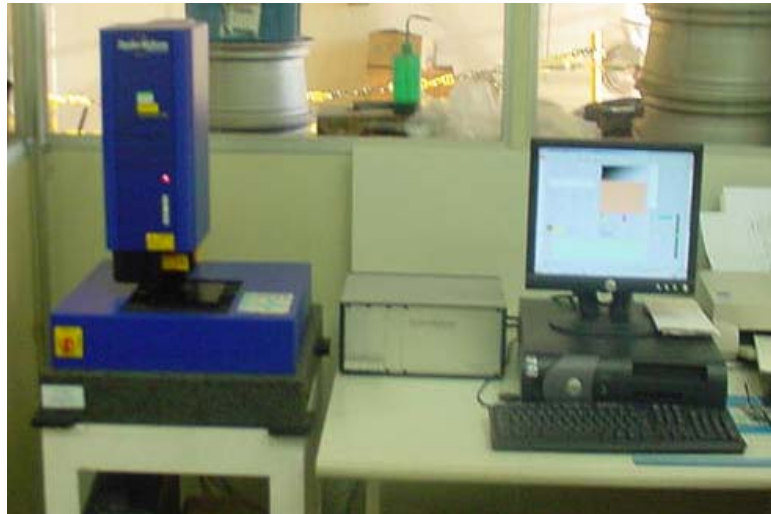


Figura 3.6 - Rugosímetro com análise 3D.

A peça precisa passar por um processo de alinhamento, onde os “sulcos” da usinagem fiquem perpendiculares com o sentido de trabalho do apalpador, como é mostrado nas Figuras 3.7 e 3.8.

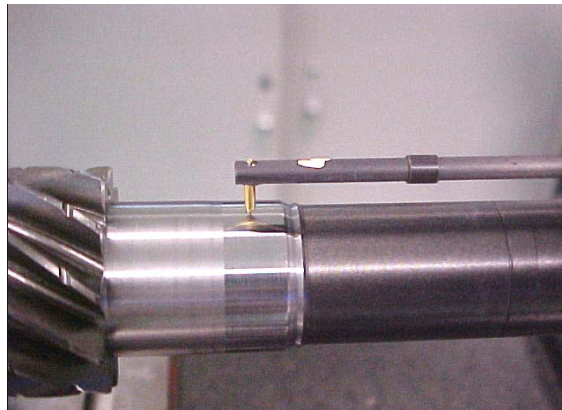


Figura 3.7 - Medição de textura superficial no ponto máximo.



Figura 3.8 - Medição de textura superficial no ponto máximo (vista de cima).

A leitura da superfície com *laser* é diferente, pois a luz não incide exatamente perpendicular aos sulcos e sim um pouco inclinada. Uma medição com escaneamento *laser* é mostrada na Fig. 3.9.

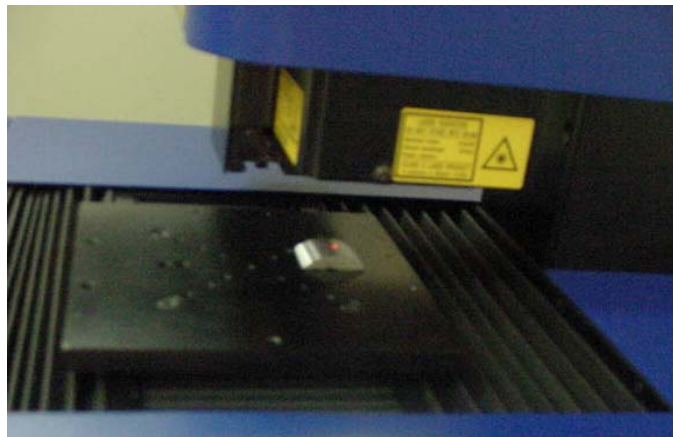


Figura 3.9 - Medição de textura superficial por escaneamento.

No caso da medição 2D, o contato é feito no ponto máximo do diâmetro da peça.

No sistema de medição 2D, a apalpagem é constituída de uma bobina indutiva e uma haste de fibra de carbono com uma ponta de diamante sintético fixada na ponta do apalpador, conforme mostrado na Fig. 3.10.

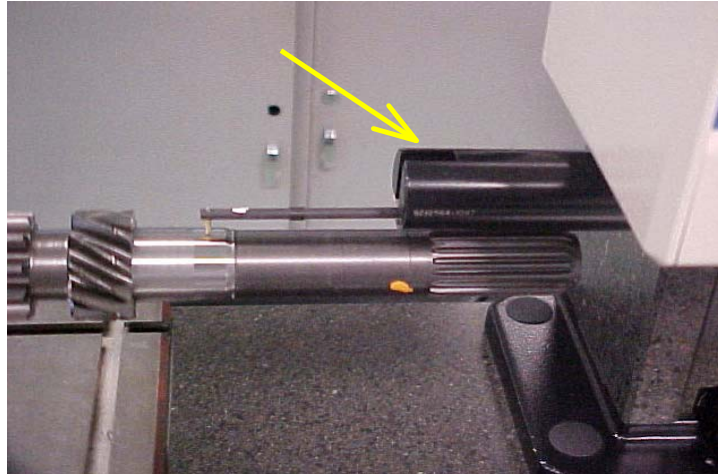


Figura 3.10 - Sistema de captação do sinal por bobina indutiva.

Os medidores de textura superficial 2D e 3D, são equipamentos eletrônicos que operam com *software* em ambiente *Windows*. Ambos equipamentos precisam de uma fonte alimentação 220 e ficar isolado de vibrações.

O equipamento 2D tem a capacidade de analisar uma superfície de até 120 mm de comprimento em uma altura de 450 mm, com uma resolução dos resultados de 0,0001  $\mu\text{m}$ .

O rugosímetro 3D tem a capacidade de analisar uma área de até 100  $\text{mm}^2$  captando o sinal da superfície em até 15 mm, com escaneamento *laser* e 4 mm com apalpagem mecânica.

Este equipamento também possui uma resolução de 0,0001  $\mu\text{m}$ .

Os parâmetros controlados foram:  $R_a$ ,  $R_t$ ,  $R_v$ ,  $R_{ku}$ , RHSC (20%),  $W_a$ ,  $W_t$ ,  $S_a$ ,  $S_q$ ,  $S_v$ ,  $S_{ku}$ .

Alguns parâmetros de textura e ondulação têm influência direta no funcionamento da peça.

Todos os ensaios foram realizados em condições onde o laboratório de metrologia possui limites de temperatura e umidade controlados.

Os limites de trabalho são os seguintes: temperatura  $20 \pm 1^\circ\text{C}$  e umidade relativa:  $50 \pm 10\%$ .

No momento das medições a temperatura oscilou entre 20,22 e 20,38 °C, a umidade se manteve estável.

### 3.4. ANÁLISE DE INCERTEZAS DAS MEDIÇÕES

Os valores de medição encontrados na forma geométrica e textura superficial serviram de base para cálculo de incerteza em função do filtro aplicado.

O teste de *Dixon* (ISO 5725) foi usado para localizar os possíveis *outliers* que poderiam estar presentes nas medições.

Os valores das medições foram ordenados em ordem crescente e os valores extremos são tomados para a verificação.

As equações 2.19 e 2.20 (Cap. 2) foram usadas neste cálculo.

A Eq. 2.19 foi usada para o valor máximo e a Eq. 2.20 para o valor mínimo. No entanto, como os erros de forma e rugosidade são características unilaterais, eles possuem valores limites máximos (um valor acima de um limite especificado pode comprometer o funcionamento do produto).

Após a aplicação do teste, sendo o resultado encontrado maior do que o valor tabelado. Este valor extremo que extrapolou deve ser substituído pelo valor antecedente a ele e em seguida o teste deve ser aplicado novamente, até que o valor encontrado fique igual ou abaixo do valor tabelado.

A incerteza padronizada Tipo A foi levantada com base na Eq. 2.24 (Cap. 2) em cada faixa de filtragem utilizada aplicou-se filtragem gaussiana e ISO 2CR.

As fontes de incerteza Tipo B consideradas nas medições de forma e textura superficial foram estimadas dividindo cada grandeza pela sua respectiva distribuição.

De posse dos valores das incertezas Tipo A e Tipo B, os valores foram combinados aplicando-se a Eq. 2.25 (Cap. 2) para cada faixa de filtragem e para cada parâmetro de rugosidade medido, tanto na filtragem gaussiana quanto na filtragem ISO 2CR.

Com o valor da incerteza combinada em cada item, foi aplicada a Eq. 2.27 (Welch-Satterthwaite, Cap. 2), para um grau de abrangência 95,45% de confiabilidade, aonde foi encontrado o fator K para expansão do resultado de cada valor de incerteza procurado.

## Capítulo 4

### Resultados experimentais

Este capítulo tem o objetivo de apresentar a os efeitos nos resultados das medições de forma geométrica e textura superficial conforme o tipo de filtro aplicado na análise.

#### 4.1. RESULTADO DAS MEDIÇÕES DE FORMA

Os resultados de medição de forma e rugosidade foram divididos em tabelas onde cada uma apresenta os valores de medição encontrados.

Os resultados de medição da característica de cilindridade com filtragem gaussiana e ISO 2CR são apresentados nas tabelas 4.1 e 4.2, respectivamente.

Nota-se um aumento no valor da medição à medida que as faixas de filtragem vão mudando, de 1:15 a 1:500 UPR.

Tabela 4.1 - Medição de cilindridade com filtragem gaussiana.

Medições	Característica: Cilindridade ( $\mu\text{m}$ )			
	Faixa de filtragem			
	1:15 UPR	1:50 UPR	1:150 UPR	1:500 UPR
1	8,21	8,75	9,20	9,59
2	8,19	8,74	9,10	9,21
3	8,21	8,75	9,20	9,57
4	8,17	8,71	9,07	9,23
5	8,18	8,73	9,06	9,24

Tabela 4.2 - Medição de cilindridade com filtragem 2CR.

Medições	Característica: Cilindridade ( $\mu\text{m}$ )			
	Faixa de filtragem			
	1:15 UPR	1:50 UPR	1:150 UPR	1:500 UPR
1	8,49	8,97	9,38	9,67
2	8,46	8,92	9,16	9,36
3	8,49	8,97	9,37	9,59
4	8,44	8,89	9,15	9,34
5	8,46	8,89	9,13	9,36

Os resultados de medição da característica de circularidade com filtragem gaussiana e ISO 2CR são apresentados nas tabelas 4.3 e 4.4 e também se percebe o mesmo aumento nos valores de medição, observado anteriormente.

Tabela 4.3 - Medição de circularidade com filtragem gaussiana.

Medições	Característica: Circularidade ( $\mu\text{m}$ )			
	Faixa de filtragem			
	1:15 UPR	1:50 UPR	1:150 UPR	1:500 UPR
1	1,55	2,12	2,56	3,03
2	1,51	2,08	2,39	2,53
3	1,50	2,09	2,49	2,73
4	1,49	2,05	2,39	2,55
5	1,49	2,05	2,30	2,59

Tabela 4.4 - Medição de circularidade com filtragem ISO 2CR.

Medições	Característica: Circularidade ( $\mu\text{m}$ )			
	Faixa de filtragem			
	1:15 UPR	1:50 UPR	1:150 UPR	1:500 UPR
1	1,87	2,36	2,81	3,07
2	1,83	2,25	2,46	2,56
3	1,84	2,32	2,63	2,79
4	1,81	2,24	2,46	2,58
5	1,80	2,18	2,46	2,62

Os resultados das medições das características de retitude e paralelismo com filtragem gaussiana e ISO 2CR são apresentados nas Tabelas 4.5 e 4.6.

Nas medições de retitude e paralelismo, o erro não se dá em torno de uma revolução e sim ao longo de comprimentos determinados ou superfícies de referência.

Tabela 4.5 - Medição de retitude com filtro gaussiano e 2CR ( $\mu\text{m}$ ).

Medições	Filtragem gaussiana	Filtragem 2CR
1	5,29	6,14
2	5,21	5,97
3	5,36	6,22
4	5,61	6,38
5	5,14	6,87

Tabela 4.6 - Medição de paralelismo com filtro gaussiano e 2CR ( $\mu\text{m}$ ).

Medições	Filtragem gaussiana	Filtragem 2CR
1	0,77	0,86
2	0,67	0,77
3	0,61	0,68
4	0,53	0,61
5	0,76	0,85

#### 4.2. RESULTADO DAS MEDIÇÕES DE RUGOSIDADE 2D

Para todas as medições de rugosidade 2d foi utilizado um comprimento de análise padronizado de 5,6 mm, com um ponto de corte (*cut-off*) de 0,8 mm. A referência das análises partiram da linha LS (quadrática média), usando-se uma largura de banda ISO 300:1 (trezentos pontos por cut-off).

Os resultados das medições de rugosidade são apresentados nas Tabelas 4.7 e 4.8, onde são mostrados os resultados encontrados com filtragem gaussiana e ISO 2CR. Tabela 4.7 - Valores de rugosidade 2D com filtragem gaussiana.

Medições	Parâmetros ( $\mu\text{m}$ )						
	$R_a$	$R_{ku}$	$R_v$	$R_t$	RHSC (20%)	$W_a$	$W_t$
1	0,2368	5,5305	1,3610	2,3681	28	1,2304	4,0762
2	0,2896	4,7377	1,6492	2,8626	25	1,146	3,7308
3	0,2387	4,8048	1,1278	2,4468	29	1,2334	3,7435
4	0,2419	5,4403	1,3174	2,6637	28	1,2689	3,9008
5	0,2839	4,7602	1,4498	2,8068	27	1,2046	4,0368
6	0,2296	6,0097	1,3039	2,5967	29	1,2384	4,0662
7	0,2191	4,7644	1,1866	2,4173	30	1,2673	3,9941
8	0,2455	6,0421	1,5140	2,7027	27	1,2596	3,9732
9	0,2180	6,2752	1,3775	2,4546	30	1,2729	4,3517
10	0,2921	5,3632	1,6602	2,7704	28	1,2286	3,8212

Tabela 4.8 - Valores de rugosidade 2D com filtragem ISO 2CR.

Medições	Parâmetros ( $\mu\text{m}$ )						
	$R_a$	$R_{ku}$	$R_v$	$R_t$	RHSC (20%)	$W_a$	$W_t$
1	0,2969	3,0588	1,0865	2,4036	20	1,4091	4,0892
2	0,3509	2,6827	1,1727	2,6057	23	1,3029	3,8119
3	0,3045	2,9901	1,0163	2,3696	18	1,3837	3,8859
4	0,3044	3,5773	1,322	2,6071	18	1,4259	3,7262
5	0,3491	3,8684	1,3287	3,0945	20	1,3696	4,2745
6	0,2955	3,5951	1,0845	2,727	21	1,3839	3,9064
7	0,2579	6,608	1,3227	3,3266	26	1,3741	3,7153
8	0,3137	2,6801	1,2893	2,7215	19	1,3775	3,8751
9	0,307	1,1255	1,2894	2,5101	24	1,4353	4,3215
10	0,3328	3,8242	1,5335	2,9515	17	1,4027	4,4721

#### 4.3. RESULTADO DAS MEDIÇÕES DE RUGOSIDADE 3D

Todas as medições de rugosidade 3D foram feitas em um comprimento de 13,5 mm em uma largura de 3,05 mm. O passo entre as medições foi de 2,5  $\mu\text{m}$ .

Devido às dimensões do eixo primário em relação à mesa do rugosímetro 3D e aos ciclos de medição serem muito demorados, foram feitas apenas cinco medições.

A peça foi cortada e as medições foram realizadas em uma seção do diâmetro sede da engrenagem da terceira condutora. Os valores das medições encontram-se na Tab. 4.9. Observa-se nestes resultados uma grande estabilidade entre as medições.

Tabela 4.9 - Parâmetros espaciais de textura superficial.

Medições	Parâmetros ( $\mu\text{m}$ )			
	$S_a$	$S_v$	$S_t$	$S_{ku}$
1	27,60	97,40	151	2,30
2	27,70	97,40	149	2,30
3	27,70	97,50	149	2,30
4	27,80	97,60	150	2,31
5	27,70	97,80	149	2,30

Devido à impossibilidade de se aplicar os filtros gaussianos e ISO 2CR em medições de rugosidade 3D, em função da análise, foi necessário retirar alguns perfis que compõem a área analisada e analisá-los como rugosidade 2D.

Aplicando-se esta sistemática foi possível verificar a variação dos valores de medição de acordo com o tipo de filtro aplicado. As Tabelas. 4.10 e 4.11 apresentam os novos valores de rugosidade com análise 3D retirados de uma área analisada com rugosidade 3D. Nota-se que existe uma variação maior entre os valores de medição, o que não aconteceu com a análise 3D.

Tabela 4.10 - Parâmetros 2D retirados de uma seção 3D e analisados com filtro gaussiano.

Medições	Parâmetros ( $\mu\text{m}$ )					
	$R_a$	$R_t$	$R_v$	$R_{ku}$	$W_a$	$W_t$
1	1,19	11,90	3,89	4,79	0,108	0,744
2	1,54	15,42	4,80	3,96	0,137	0,904
3	1,21	13,10	3,53	3,84	0,166	1,01
4	1,35	12,63	3,81	3,83	0,153	0,87
5	1,47	12,65	4,41	3,51	0,176	1,00

Tabela 4.11 - Parâmetros 2D retirados de uma seção 3D e analisados com filtro ISO 2CR.

Medições	Parâmetros ( $\mu\text{m}$ )					
	$R_a$	$R_t$	$R_v$	$R_{ku}$	$W_a$	$W_t$
1	1,29	13,40	4,12	4,68	0,621	2,79
2	1,70	17,70	5,38	3,98	0,212	1,25
3	1,25	13,70	3,61	4,05	0,517	2,30
4	1,36	14,18	4,20	4,09	0,116	1,81
5	1,52	17,60	5,09	5,13	0,143	1,52

A superfície foi medida com escaneamento a *laser*. A Fig. 4.1 representa o perfil primário P em uma vista 3D. Nesta figura estão contidas todas as irregularidades captadas na superfície analisada.

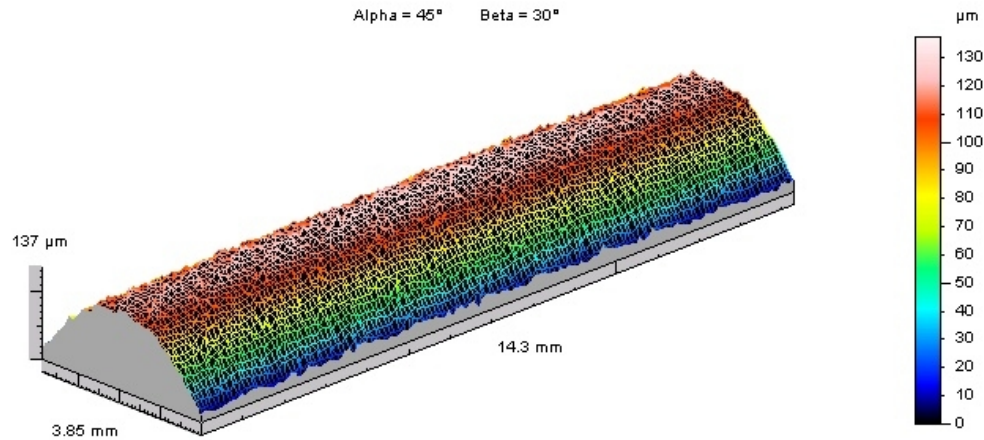


Figura 4.1 - Perfil da superfície composto por forma, ondulação e rugosidade (vista de uma seção cilíndrica).

A Fig. 4.2 representa o mesmo perfil, porém com uma vista axonométrica (monocromática). Observa-se que houve um achatamento na concavidade embora os valores de referência continuem os mesmos

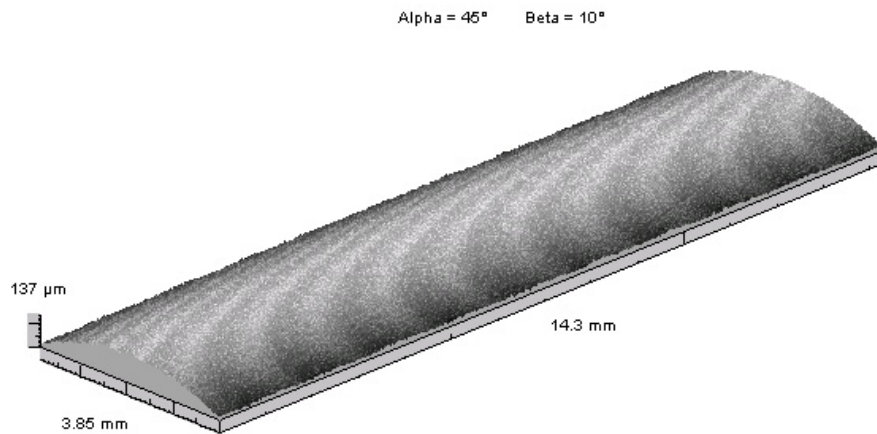


Figura 4.2 - Perfil da superfície composta em vista axonométrica (monocromática).

A Fig.4.3 é a representação do mesmo perfil, porém sem a influência da forma, ou seja, ela representa apenas a rugosidade filtrada da superfície.

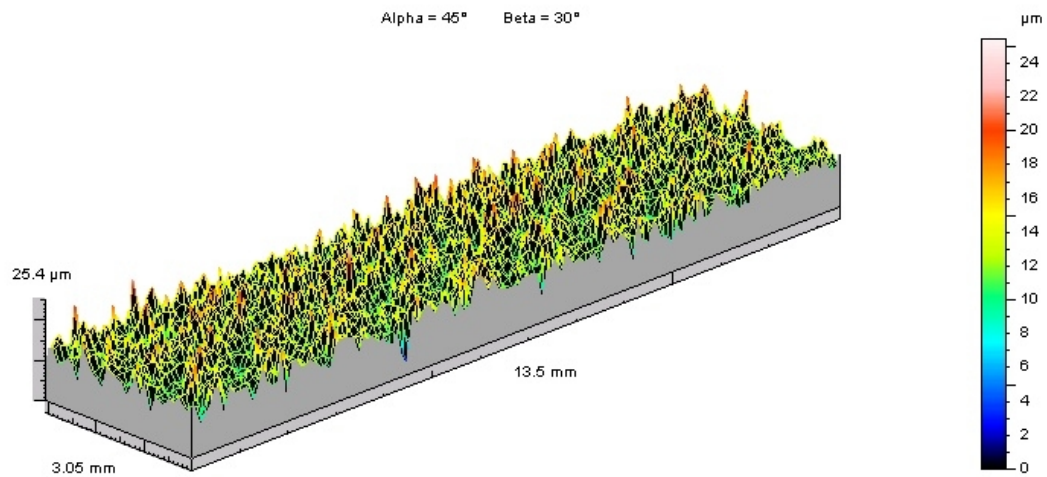


Figura 4.3 - Perfil da superfície com forma e ondulação filtrada (vista da rugosidade da superfície).

A Fig. 4.4 representa a rugosidade da superfície com uma vista axonométrica (monocromática). Também é observado um achatamento dos picos e vales da superfície.

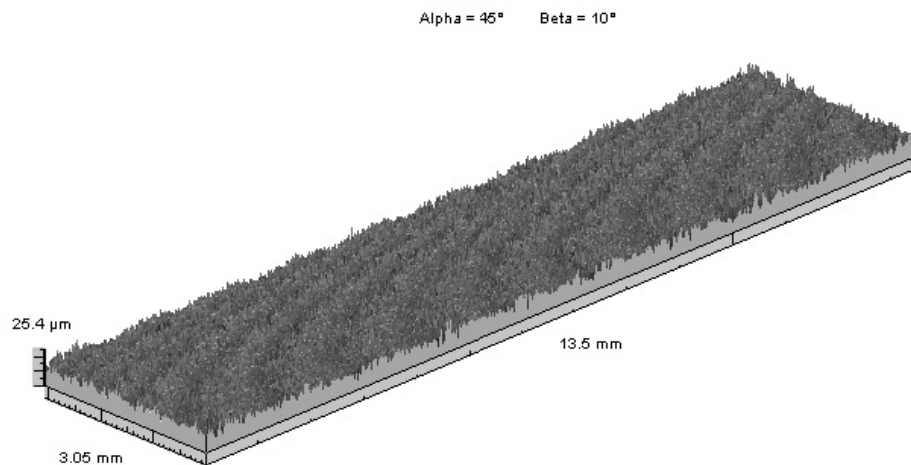


Figura 4.4 - Rugosidade da superfície em vista axonométrica (monocromática).

De forma análoga à curva de rugosidade 2D que analisa o pico e o vale mais profundo em um perfil copiado de uma superfície, a análise 3D utiliza-se do pico e do vale mais profundo em uma área analisada. A Fig. 4.5 representa a curva de *Abbott-Firestone* da área da superfície mensurada.

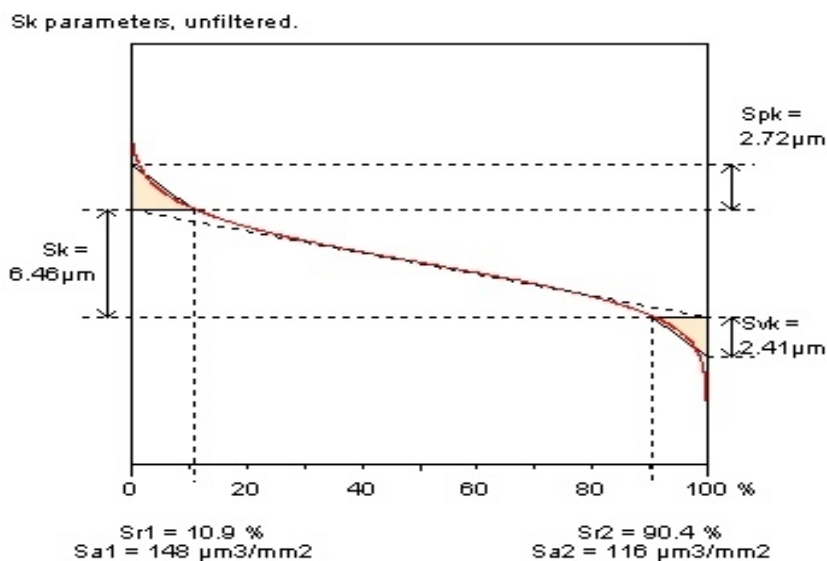


Figura 4.5 - Pico e vale da superfície (curva de *Abbott-Firestone*) representando os pontos de máximo e mínimo material.

## 4.4. ANÁLISE DAS INCERTEZAS DAS MEDIÇÕES

### 4.4.1. Erro de forma

Após as medições de forma, foi necessário levantar o grau de confiabilidade dos resultados, através da determinação da incerteza de medição. O grau de abrangência usado neste trabalho é de 95% de confiabilidade.

Antes da aplicação do cálculo de incerteza foi necessário verificar se existiam variações entre os valores obtidos nas medições, que poderiam comprometer os resultados obtidos.

Grandes diferenças entre os resultados indicam a presença de causas especiais. A utilização de um filtro estatístico é o mais conveniente nestas situações.

Aplicando o teste de *Dixon* (ISO 5725) é possível localizar os “*outliers*” que são valores representados pelos erros aleatórios que poderiam estar presentes nas medições.

As amostras foram ordenadas em ordem crescente e os valores máximos extremos de cada série de medições foram tomados para a verificação. O teste foi aplicado nos resultados obtidos com filtragem gaussiana e ISO 2CR.

Os resultados da aplicação do método de *Dixon* na característica de cilindridade estão mostrados nas Tabelas 4.12 e 4.13. O teste foi aplicado em todas as faixas de medição e comparado com um valor de referência tabelado.

Tabela 4.12 - Resultado do teste de *Dixon* na cilindridade com filtro gaussiano.

Valor tabelado para 5 amostras	Característica: Cilindridade ( $\mu\text{m}$ )			
	Faixa de filtragem / filtro gaussiano			
	1:15 UPR	1:50 UPR	1:150 UPR	1:500 UPR
<b>0,710</b>	0,50	0,25	0,71	0,05

Tabela 4.13 - Resultado do teste de *Dixon* na cilindridade com filtro ISO 2CR.

Valor tabelado para 5 amostras	Característica: Cilindridade ( $\mu\text{m}$ )			
	Faixa de filtragem / filtro 2CR			
	1:15 UPR	1:50 UPR	1:150 UPR	1:500 UPR
<b>0,710</b>	0,60	0,63	0,04	0,24

Os resultados da aplicação do método de *Dixon* na característica de circularidade estão mostrados nas Tabelas 4.13 e 4.14. O teste foi aplicado em todas as faixas de medição e comparado com um valor tabelado.

Tabela 4.14 - Resultado do teste de *Dixon* na circularidade com filtro gaussiano.

Valor tabelado para 5 amostras	Característica: Circularidade ( $\mu\text{m}$ )			
	Faixa de filtragem / filtro gaussiano			
	1:15 UPR	1:50 UPR	1:150 UPR	1:500 UPR
<b>0,710</b>	0,66	0,43	0,27	0,60

Tabela 4.15 - Resultado do teste de *Dixon* na circularidade com filtro ISO 2CR.

Valor tabelado para 5 amostras	Característica: Circularidade ( $\mu\text{m}$ )			
	Faixa de filtragem / filtro 2CR			
	1:15 UPR	1:50 UPR	1:150 UPR	1:500 UPR
<b>0,710</b>	0,43	0,22	0,51	0,55

Os resultados da aplicação do método de *Dixon* na característica de retitude e paralelismo estão mostrados nas Tabelas 4.16 e 4.17. O teste foi aplicado nos valores obtidos no comprimento analisado.

Tabela 4.16 - Resultado do teste de *Dixon* na retitude.

Valor tabelado para 5 amostras	Característica: Retitude ( $\mu\text{m}$ )	
	Filtro gaussiano	Filtro 2CR
	Cut-off 0,8 mm	Cut-off 0,8 mm
<b>0,710</b>	0,53	0,31

Tabela 4.17 - Resultado do teste de *Dixon* no paralelismo.

Valor tabelado para 5 amostras	Característica: Paralelismo ( $\mu\text{m}$ )	
	Filtro gaussiano	Filtro 2CR
	Cut-off 0,8 mm	Cut-off 0,8 mm
<b>0,710</b>	0,04	0,04

De posse dos resultados das medições de forma, com a aleatoriedade d conferidos pelo teste de *Dixon*, foram determinados os desvios padrão de todas as faixas de filtragem com aplicação do filtro gaussiano e ISO 2CR.

Os resultados dos desvios padrão das medições de cilindridade e circularidade com filtragem gaussiana e ISO 2CR estão na Tab. 4.18. Nessa tabela estão todos os valores dos desvios-padrão encontrados na faixa de medição.

Tabela 4.18 - Desvios padrão dos erros de cilindridade e circularidade com filtragem gaussiana e ISO 2CR (Valores em  $\mu\text{m}$ ).

Faixa de filtragem	Filtro gaussiano		Filtro ISO 2CR	
	Característica		Característica	
	Cilindridade ( $\mu\text{m}$ )	Circularidade ( $\mu\text{m}$ )	Cilindridade ( $\mu\text{m}$ )	Circularidade ( $\mu\text{m}$ )
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

Na Tab. 4.19 estão apresentados os desvios padrão de retitude e paralelismo com filtragem gaussiana e ISO 2CR.

Tabela 4.19 - Desvios padrão dos erros de retitude e paralelismo com filtragem gaussiana e ISO 2CR.

Faixa de filtragem	Filtro gaussiano		Filtro ISO 2CR	
	Característica		Característica	
	Retitude $\mu\text{m}$	Paralelismo $\mu\text{m}$	Retitude $\mu\text{m}$	Paralelismo $\mu\text{m}$
Cut-off 0,8 mm	0,1810	0,1016	0,2018	0,1083

O cálculo da incerteza padronizada Tipo A foi realizado pelo desvio padrão das medições.

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;

Os resultados dos cálculos de incerteza seguem na Tabelas 4.20 para cilindridade e circularidade e 4.21 para retitude e paralelismo.

A tabela usada para estimar o coeficiente  $t$  de *Student* (e fator de abrangência  $k$ ) encontra-se na pág. 116 anexo I.

A Tab. 4.20 mostra as variações de incerteza encontradas nas faixas de filtragem na análise de cilindridade e circularidade, os maiores resultados foram observados com a filtragem ISO 2CR.

Tabela 4.20 - Incertezas de cilindridade e circularidade calculadas com filtro gaussiano e ISO 2CR.

Faixa de filtragem	Filtro gaussiano		Filtro ISO 2CR	
	Característica		Característica	
	Cilindridade ( $\pm \mu\text{m}$ )	Circularidade ( $\pm \mu\text{m}$ )	Cilindridade ( $\pm \mu\text{m}$ )	Circularidade ( $\pm \mu\text{m}$ )
1:15 UPR	0,0463	0,0488	0,0476	0,0499
1:50 UPR	0,0459	0,0508	0,0564	0,0767
1:150 UPR	0,0756	0,0992	0,1205	0,1461
1:500 UPR	0,1383	0,1906	0,1448	0,1959

A Tab. 4.21 mostra as variações de incerteza encontradas nas faixas de filtragem na análise de retitude e paralelismo. De maneira similar, observam-se maiores resultados com a filtragem ISO 2CR.

Tabela 4.21 - Incertezas de retitude e paralelismo calculado com filtro gaussiano e ISO 2CR valores em ( $\pm \mu\text{m}$ ).

Faixa de filtragem	Filtro gaussiano		Filtro ISO 2CR	
	Característica		Característica	
	Retitude	Paralelismo	Retitude	Paralelismo
Cut-off 0,8 mm	$\pm 0,1676$	$\pm 0,1007$	$\pm 0,1857$	$\pm 0,1061$

Em todos os resultados de medição de forma observou-se que a incerteza com filtragem gaussiana é menor do que aqueles obtidos com filtro ISO 2CR.

#### 4.4.2. Textura superficial

O mesmo procedimento usado no levantamento das incertezas do erro de forma foi adotado para rugosidade 2D. O teste de *Dixon* foi aplicado nos valores de rugosidade e os resultados são mostrados nas Tabelas 4.2 e 4.23. Tabela 4.22 - Resultado do teste de *Dixon* nas medições de rugosidade com filtro gaussiano.

Valor tabelado para 10 amostras	Parâmetros ( $\mu\text{m}$ )						
	$R_a$	$R_{ku}$	$R_v$	$R_t$	RHSC (20%)	$W_a$	$W_t$
<b>0,530</b>	0,030	0,150	0,020	0,110	0,200	0,030	0,440

Tabela 4.23: Resultado do teste de *Dixon* nas medições de rugosidade com filtro ISO 2CR.

Valor tabelado para 10 amostras	Parâmetros ( $\mu\text{m}$ )						
	$R_a$	$R_{ku}$	$R_v$	$R_t$	RHSC (20%)	$W_a$	$W_t$
<b>0,530</b>	0,019	0,499	0,390	0,240	0,220	0,070	0,1990

Foram levados em consideração todos os desvios padrão de cada parâmetro para o cálculo da incerteza padronizada Tipo A, tanto em rugosidade 2D com em 3D.

As incertezas Tipo B foram as seguintes:

- ✓ 0,1° C de variação da temperatura durante os ensaios (2D e 3D);
- ✓ Coeficiente de dilatação da liga de aço;
- ✓  $P_t$  máximo de 0,15  $\mu\text{m}$  do padrão de ajuste (2D);
- ✓ Resolução do equipamento;
- ✓ Incerteza herdada do padrão;

Os padrões foram calibrados pelo laboratório da fundação CERTI UFSC, cujas cópias dos certificados de calibração estão no anexo.

Os resultados dos desvios padrão dos parâmetros de rugosidade com filtragem gaussiana e ISO 2CR estão nas Tabelas 4.24 , 4.25 e 4.26.

Tabela 4.24 - Desvios padrão com filtragem gaussiana.

Parâmetros	$R_a$	$R_{ku}$	$R_v$	$R_t$	RHSC (20%)	$W_a$	$W_t$
S( $\mu\text{m}$ )	0,0284	0,5934	0,1772	0,1784	1,5239	0,0382	0,1846

Tabela 4.25 - Desvios padrão com filtragem ISO 2CR.

Parâmetros	R <sub>a</sub>	R <sub>ku</sub>	R <sub>v</sub>	R <sub>t</sub>	RHSC (20%)	W <sub>a</sub>	W <sub>t</sub>
S(μm)	0,02766	1,38446	0,15440	0,30790	2,9136	0,03686	0,26619

Tabela 4.26 - Desvios padrão das medições 3D.

Parâmetros	S <sub>a</sub>	S <sub>v</sub>	S <sub>t</sub>	S <sub>ku</sub>
S(μm)	0,0707	0,1673	0,8944	0,0044

Os resultados dos cálculos de incerteza 2D estão mostrados nas Tabelas 4.27 e 4.28.

Para todas as medições 2D foi utilizado um comprimento de amostragem de 5,6 mm, um ponto de corte L<sub>c</sub> (*cut-off*) de 0,8 mm. A referência foi a linha quadrática média (linha LS) e a largura de banda utilizada foi a ISO 300:1 (trezentos pontos por *cut-off*).

Tabela 4.27 - Incerteza de medição dos parâmetros de rugosidade com filtro gaussiano.

Fontes de incerteza	R <sub>a</sub>	R <sub>ku</sub>	R <sub>v</sub>	R <sub>t</sub>	RHS C (20%)	W <sub>a</sub>	W <sub>t</sub>
$S/\sqrt{10}$ (μm)	0,0079	0,1877	0,0560	0,0562	0,0482	0,0121	0,0584
V. temperatura (μm)	1,03E-7	1,03E-7	1,03E-7	1,03E-7	1,03E-7	1,03E-7	1,03E-7
Incert. Herdada (μm)	0,0095	0,0095	0,0095	0,0095	0,0095	0,0095	0,0095
Resolução/2/√6 (μm)	2,04E-5	2,04E-5	2,04E-5	2,04E-5	2,04E-5	2,04E-5	2,04E-5
Incert. Combin. (μm)	0,0123	0,1879	0,0568	0,0569	0,0491	0,0154	0,0591
v <sub>eff</sub>	53,9	9,04	9,52	9,52	9,71	23,51	9,48
k	2,05	2,32	2,28	2,28	2,28	2,11	2,30
<b>U<sub>95,45%</sub> (μm)</b>	<b>±0,0252</b>	<b>±0,4359</b>	<b>±0,1295</b>	<b>±0,1297</b>	<b>±0,1119</b>	<b>±0,0324</b>	<b>±0,1359</b>

Tabela 4.28 - Incerteza de medição dos parâmetros de rugosidade com filtro ISO 2CR (valores em  $\pm \mu\text{m}$ ).

Fontes de incerteza	$R_a$	$R_{ku}$	$R_v$	$R_t$	RHS C (20%)	$W_a$	$W_t$
$S/\sqrt{10}$ ( $\mu\text{m}$ )	0,0087	0,4378	0,0488	0,0974	0,9213	0,0116	0,0842
V. temperatura ( $\mu\text{m}$ )	1,03E-7	1,03E-7	1,03E-7	1,03E-7	1,03E-7	1,03E-7	1,03E-7
Incert.Herdada ( $\mu\text{m}$ )	0,0095	0,0095	0,0095	0,0095	0,0095	0,0095	0,0095
Resolução/ $2/\sqrt{6}$ ( $\mu\text{m}$ )	2,04E-5	2,04E-5	2,04E-5	2,04E-5	2,04E-5	2,04E-5	2,04E-5
Incert. Combin. ( $\mu\text{m}$ )	0,0129	0,4379	0,0497	0,0978	0,9598	0,01499	0,08473
$v_{\text{eff}}$	43,25	9,01	9,69	9,17	10,6	25,09	9,23
k	2,06	2,32	2,28	2,32	2,25	2,11	2,32
<b><math>U_{95,45\%}</math> (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b><math>\pm 0,0266</math></b>	<b><math>\pm 1,0159</math></b>	<b><math>\pm 0,1133</math></b>	<b><math>\pm 0,2268</math></b>	<b><math>\pm 2,1596</math></b>	<b><math>\pm 0,0316</math></b>	<b><math>\pm 0,1965</math></b>

Os resultados dos cálculos de incerteza 3D são mostrados na Tab. 4.29. Vale ressaltar que em análise 3D não existe filtragem gaussiana e nem ISO 2CR.

Tabela 4.29 - Incerteza de medição de rugosidade 3D.

Fontes de incerteza	$S_a$	$S_v$	$S_t$	$S_{ku}$
$S/\sqrt{5}$ ( $\mu\text{m}$ )	0,0316	0,0748	0,40	0,0020
Incert. Herdada ( $\mu\text{m}$ )	0,0095	0,0095	0,0095	0,0095
Resolução/ $2/\sqrt{6}$ ( $\mu\text{m}$ )	2,04E-5	2,04E-5	2,04E-5	2,04E-5
Incert. Combinada ( $\mu\text{m}$ )	0,033	0,075	0,400	0,010
$v_{\text{eff}}$	4,75	4,04	1	2500
k	2,65	2,87	13,97	2
<b><math>U_{95,45\%}</math> (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b><math>\pm 0,087</math></b>	<b><math>\pm 0,22</math></b>	<b><math>\pm 5,58</math></b>	<b><math>\pm 0,230</math></b>

Nos resultados de incerteza das medições textura, observou-se que as incertezas calculadas com filtragem gaussiana são menores em relação a ISO 2CR, com a exceção do parâmetro  $R_v$  e  $W_a$ .

## Capítulo 5

### DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

Neste capítulo são abordadas as discussões baseadas nos resultados dos ensaios realizados.

#### 5.1 ANÁLISE GRÁFICA DOS RESULTADOS

Com base nos resultados dos desvios padrão e da incerteza de medição foram levantados os gráficos comparativos entre as medições com uso de filtragem gaussiana e ISO 2CR.

##### 5.1.1. Desvios padrão de forma geométrica

Todos os desvios padrão foram colocados na forma de gráficos, onde são comparadas a filtragem gaussiana e ISO 2CR.

A Fig. 5.1 representa a variação do desvio padrão da cilindricidade em relação à faixa de filtragem e ao tipo de filtro utilizado na análise.

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

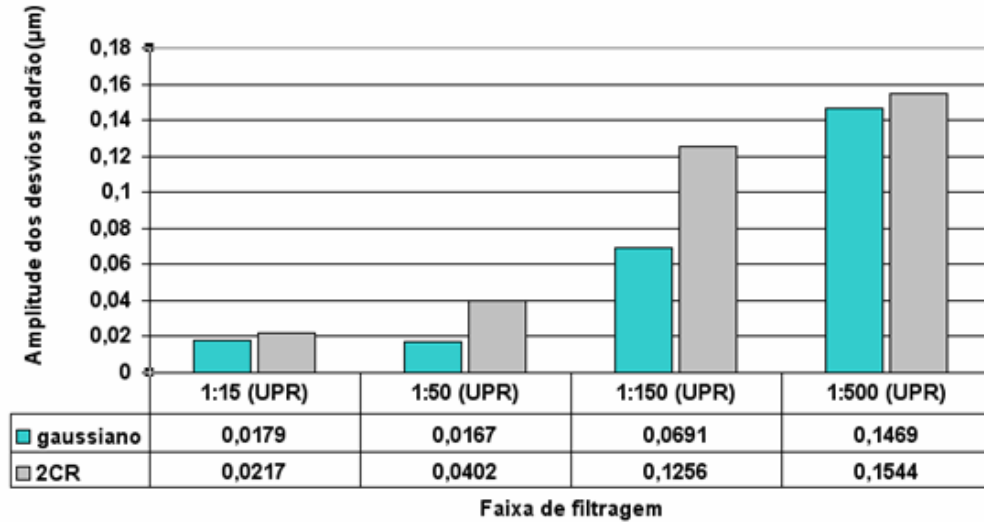


Figura 5.1 - Representação gráfica das variações do desvio padrão na cilindridade com análise gaussiana e ISO 2CR.

A Fig. 5.2 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 observada anteriormente, repete-se na medição de circularidade com a filtragem ISO 2CR, considerando os maiores desvios padrão.

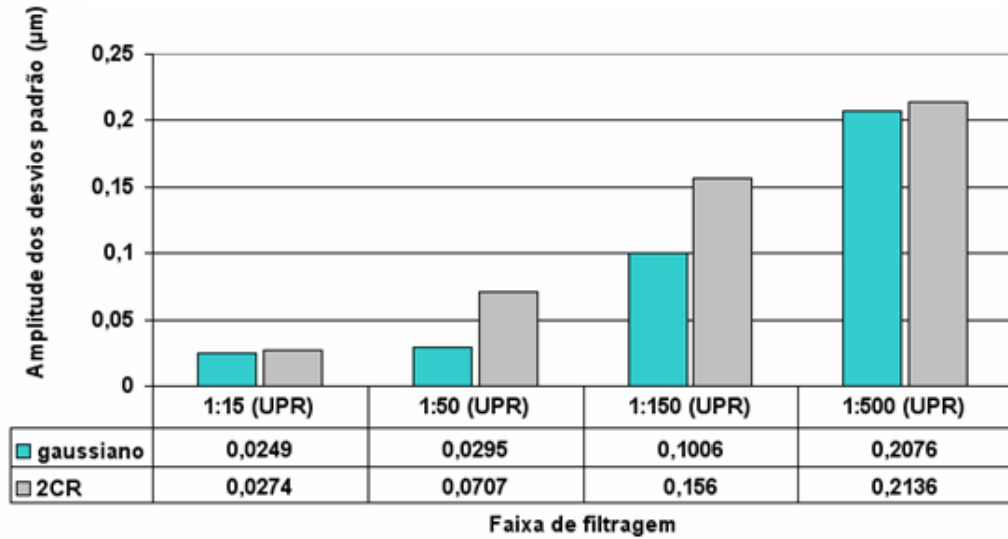


Figura 5.2 - Representação gráfica das variações do desvio padrão na circularidade com análise gaussiana e ISO 2CR.

A Fig. 5.3 representa as variações dos desvios padrão da retitude e paralelismo simultaneamente.

Apesar da tendência da filtragem ISO 2CR provocar maiores valores de desvios padrão, nestas características, a diferença é menos evidente que nos casos anteriores.

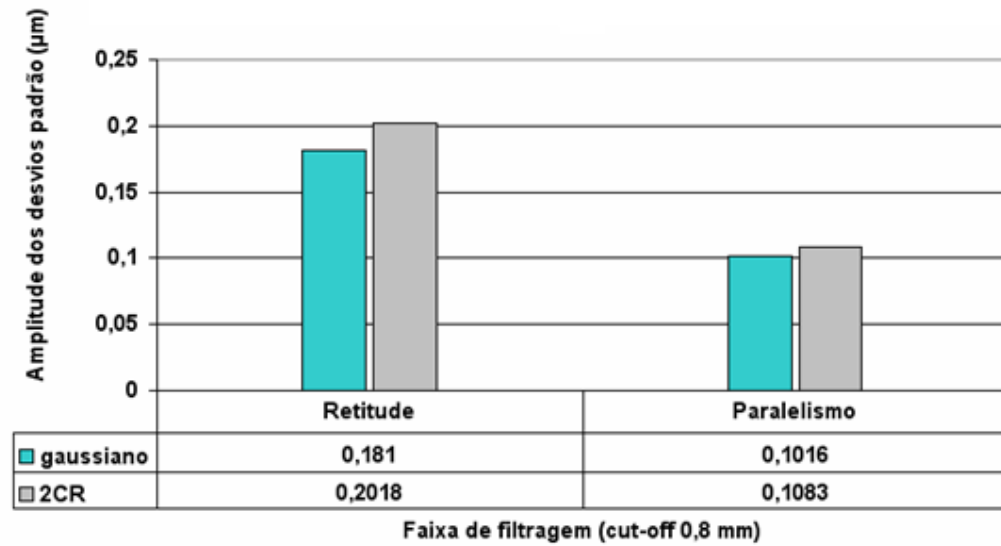


Figura 5.3 - Representação gráfica das variações do desvio padrão na retitude com análise gaussiana e ISO 2CR.

### 5.1.2. Desvios padrão de rugosidade 2D e 3D

Os desvios padrão da rugosidade 2D são representados em forma de gráfico, onde pode ser observado os efeitos da filtragem gaussiana e ISO 2CR nos parâmetros. As Figuras 5.4 e 5.5 representam as variações de acordo com a filtragem.

Neste caso não houve uma tendência como nas medições de forma. Há parâmetros que inverteram e outros mantiveram as características anteriores. Alguns parâmetros possuem um valor maior com filtragem gaussiana e há parâmetros com os valores quase idênticos com as duas filtrações.

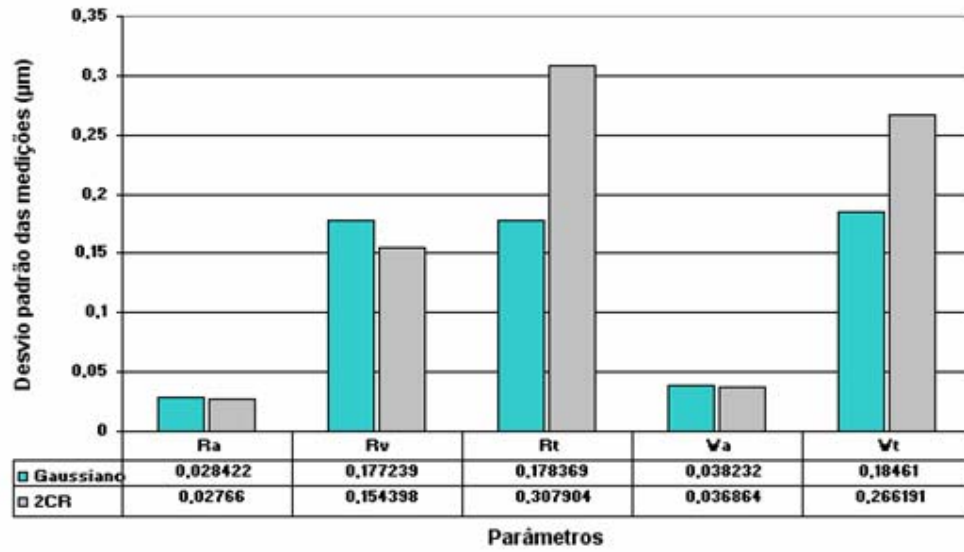


Figura 5.4 - Variações do desvio padrão nos parâmetros de rugosidade ( $R_a$ ,  $R_v$ ,  $R_t$ ,  $W_a$  e  $W_t$ ) com análise gaussiana e ISO 2CR.

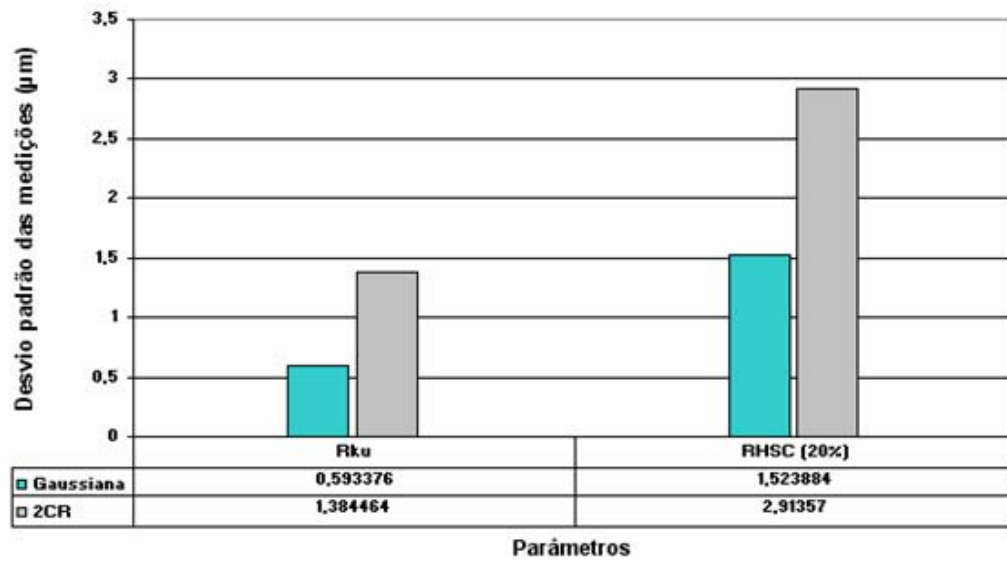


Figura 5.5 - Variações do desvio padrão nos parâmetros de rugosidade ( $R_{ku}$ , RHSC 20%) com análise gaussiana e ISO 2CR.

Os parâmetros 2D, gerados dentro da área analisada com rugosidade tridimensional geraram o gráfico representado na Fig. 5.6.

Observa-se que houve uma tendência nas medições de forma, a característica da filtragem ISO 2CR gerou valores maiores.

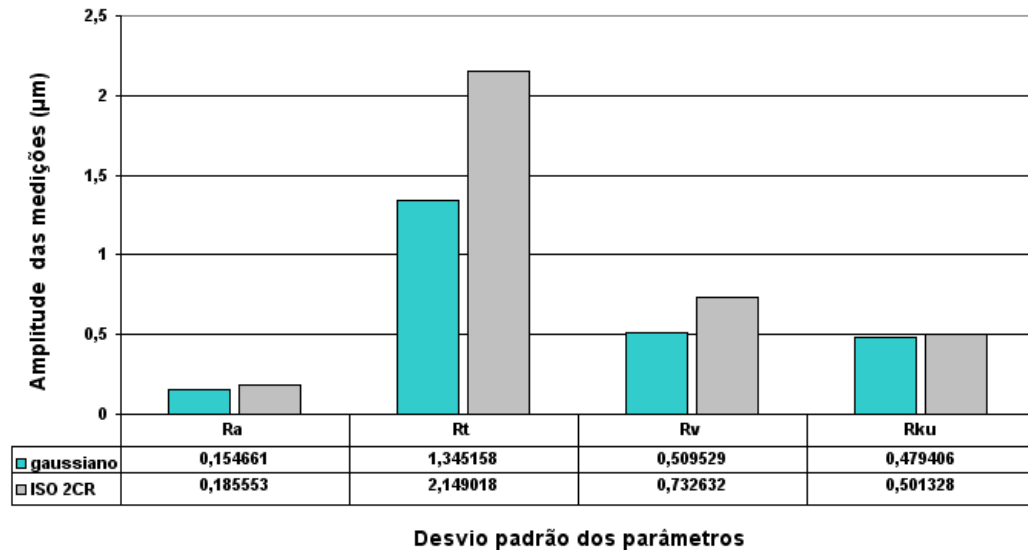


Figura 5.6 - Variações dos desvios padrão nos parâmetros de rugosidade 2D retirados de uma seção 3D com análise gaussiana e ISO 2CR.

### 5.1.3. Incerteza de medição

Com base nos desvios padrão de forma e rugosidade, além das demais grandezas de influência, as incertezas para cada parâmetro medido foram determinadas. A Fig. 5.7 representa todas as incertezas da cilindricidade encontradas nas medições de forma ao longo das faixas de filtragem.

Observa-se que houve uma tendência da incerteza de cilindricidade, a característica da filtragem ISO 2CR gerou incertezas maiores. Nos valores de medição.

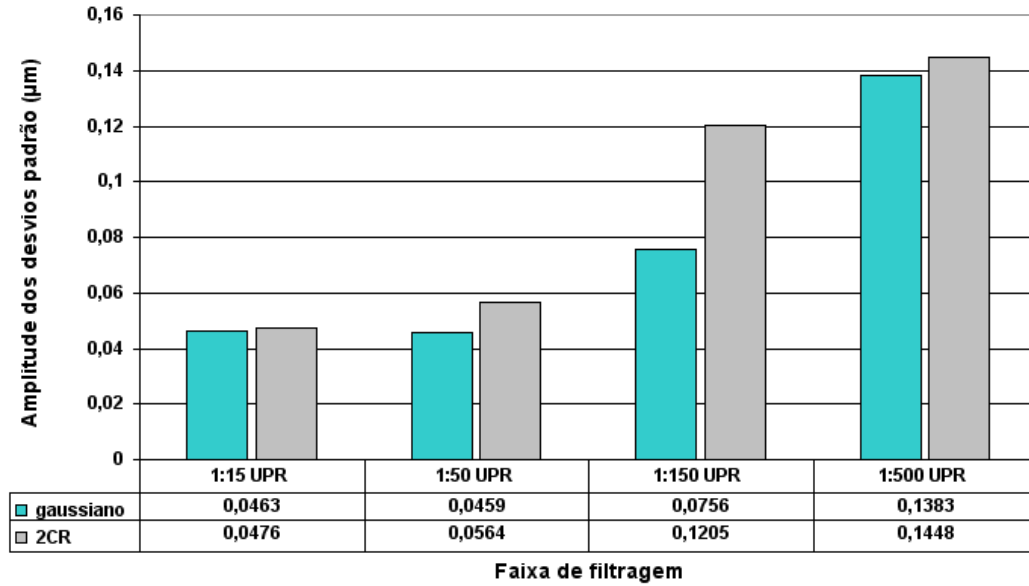


Figura 5.7 - Incertezas encontradas nas medições de cilindricidade com filtragem gaussiana e ISO 2CR.

A Fig. 5.8 representa as incertezas encontradas nas medições de circularidade ao longo das faixas de filtragem. Observa-se que houve uma tendência da incerteza de circularidade, a característica da filtragem ISO 2CR gerou incertezas maiores. Nos valores de medição.

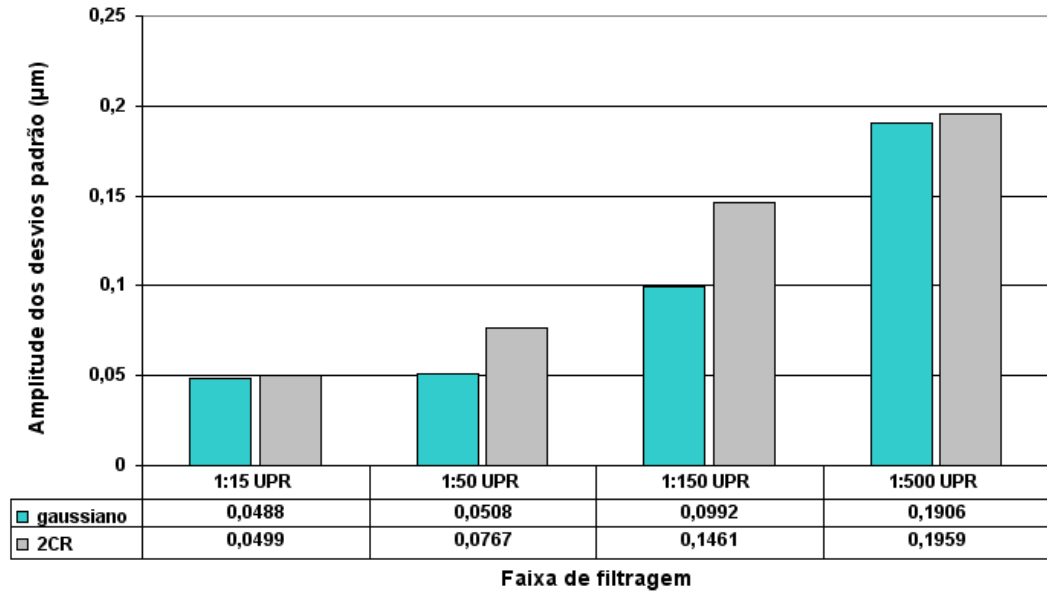


Figura 5.8 - Incertezas encontradas nas medições de circularidade com filtragem gaussiana e ISO 2CR.

A Fig. 5.9 representa as incertezas encontradas na retitude e paralelismo ao longo do diâmetro medido. Observam-se maiores valores para filtragem ISO 2CR.

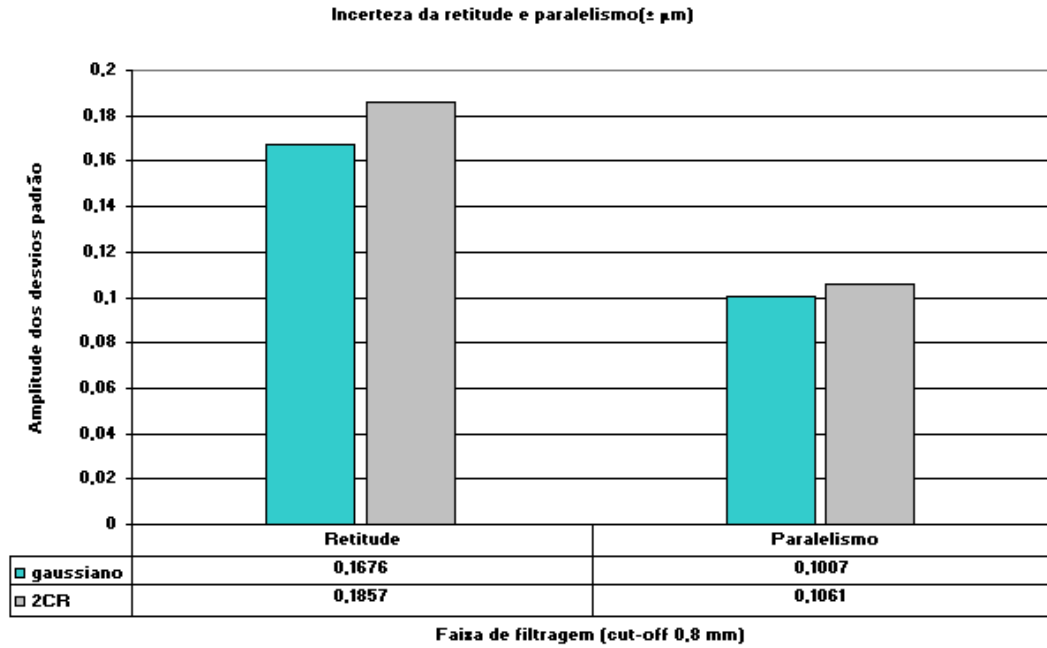


Figura 5.9 - Incertezas encontradas nas medições de retitude e paralelismo com filtragem gaussiana e ISO 2CR.

A Fig. 5.10 representa as incertezas encontradas na rugosidade da superfície com filtragem gaussiana e ISO 2CR. Observa-se que o  $R_v$  e o  $W_a$  possuem valores de medição maiores com filtragem gaussiana.

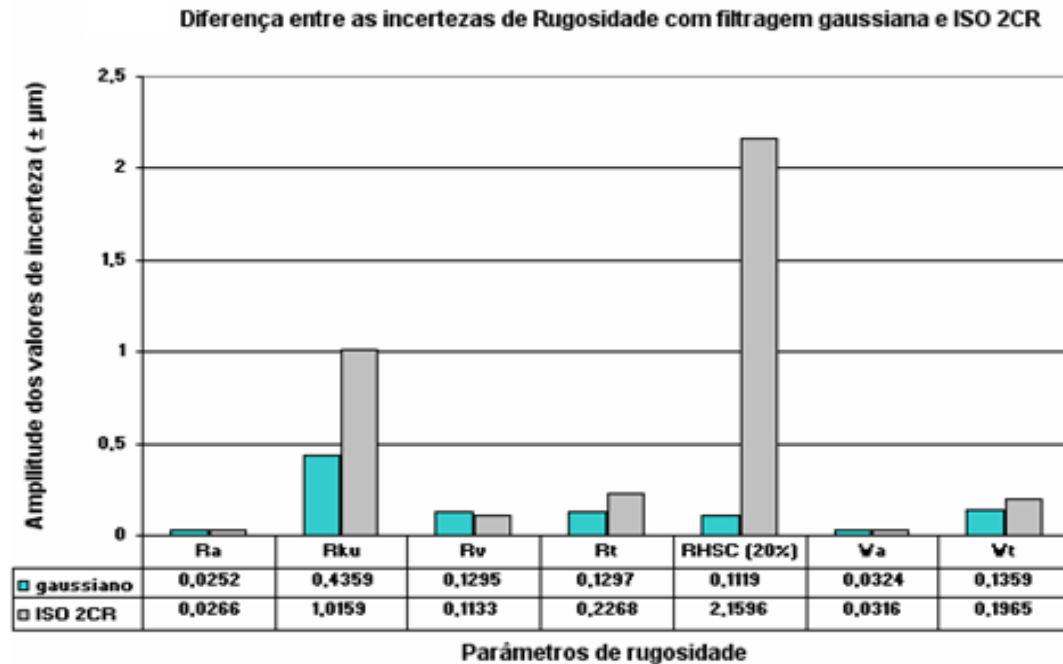


Figura 5.10 - Incertezas encontradas nas medições de rugosidade 2D com filtragem gaussiana e ISO 2CR.

As incertezas da rugosidade 3D não foram representadas em forma de gráfico comparativo, pois não existe análise com filtragem gaussiana e nem ISO 2CR em parâmetros 3D.

## 5.2. DISCURSSÕES SOBRE AS MEDIÇÕES DE FORMA

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, 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 5.11, 5.12 mostram como o filtro ISO 2CR atua no perfil, o aumento da quantidade de harmônicas utilizadas aumenta a sensibilidade da análise.

As Figuras 5.13 e 5.14 mostram o efeito do filtro gaussiano no mesmo perfil. De maneira similar, o aumento da quantidade de harmônicas utilizadas aumenta a sensibilidade da análise.

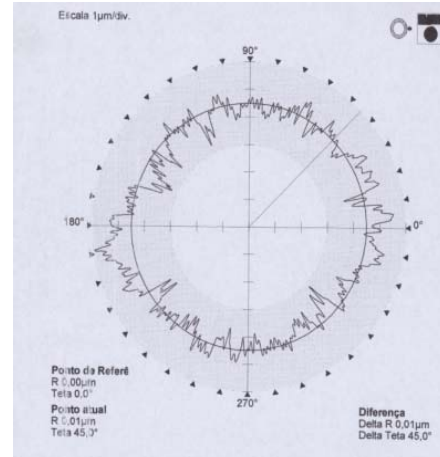
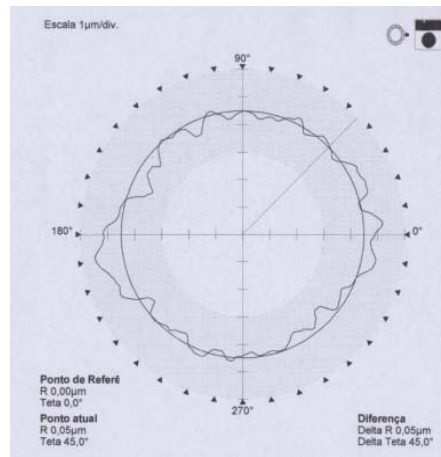


Figura 5.11: Análise 1:15 (UPR) com filtro 2CR

Figura 5.12: Análise 1:150 (UPR) com filtro 2CR

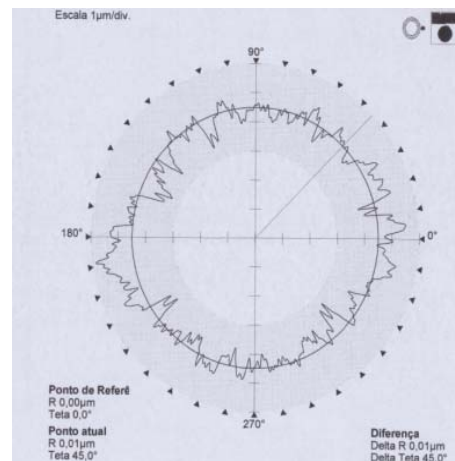
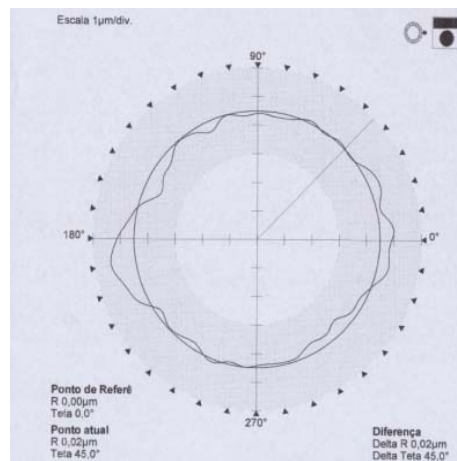


Figura 5.13: Análise 1:15 (UPR) com filtro gaussiano

Figura 5.14: Análise 1:150 (UPR) com filtro gaussiano

Como visto anteriormente, o filtro gaussiano corta em 50% a amplitude dos picos, enquanto o filtro ISO 2CR corta a amplitude em 75%, isto faz com que o filtro gaussiano seja mais estável.

O filtro gaussiano se comporta como uma função interpoladora. 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.

### 5.3. DISCUSSÕES SOBRE OS RESULTADOS DE TEXTURA SUPERFICIAL

Os parâmetros  $R_a$ ,  $R_v$  e  $W_a$  com análise 2D tiveram os maiores desvios padrão com análise gaussiana. Isso foi devido à posição da linha média ao longo do perfil.

A posição desta linha está ligada ao processo de filtragem da textura na superfície. Este processo acontece em cinco estágios:

#### 1º Estágio

Uma linha média é ajustada aos dados do perfil primário. Essa linha é determinada aplicando-se um filtro, cujo comprimento de corte é selecionado adequadamente para a análise. A Fig. 5.15 mostra este primeiro estágio.

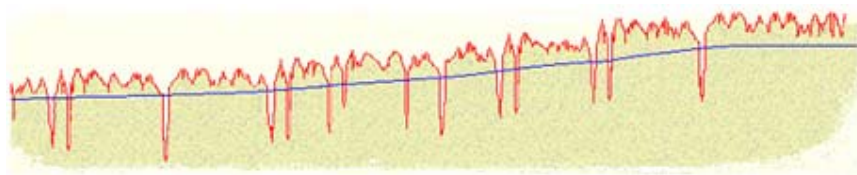


Figura 5.15 - Primeiro ajuste da linha média sobre a superfície medida.

## 2º Estágio

As partes de vales do perfil que ficam abaixo desta linha são removidas as discontinuidades que são criadas nos dados do perfil são preenchidas ao longo da curva da linha média. A Fig. 5.16 representa o novo perfil após o segundo ajuste e criado um novo perfil a partir do primeiro.

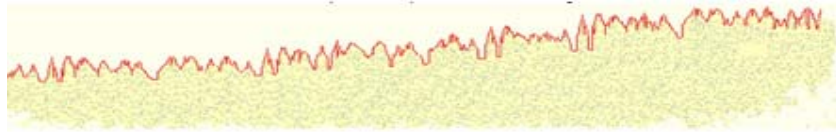


Figura 5.16 - Segundo ajuste: Os vales profundos são retirados e preenchidos.

## 3º Estágio

O mesmo filtro é novamente aplicado aos dados de perfil restantes, a nova linha média obtida é a linha de referência com relação à qual as avaliações dos parâmetros serão executadas. A Fig. 5.17 mostra o terceiro ajuste.

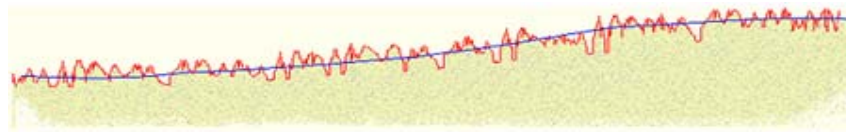


Figura 5.17 - Terceiro ajuste da linha média sobre a superfície medida.

## 4º Estágio

A nova linha média de referência é transferida para o perfil primário original, a Fig. 5.18 mostra o novo perfil filtrado.

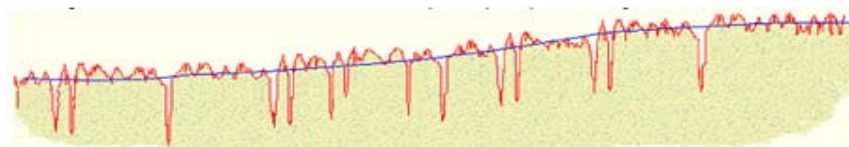


Figura 5.18 - Quarto ajuste, nova linha média sobre a superfície do perfil primário.

## 5º Estágio

O perfil de rugosidade é obtido a partir da diferença entre o perfil primário e a linha de referência. A Fig. 5.19 mostra o perfil de rugosidade filtrado.

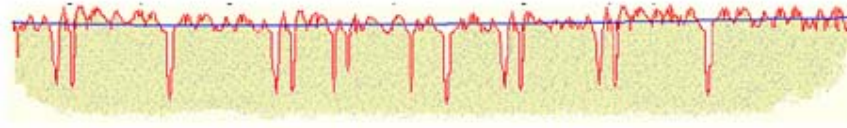


Figura 5.19 - Quinto ajuste, perfil de rugosidade filtrado em relação ao perfil primário.

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 o filtragem gaussiana, o filtro gaussiano arredondará os picos minimizando-os na análise.

Isso se aplica em todos os parâmetros de pico, principalmente em uma contagem de picos (RHSC) e ( $R_{ku}$ ).

Os parâmetros  $R_a$  e  $W_a$  tiveram valores ligeiramente maiores com filtragem gaussiana em relação à filtragem ISO 2CR. Já o parâmetro  $R_v$  teve uma diferença mais significativa.

As diferenças encontradas são explicadas pelos seguintes motivos:

- ✓ O comprimento analisado com um filtro em relação a outro é diferente.
- ✓ A quantidade de *cut-offs* úteis não são os mesmos.
- ✓ A posição da linha de referência ( $L_s$ ) não é a mesma para as duas filtragens.
- ✓ O filtro gaussiano tem uma taxa de transmissão de 50% enquanto o filtro ISO 2CR tem uma de 75%.
- ✓ A amplitude dos vales é pouco influencia.

A maior diferença encontrada nos parâmetros de vale pode ser visualizada nas Figuras 5.20 e 5.21.

A Fig. 5.20 representa um perfil analisado com filtragem gaussiana, observa-se que os vales do perfil são muito acentuados em relação ao perfil filtrado com ISO 2CR, a massa de material acima da linha média e maior em relação à massa de material da Fig. 5.21.

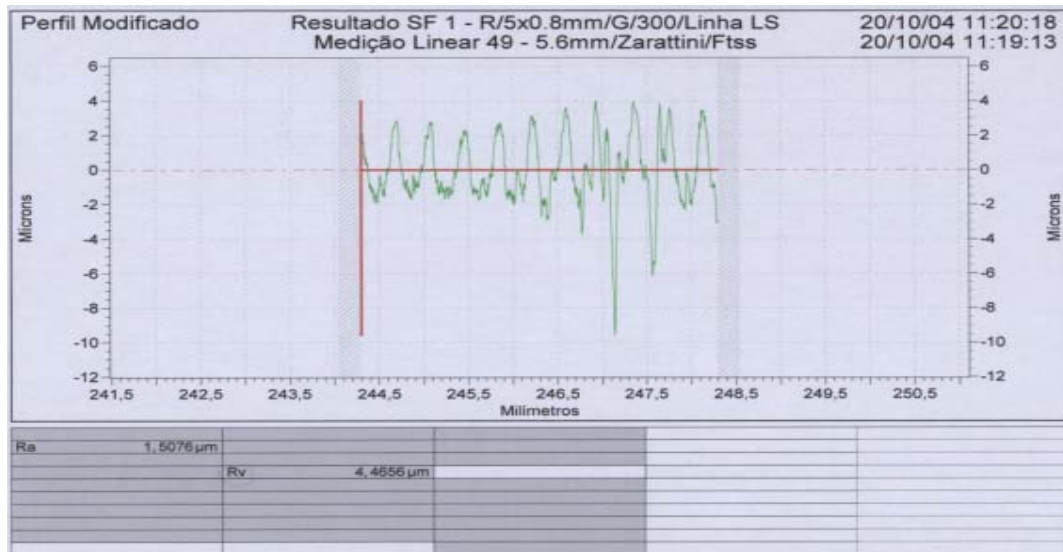


Figura 5.20 - Análise com filtragem gaussiana em perfil de rugosidade.

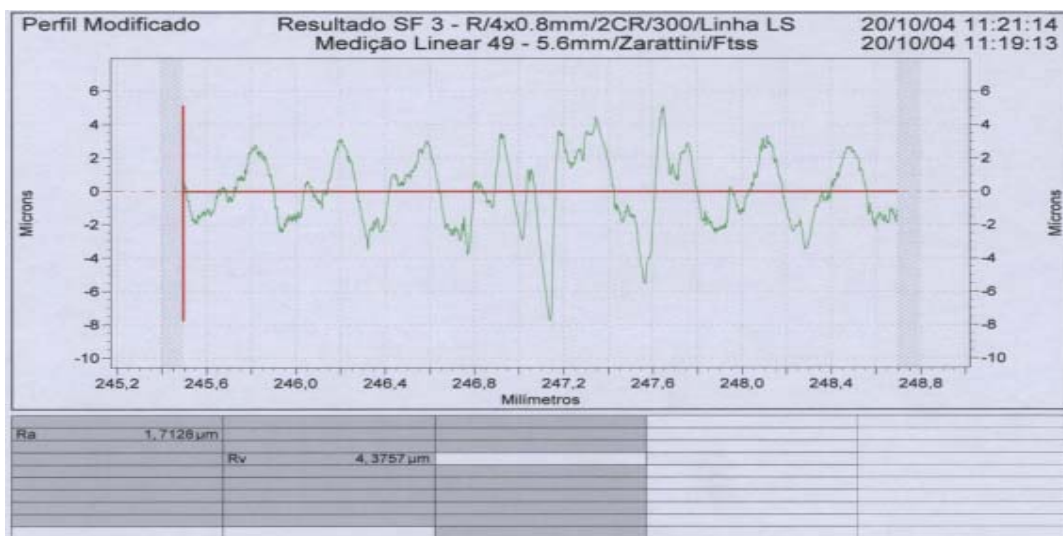


Figura 5.21 - Análise com filtragem ISO 2CR em perfil de rugosidade.

A Fig. 5.22 representa à mesma situação das figuras mostradas anteriormente, porém numa análise simultânea de um mesmo perfil. Pode ser observado mais uma vez que o comprimento de análise é diferente e a quantidade de *cut-offs* não é a mesma.

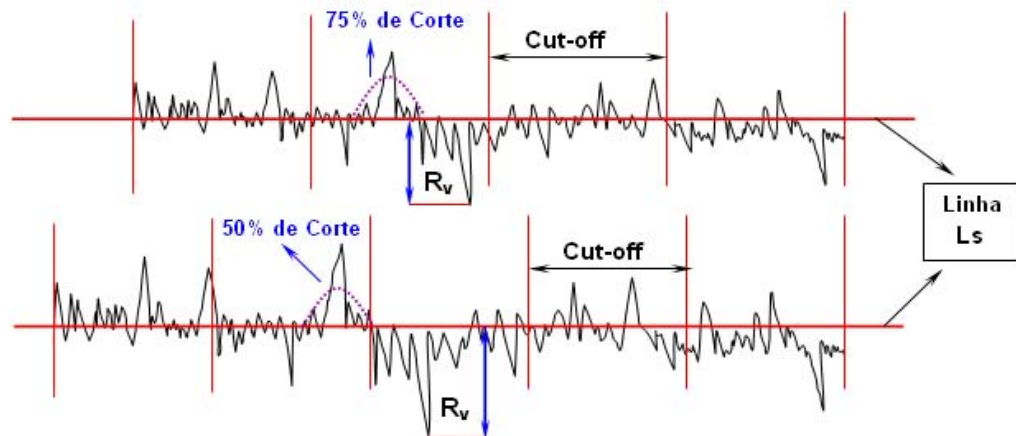


Figura 5.22 - Análise com filtragem gaussiana e ISO 2CR em perfil de rugosidade.

Devido a esta característica da linha média não esta simetricamente dividida ao longo do perfil, parâmetros médios podem ter valores maiores com filtragem gaussiana, iguais ou até mesmo menores vai depender do perfil primário.

Já parâmetros de vales, sempre vão apresentar valores maiores com filtragem gaussiana. O mesmo não se repetiu com todos estes parâmetros na análise 3D. Como pode ser observado os desvios padrão analisados com filtragem gaussiana são menores comparados com a ISO 2CR com as exceções dos parâmetros  $R_v$  e  $R_{ku}$  em análise 2D. Neste caso, esporadicamente o parâmetro  $R_{ku}$  obteve um valor ligeiramente maior com filtragem gaussiana, caso que não aconteceu quando a análise foi feita diretamente com análise 2D. Essa diferença se deu devido à natureza da análise, os gráficos da Fig. 5.6 foram obtidas através de uma análise 3D, onde a forma de medição foi por escaneamento a *laser*. Isso demonstra que a medição a *laser* é menos sensível para a captação de achatamentos de picos em relação à apalpagem mecânica.

## Capítulo 6

### CONCLUSÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões baseadas nos resultados dos ensaios realizados.

#### 6.1. CONCLUSÕES SOBRE AS MEDIÇÕES DE FORMA

Dependendo do tipo de aplicação da superfície usinada 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.

Um exemplo seria a análise do perfil de uma pista de rolamentos, onde o erro de circularidade associada com a vibração que foi transferida para o produto no processo de usinagem, pode comprometer a qualidade e a vida útil do mesmo.

Neste caso específico um filtro ISO 2CR associado com uma frequência de 1:500 ou 15:500 UPR seria mais eficiente do que um filtro gaussiano atuando na mesma frequência, pois o filtro ISO 2CR é mais sensível as imperfeições das superfícies.

O mesmo caso se aplica em uma peça onde não é exigida tanta precisão e se faz uma análise com filtragem ISO 2CR com uma frequência 1:500 UPR. O tipo de análise vai mostrar características que são dispensáveis à aplicação deste produto.

## 6.2. CONCLUSÕES SOBRE AS MEDIÇÕES DE RUGOSIDADE

A textura superficial (rugosidade) está diretamente relacionada ao atrito nas superfícies ou na capacidade efetiva de lubrificação.

Alguns parâmetros nem sempre representam com fidelidade a superfície medida, os parâmetros médios tem esta característica.

A quantidade de *cut-offs* não são os mesmos para filtragem ISO 2CR e gaussiana, com isso os valores de medição também não são os mesmos.

Todos os parâmetros de rugosidade 2D relacionados a vale apresentaram valores maiores quando analisados com filtro gaussiano em comparação com filtro ISO 2CR.

Em contrapartida, os parâmetros de pico apresentaram valores menores quando analisados com filtragem gaussiana e comparados com filtragem ISO 2CR.

Em análises de rugosidade relacionadas à retenção de fluido, o filtro gaussiano representará melhor as características dos vales que estão contidos na superfície, enquanto a filtragem ISO 2CR representaria melhor os picos.

Na análise das incertezas, a filtragem estatística apresentou valores menores do que a filtragem eletrônica, salvo os casos de parâmetros associados a vales.

Quanto à medição 3D ela mostrou ser muito mais estável que a 2D, devido análise ser feita sobre uma área da superfície.

Os parâmetros 3D são associados ao desvio padrão encontrado entre picos e vales ao longo da área medida. O plano médio é originado em 50% do valor do desvio padrão máximo encontrado ao longo da área mensurada.

A incerteza na medição 3D se mostrou maior do que a 2D, mas este fato é devido a forma da medição, enquanto a rugosidade 2D analisa um perfil isoladamente, a medição 3D analisa toda a área onde aquele perfil se encontra.

Uma outra situação é quanto ao tempo de análise, a medição 3D pode ser extremamente demorada, pois ela depende do valor passo selecionado, quanto menor o passo maior é o tempo da análise da superfície.

### **6.3. TRABALHOS FUTUROS**

Investigar o efeito da forma e da textura superficial em componentes que trabalham em movimento de rotação ou em movimento relativo e que necessitam de filme de lubrificação

Observar como o erro de forma e a textura superficial se interage à medida que a velocidade de trabalho aumenta.

Um exemplo de aplicação seria um eixo que possui uma folga entre seu acoplamento de 10  $\mu\text{m}$  e possui um erro de circularidade de 7  $\mu\text{m}$  e textura de 0,9  $\mu\text{m}$  ( $R_a$ ) e trabalha a 4.500 rpm. Como esses desvios dimensionais irão se comportar funcionando a 12.000 rpm?

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Dong, W. P. Sullivan, P. J, Stout, K.J, 1992 “Comprehensive study of parameters for characterizing three-dimensional surface topography”, Wear 159 pág. 161 - 171.

Dong, W. P. Sullivan, P. J, Stout, K.J, 1993 “Comprehensive study of parameters for characterizing three-dimensional surface topography”, Wear 167 pág. 9 - 21.

Dong, W. P. Sullivan, P. J, Stout, K.J, 1994 “Comprehensive study of parameters for characterizing three-dimensional surface topography”, Wear 178 pág. 29 - 43.

Dong, W. P. Sullivan, P. J., Stout, K.J, 1994 “Comprehensive study of parameters for characterizing three-dimensional surface topography”, Wear 178 pág. 45 - 60.

DIN EN ISO 4287 – “Geometrical Product Specifications” (GPS).

DIN 4768; 1990 – “Determination of Values of Surface Roughness Parameters”.

Gonçalves, Armando Albertazzi JR, 2001, “Apostila de Metrologia” - parte I, Labmetro - UFSC.

Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial, 1995. “Vocabulário Internacional de termos fundamentais e gerais de Metrologia” (VIM), Duque de Caxias: INMETRO.

ISO 1101:1983 - “Technical drawings -Geometrical tolerancing - Tolerancing of form, orientation, location and run-out -Generalities, definitions, symbols, indications on drawings (ISO Book) “.

ISO 1302: 1997 – “Esboço indicativo de textura de superfície”.

ISO 11562: 1996 – “Características metrológicas de filtros de correção de fase”.

ISO 12085: 1996 – “Parâmetros de motivo”.

ISO 13565: 1996 – “Superfícies com Propriedades Funcionais Estratificadas”.

ISO 3274: 1996 - Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface Texture: Profile Method - Nominal Characteristics.

ISO 4287: 1997 - “Termos, Definições e Parâmetros de Textura de Superfície”.

ISO 4288:1996 - “Regras e procedimentos para avaliar a textura da superfície”.

ISO 5725 – “Precision of Test Methods” – Determination of Repeatability and Reproducibility by Interlaboratory Test.

Quiliti, Valter, 2003, “Apostila de incerteza de medição” – parte 2.

Souza, C.L, 2001.”Apostila expressão da incerteza de medição”, Rio de Janeiro: IQM, 52p (ver 12).

Taylor Hobson Precision, 2000 - “Guide to Surface Texture Parameters”.

Thomas, T. R. 1982. “Rough Surface”, Longmans Green, London

Whitehouse David J., 1994 “Handbook of Surface Metrology”, Leicester - England.

Whitehouse David J., Archard, J. F. 1970 “The properties of random surfaces of significance in their contact”, Proc. R. Soc. London, Ser. A, 316. 97-121.

Witte, R.S, 2001, “Statistics”. 6. Ed... Orlando: Harcourt.

Xavier, Rodolfo. W., 2000. S. “Caracterização Estatística da topografia de superfícies modificadas contendo óxidos”, artigo, p 3 a 8, Uberlândia – Brasil.

## **ANEXOS**

## ANEXO I

Tabela t de *Student* e graus de liberdade efetivos (fator de abrangência k)

Graus de Liberdade	Probabilidade P (%)				
	<b>68,27</b>	<b>90</b>	<b>95</b>	<b>95,45</b>	<b>99</b>
1	1,84	6,31	12,71	13,97	63,66
2	1,32	2,92	4,30	4,53	9,92
3	1,20	2,35	3,18	3,31	5,84
4	1,14	2,13	2,78	2,87	4,60
5	1,11	2,02	2,57	2,65	4,03
6	1,09	1,94	2,45	2,52	3,71
7	1,08	1,89	2,39	2,43	3,50
8	1,07	1,86	2,31	2,37	3,36
9	1,06	1,83	2,26	2,32	3,25
10	1,05	1,81	2,23	2,28	3,17
11	1,05	1,80	2,20	2,25	3,11
12	1,04	1,78	2,18	2,23	3,05
13	1,04	1,77	2,16	2,21	3,01
14	1,03	1,76	2,14	2,20	2,98
15	1,03	1,75	2,13	2,18	2,95
16	1,03	1,75	2,12	2,17	2,92
17	1,03	1,74	2,11	2,16	2,90
18	1,03	1,73	2,10	2,15	2,88
19	1,03	1,73	2,09	2,14	2,86
20	1,03	1,72	2,09	2,13	2,85
25	1,02	1,71	2,06	2,11	2,79
30	1,02	1,70	2,04	2,09	2,75
35	1,01	1,70	2,03	2,07	2,72
40	1,01	1,68	2,02	2,06	2,70
45	1,01	1,68	2,01	2,06	2,69
50	1,01	1,68	2,01	2,05	2,68
100	1,005	1,66	1,984	2,025	2,626
$\infty$	1,000	1,645	1,960	2,00	2,576

## ANEXO II

Tabela de Dixon


Valores Críticos			
H	5%	H	5%
3	0,970	22	0,468
4	0,829	23	0,459
5	0,710	24	0,451
6	0,628	25	0,444
7	0,569	26	0,436
8	0,608	27	0,429
9	0,504	28	0,423
10	0,530	29	0,417
11	0,502	30	0,412
12	0,479	31	0,407
13	0,611	32	0,402
14	0,586	33	0,397
15	0,565	34	0,393
16	0,546	35	0,388
17	0,529	36	0,384
18	0,514	37	0,381
19	0,501	38	0,377
20	0,489	39	0,374
21	0,488	40	0,371

Quantidade de repetições	$Z_n$ (suspeito)	$Z_n$ (suspeito)
$3 \leq n \leq 7$	$\frac{Z_n - Z_{n-1}}{Z_n - Z_1}$	$\frac{Z_2 - Z_1}{Z_n - Z_1}$
$8 \leq n \leq 12$	$\frac{Z_n - Z_{n-1}}{Z_n - Z_2}$	$\frac{Z_2 - Z_1}{Z_{n-1} - Z_1}$
$13 \leq n$	$\frac{Z_n - Z_{n-2}}{Z_n - Z_3}$	$\frac{Z_3 - Z_1}{Z_{n-2} - Z_1}$

Fonte: ISO 5725 – Precision of Test methods – Determination of Repeatability and Reproducibility by Interlaboratory Test.

## ANEXO III


## Certificado de calibração do rugosímetro 3D


<b>CARY</b>		
SWISS		
LABORATOIRE D'ÉTALONNAGE ACCRÉDITÉ PAR L'OFFICE FÉDÉRAL DE MÉTROLOGIE VOM EIDGENÖSSISCHEN AMT FÜR MESSWESEN AKKREDITIERTE KALIBRIERSTELLE CALIBRATION LABORATORY ACCREDITED BY THE SWISS FEDERAL OFFICE OF METROLOGY		
N° du certificat Zertifikat Nr. Certificate No.	14908.01129	
Page Seite	1 de/2 von 2	
<b>CERTIFICAT D'ÉTALONNAGE KALIBRIER-ZERTIFIKAT CALIBRATION CERTIFICATE</b>		
	S SERVICE SUISSE D'ÉTALONNAGE	S N° d'accréditation
	S SCHWEIZERISCHER KALIBRIERDIENST	C Akkreditierungs-Nr. <b>SCS 001</b>
	S SWISS CALIBRATION SERVICE	S Accreditation No.
	S SERVIZIO DI TARATURA IN SVIZZERA	
<b>Cales étalons / Parallelendmasse / Slip gauges</b>		
Jeu Satz Nr./No Set	Classe 0 Klasse Grade	Matière Acier Werkstoff Material
Coefficient de dilatation Wärmeausdehnungskoeffizient Heat expansion coefficient	Acier Stahl Steel $(11,5 \pm 1) \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	Carbure de tungstène Wolframborbid Tungsten carbide $(4,5 \pm 0,5) \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Incertitude de mesure Messunsicherheit Uncertainty of measurement	$\pm (0.05 + 0.5 \cdot L) \mu\text{m}$ L en m	Niveau de confiance Vertrauensbereich Confidence Probability 95%
Humidité relative Relative Luftfeuchtigkeit Relative humidity	50% $\pm$ 5%	Température de référence Referenztemperatur Reference temperature 20° C $\pm$ 0,1 K
Ce certificat d'étalonnage confirme le raccordement aux étalons nationaux qui réalisent les grandeurs physiques (SI). Dieses Kalibrierzertifikat dokumentiert die Rückführbarkeit auf nationale Normale zur Darstellung der physikalischen Einheiten (SI). This calibration certificate documents the traceability to national standards, which realize the physical units of measurements (SI).		
Les résultats de mesure sont donnés aux pages suivantes et font partie du certificat. Messresultate sind auf den folgenden Seiten aufgeführt und sind Teil des Zertifikates. The measurements are given on the following pages and are part of the certificate.		
Délivré à Ausgestellt an Delivered to	DIGITAL SURF	No cde: Bestell-Nr.: Order No: 100940
Date Datum Date	29 janvier 2001	Chef du laboratoire Leiter der Kalibrierstelle Chief inspector <i>R. BERSOT</i>
CARY-Division de NIVAROX-FAR - P.O. Box - CH-2400 Le Locle Switzerland Tél. 039 334 334 - Fax 039 334 444		
A Company of <b>SMH</b>		

## Anexo IV

## Certificado de calibração cilindro padrão para análise de forma

id.: 61252

<b>CERTIFICATE OF CALIBRATION</b>		 <b>NAMAS</b> CALIBRATION No. 0026	
ISSUED BY Taylor Hobson Calibration Laboratory			
DATE OF ISSUE	13 November 1997		SERIAL NUMBER



Taylor Hobson Limited  
 PO Box 36  
 2 New Star Road  
 Leicester LE4 9JQ  
  
 Tel: 0116 2763771  
 Fax: 0116 2463058  
 E-Mail: 106002.541@compuserve.com

PAGE 1 OF 3 PAGES  
 APPROVED SIGNATORY  
**P J KILBANE**

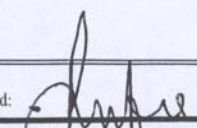
cod. 4123111004

Description:	Steel Calibration Cylinder (300mm)
Code Number:	112/1888
Serial Number:	R502
Manufactured by:	Taylor Hobson Ltd
Calibrated for:	Fiat Automoteis S/A Rod. Fernao Das, Km 429 Betim-MG Brazil
Customer Order Number:	122/7729
Taylor Hobson Order Number:	C122845

The above calibration has been carried out in the Taylor Hobson NAMAS Accredited laboratory, which is maintained at a nominal temperature of 20°C.  
 The mean temperature at which the calibration was made is recorded below, and monitored as not varying by more than 1°C per hour.

The dates of calibration were the 12th & 13th November 1997

Previous Certificate Number:	Not applicable
Laboratory Observation Book:	R34/48
Calibration Temperature(s):	19.9°C to 20.5°C
Date Received into Laboratory:	10.11.97

The uncertainties are for a confidence probability of not less than 95% Certified: 

This certificate is issued in accordance with the requirements of the United Kingdom Accreditation Service as specified in the NAMAS Accreditation Standard and NAMAS Regulations. It provides traceability of measurement to recognised national standards, and to the units of measurement realised at the National Physical Laboratory or other recognised national standards laboratories. This certificate may not be reproduced other than in full, except with the prior written approval of the issuing laboratory.

## CERTIFICATE OF CALIBRATION

NAMAS ACCREDITED CALIBRATION LABORATORY No 0026

13 November 1997

SERIAL NUMBER

25804

PAGE 2 OF 3 PAGES

This cylinder has been calibrated with respect to traceable standards against Taylor Hobson NAMAS Laboratory Calibration Instruction No. 1104 .

Tabulated below are the measured values obtained , and a plot of the surface straightness of tracks 'A' and 'D' (identified on the calibration label) can be seen on page 3 of this certificate .

The surface texture value recorded was obtained from the mean of 5 random measurements made using a Form Talysurf system having a nominally 2  $\mu\text{m}$  stylus tip and a 0.8 mm 2CR cut-off filter , giving an uncertainty of  $\pm 0.01 \mu\text{m}$  .

The value recorded for departures from Least Squares roundness is the maximum of 3 measurements taken at the top , middle , and bottom of the 'working length of the central 280 mm' of the cylinder . They were made using a 50 undulations per revolution (UPR) filter with 2CR characteristics on a Talyrond 300 system giving an uncertainty of  $\pm 0.05 \mu\text{m}$  .

The recorded value for parallelism was obtained using the Talyrond 300 system and is the maximum of a single measurement made in the diametral direction of opposing idents . It was made using a 8.0 mm straightness cut-off filter giving an uncertainty of  $\pm 0.5 \mu\text{m}$  .

The recorded values for surface straightness were obtained using the mechanical reversal technique of error separation on a TalyCenta roundness/straightness measuring system giving an uncertainty of  $\pm 0.1 \mu\text{m}$  .

FEATURE	MEASURED VALUE
1. Surface Texture (Ra)	$< 0.1 \mu\text{m}$
2. Departure from LS roundness	$< 0.25 \mu\text{m}$
3. Cylinder Parallelism	$< 0.90 \mu\text{m}$
4. Surface Straightness Track 'A'	$< 0.40 \mu\text{m}$
Surface Straightness Track 'D'	$< 0.40 \mu\text{m}$


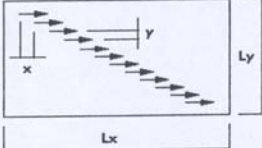

The uncertainties are for a confidence probability of not less than 95%

Certified: 

This certificate is issued in accordance with the requirements of the United Kingdom Accreditation Service as specified in the NAMAS Accreditation Standard and NAMAS Regulations. It provides traceability of measurement to recognised national standards, and to the units of measurement realised at the National Physical Laboratory or other recognised national standards laboratories. This certificate may not be reproduced other than in full, except with the prior written approval of the issuing laboratory.

## ANEXO V

## Certificado de calibração do padrão de rugosidade

 <b>FUNDAÇÃO</b> <b>CERTI</b> CMIP	Laboratório de <b>METROLOGIA DIMENSIONAL</b>
<h1>Certificado de Calibração</h1>	
Data da Emissão: 16/04/03 Data da Calibração: 16/04/03	<b>n. 1192/03</b>
Página 1 de 3	
<b>1. CONTRATANTE:</b> FA POWERTRAIN LTDA Avenida Contorno da FIAT, 3.455 - Galpão 9 - sala 13 - BETIM - MG	
<b>2. SOLICITANTE:</b> O mesmo	
<b>3. PADRÃO DE GEOMETRIA (CALBRADO):</b>	
Nº de Série:	6949
Nº de Identificação:	424111007
Tipo de Padrão:	Tipo C2 (ISO 5436-1)
Fabricante:	Mahr
ID 97563	
<b>4. PADRÃO UTILIZADO:</b>	
<b>4.1. Máquina de Rugosidade</b> Nº Registro (CERTI): RC 2754 U <sub>95</sub> : Ra, Rz e Rz1máx +/- 16%. RSm +/- 1,92 % Rastreabilidade: Certificado de Calibração CERTI 1283/03, de 14/04/03, válido até 10/03.	
<b>5. PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO:</b> PC-255, revisão 000 Os parâmetros de rugosidade estão definidos segundo norma ISO 4287 de 1997 e norma ISO 13565-2. Os filtros usados correspondem a norma ISO 3274 e ISO 13565-1. As medições foram executadas utilizando-se um apalpador de 2 µm, uma velocidade de medição de 0,5 mm/s e com uma força de medição de 1,5 mN. O padrão foi analisado utilizando um filtro cut-off (Lc) de 0,8 mm, com filtro de onda Gaussiano. Utilizou-se um comprimento avaliado de 4,8 mm que corresponde a um comprimento de 6 vezes o filtro de onda cut-off, sendo a metade do primeiro e a metade do último cut-off descartados.	
<b>5.1 Medição do Perfil de Rugosidade:</b> O padrão foi medido segundo instrução do PTB 5-AA 5.12-011. O plano de calibração se encontra na figura abaixo.	
	
<b>Observações:</b> Condições Ambientais Durante a Calibração: Temperatura Ambiente: (20,6 +/- 0,3) °C Umidade Relativa do Ar: (50 +/- 10) % A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k, o qual para uma distribuição t com graus de liberdade efetivos (v <sub>eff</sub> ) corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02 (1999). Os valores de k e v <sub>eff</sub> são apresentados na tabela de resultados.	
	
Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração, nas condições específicas, não sendo extensivo a quaisquer lotes. Esta calibração não isenta o instrumento do controle metrológico estabelecido na Regulamentação Metrológica. A CERTI autoriza a reprodução deste certificado, desde que qualquer cópia sempre apresente seu conteúdo integral.	
<b>Fundação Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras - CERTI</b>	
Campus da Universidade Federal de Santa Catarina FLORIANÓPOLIS - SC	Fundação CERTI Caixa Postal 5053 Florianópolis - SC 88040-970
Tel. +48 239 2121 Fax +48 239 2119 metrologia@certi.org.br www.certi.org.br	Fundação CERTI CGC 78.626.363/0001-24 Insc. Est. 251.378.241 Insc. Mun. 50.111-5



CMIP

Laboratório de  
METROLOGIA DIMENSIONAL

## Certificado de Calibração

Data da Emissão: 16/04/03  
Data da Calibração: 16/04/03

n. 1192/03

Página 2 de 3

A influência do sistema de medição bem como do ambiente ao redor da mesma foram determinadas utilizando-se um plano ótico de excelente qualidade e usando os mesmos parâmetros que foram aplicados ao padrão de rugosidade. Assim o Rz é de 0,0715718  $\mu\text{m}$ .

### 6. RESULTADOS:

#### 6.1 Medição dos Parâmetros de Rugosidade:

Parâmetro	SMC [ $\mu\text{m}$ ]	$U_{95}$ +/- [%]	k	$V_{eff}$
Ra	0,475	4,0	2,02	130
Rz	1,680	4,0	2,02	144
Rz1max	1,717	4,0	2,02	122
RSm	99,721	4,0	2,04	66

Parâmetro	Máximo [ $\mu\text{m}$ ]	Mínimo [ $\mu\text{m}$ ]	Desvio Padrão [ $\mu\text{m}$ ]
Ra	0,482	0,465	0,006
Rz	1,759	1,611	0,044
Rz1max	1,835	1,655	0,055
RSm	100,286	98,972	0,447

Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração, nas condições específicas, não sendo extensivo a quaisquer lotes. Esta calibração não isenta o instrumento do controle metrológico estabelecido na Regulamentação Metrológica. A CERTI autoriza a reprodução deste certificado, desde que qualquer cópia sempre apresente seu conteúdo integral.

### Fundação Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras - CERTI

Campus da  
Universidade Federal  
de Santa Catarina  
FLORIANÓPOLIS - SC

Fundação CERTI  
Caixa Postal 5053  
Florianópolis - SC  
88040-970

Tel. +48 239 2121  
Fax +48 239 2119  
metrologia@certi.org.br  
www.certi.org.br

Fundação CERTI  
CGC 78.626.363/0001-24  
Insc. Est. 251.378.241  
Insc. Mun. 50.111-5



CMIP

Laboratório de  
METROLOGIA DIMENSIONAL

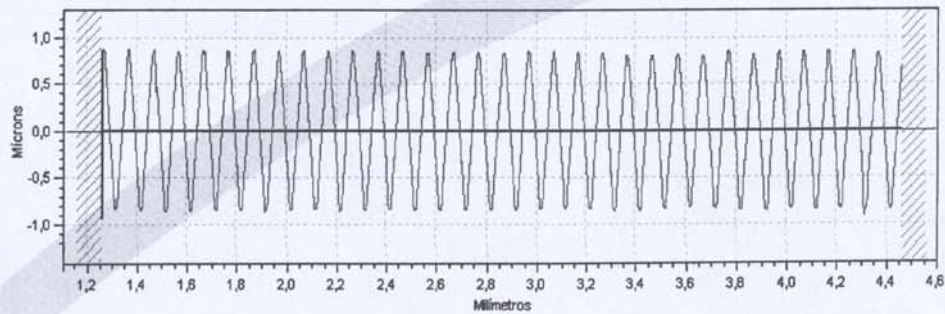
## Certificado de Calibração


Data da Emissão: 16/04/03  
Data da Calibração: 16/04/03

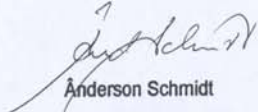
n. 1192/03

Página 3 de 3

### 7. Perfil de Rugosidade (Filtrado):



  
Clodoaldo Campos Marques  
Gerente Técnico Substituto

  
Anderson Schmidt  
Técnico Metrologista

Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração, nas condições específicas, não sendo extensivo a quaisquer lotes. Esta calibração não isenta o instrumento do controle metroológico estabelecido na Regulamentação Metroológica. A CERTI autoriza a reprodução deste certificado, desde que qualquer cópia sempre apresente seu conteúdo integral.

### Fundação Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras - CERTI

Campus da  
Universidade Federal  
de Santa Catarina  
FLORIANÓPOLIS - SC

Fundação CERTI  
Caixa Postal 5053  
Florianópolis - SC  
88040-970

Tel. +48 239 2121  
Fax +48 239 2119  
metrologia@certi.org.br  
www.certi.org.br

Fundação CERTI  
CGC 78.626.363/0001-24  
Insc. Est. 251.378.241  
Insc. Mun. 50.111-5