

## *Caracterização de superfícies: Topografia e rugosidade*

*L.A. Franco*

*(franco.la@usp.br)*

*março/2023*

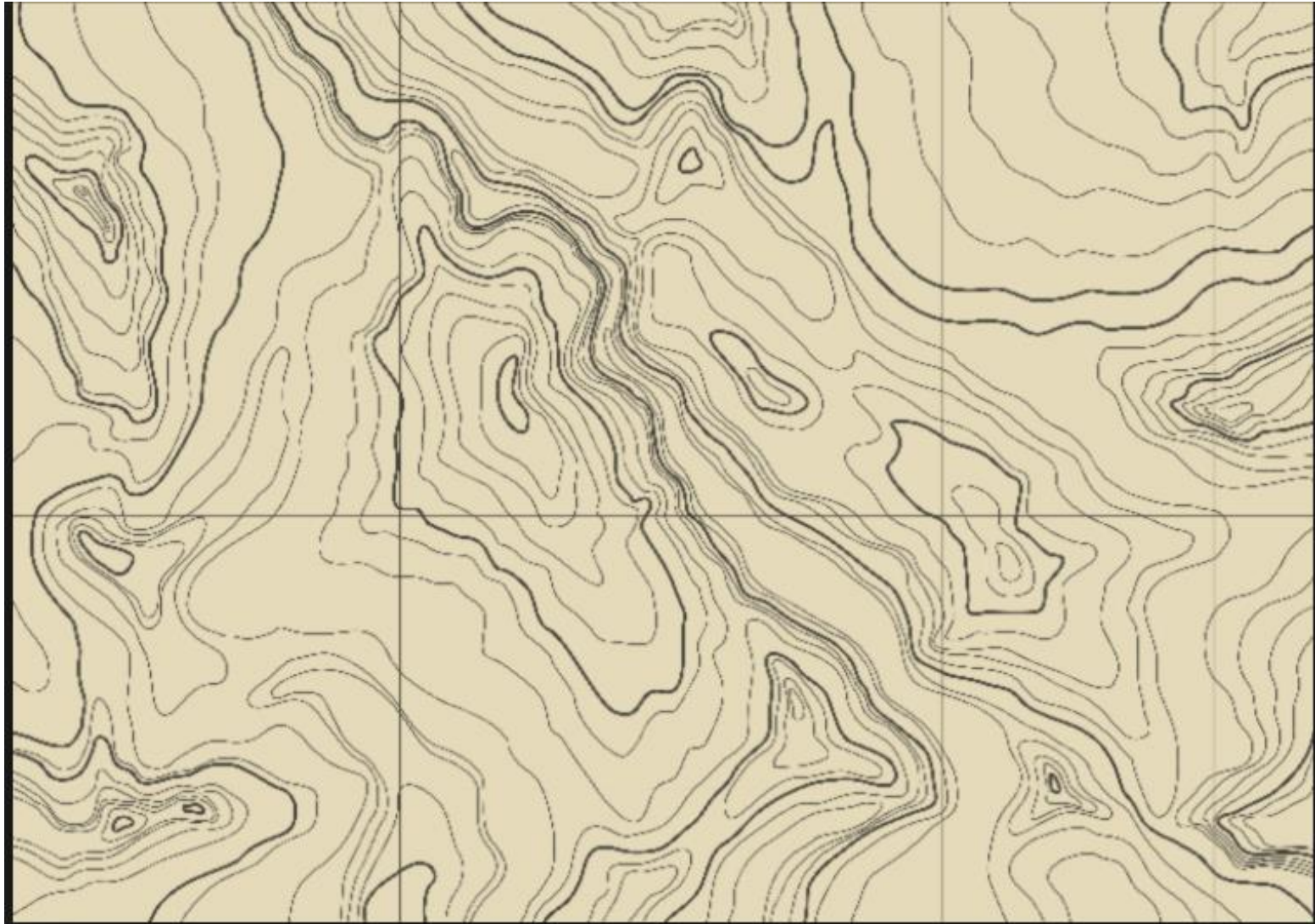
# Sumário

1. Visão geral – Importância da Topografia
2. O conceito de rugosidade
3. Medição e seus instrumentos
4. Referência para medições
5. Parâmetros padronizados
6. Curva de Abbott-Firestone
7. Parâmetros funcionais e de volume
8. Outros parâmetros padronizados
9. Abordagem topológica
10. Variação com escala
11. O perfil como sinal – Filtros
12. Registro de medição
13. Topografia x Processo/Desgaste

# VISÃO GERAL



# Topografia



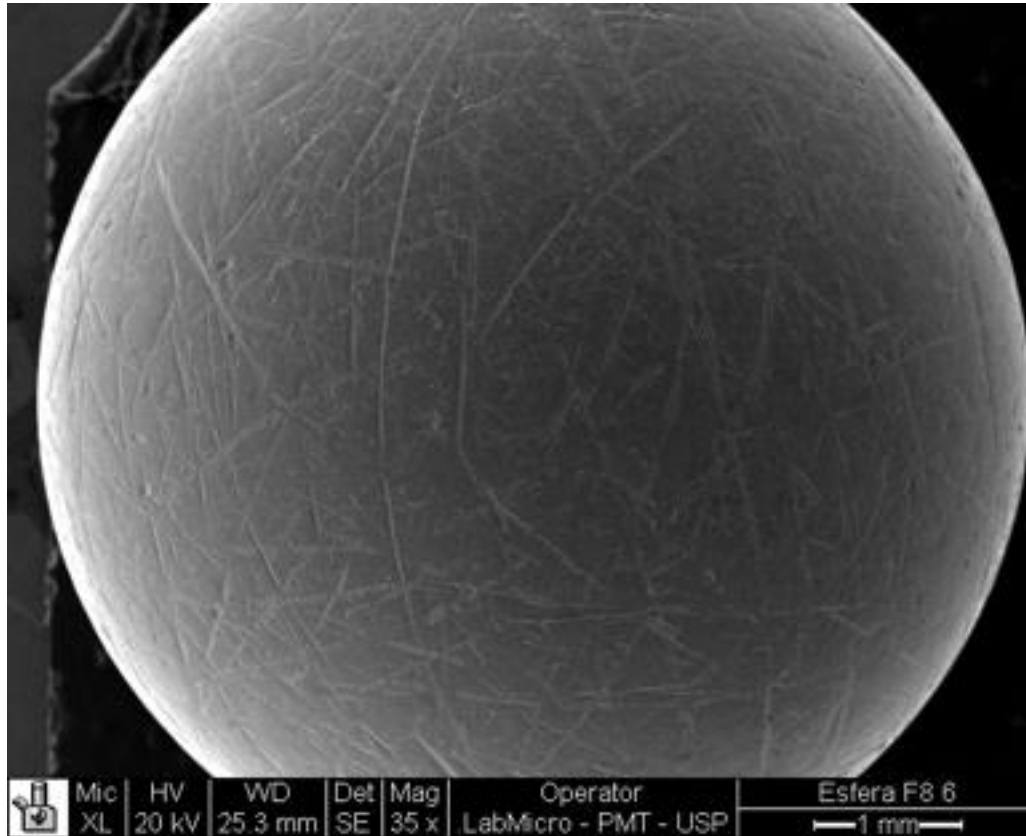
# Definição

*"Surface texture or surface topography is the local deviations of a surface from a perfectly flat plane."*

Pradeep L. Menezes

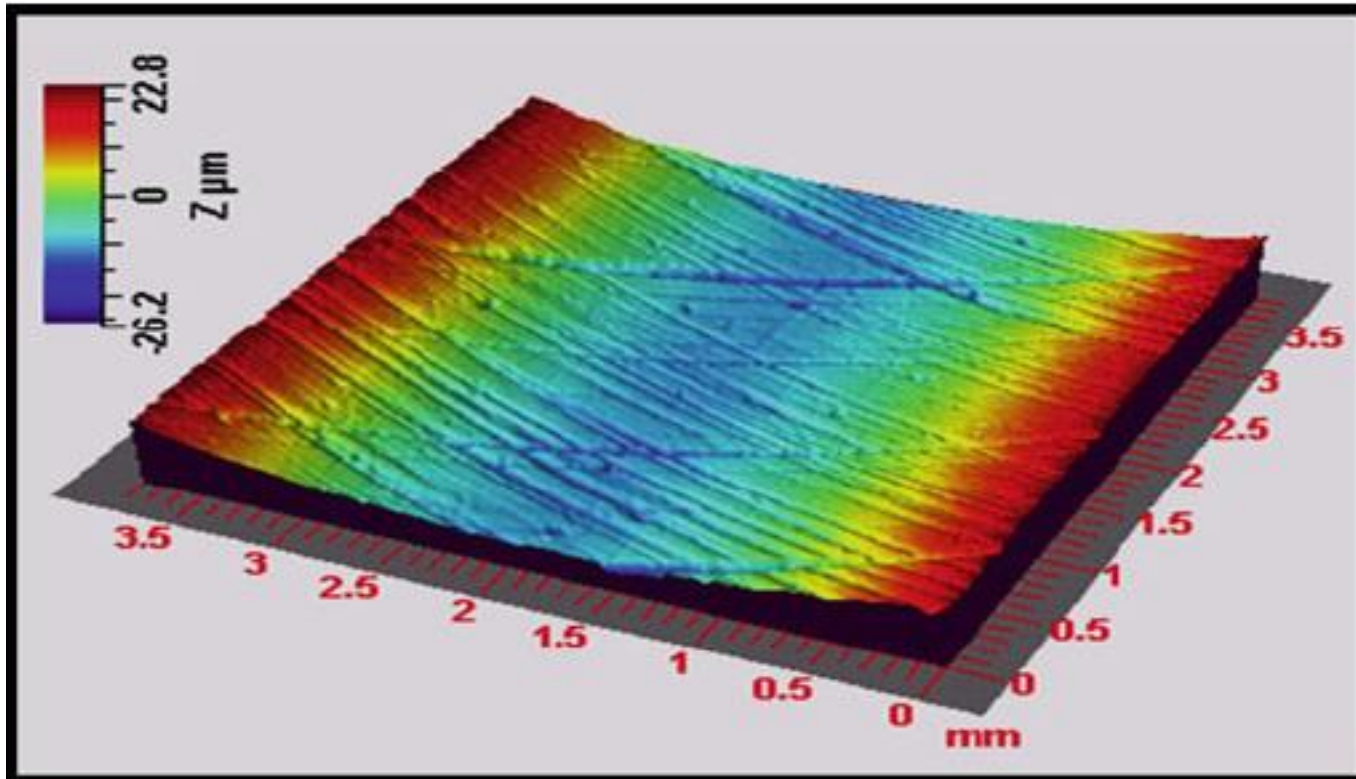
University of Nevada

# Superfície original esférica



Esfera de aço AISI 52100 revenido (340 HV) após 64.000 ciclos de ensaio de fadiga de contato de rolamento.

# Superfície original cilíndrica



©zah

Camisa de cilindro automotivo evidenciando o processo de brunimento.

# Topografia: definição expandida

Os desvios de uma superfície em relação a um plano perfeito, ou em relação a outra superfície de referência geometricamente definível, constituem a sua topografia.



# IMPORTÂNCIA DA TOPOGRAFIA

## CONTEXTO MAIS GERAL



# Nível de metros



©bmp

Rodovia

# Nível de centímetros



Aeroporto de Congonhas – São Paulo

# Nível de milímetros



©acn

Acne



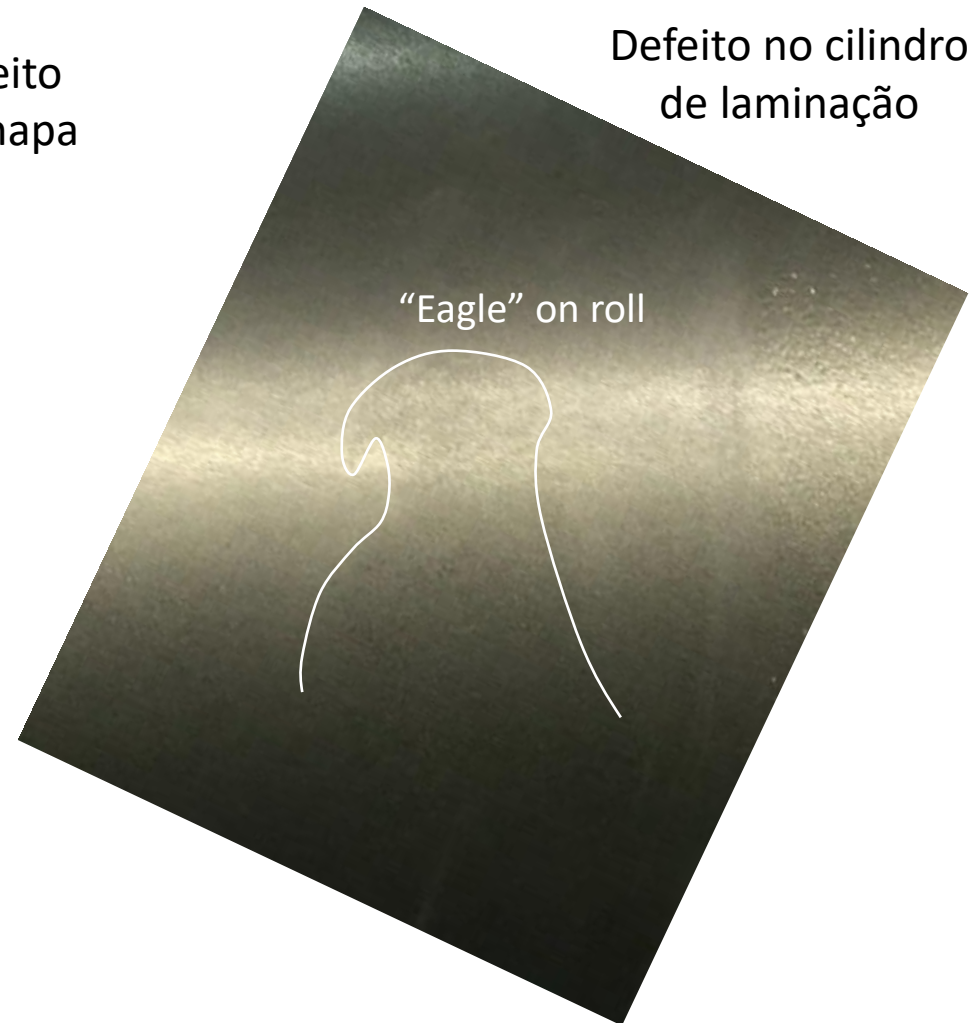
©cel

Celulite

# Nível de micrometros



Defeito na chapa



Defeito no cilindro de laminação

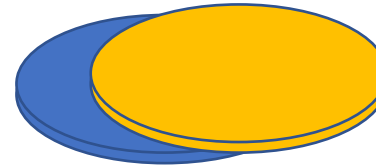
Topografia do cilindro transferida para a chapa

©mvl

# Nível de nanometros

## **Wafer bonding**

adesão com **rugosidade** ~ 1 nm



## **Nano acelerômetro**



**Rugosidade** baixa:  
posição estável c/ lâmina  
aderida, insensível



**Rugosidade** mais alta: menor  
energia de adesão, posição  
estável, sensível a acelerações

©per

# Importância para a vida humana



©gra

Emissão de Radônio depende da **rugosidade** do granito.

# Arqueologia

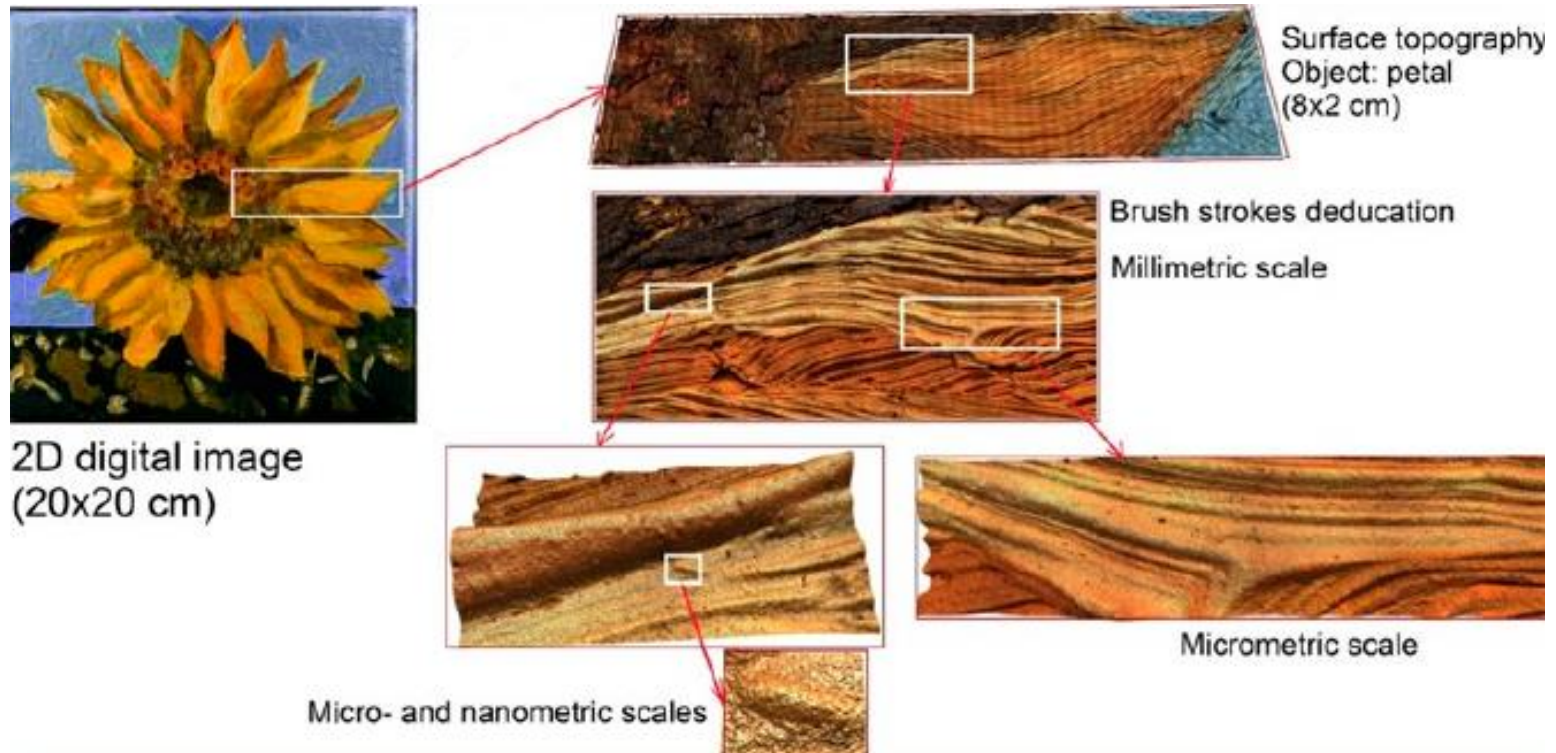


Desgaste de fragmentos de foices romanas

©azo



# Arte



Suporte a: identificação, conservação e restauro

©art

# Para Super-Heróis (adesão)?



©cin

# Importância biológica



©per

# CONTEXTOS MAIS ESPECÍFICOS EM ENGENHARIA

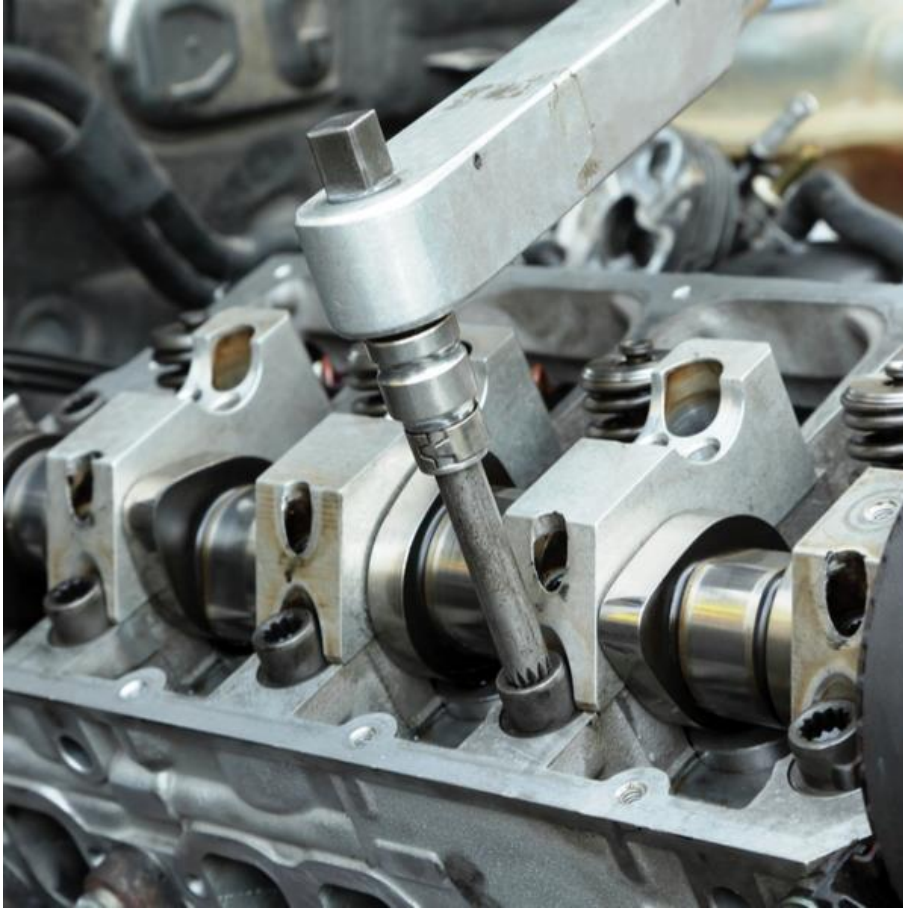
# Rodovia



- Aderência do pneu
- Desgaste do pneu
- Nível de ruído
- Nível de vibração

©pne

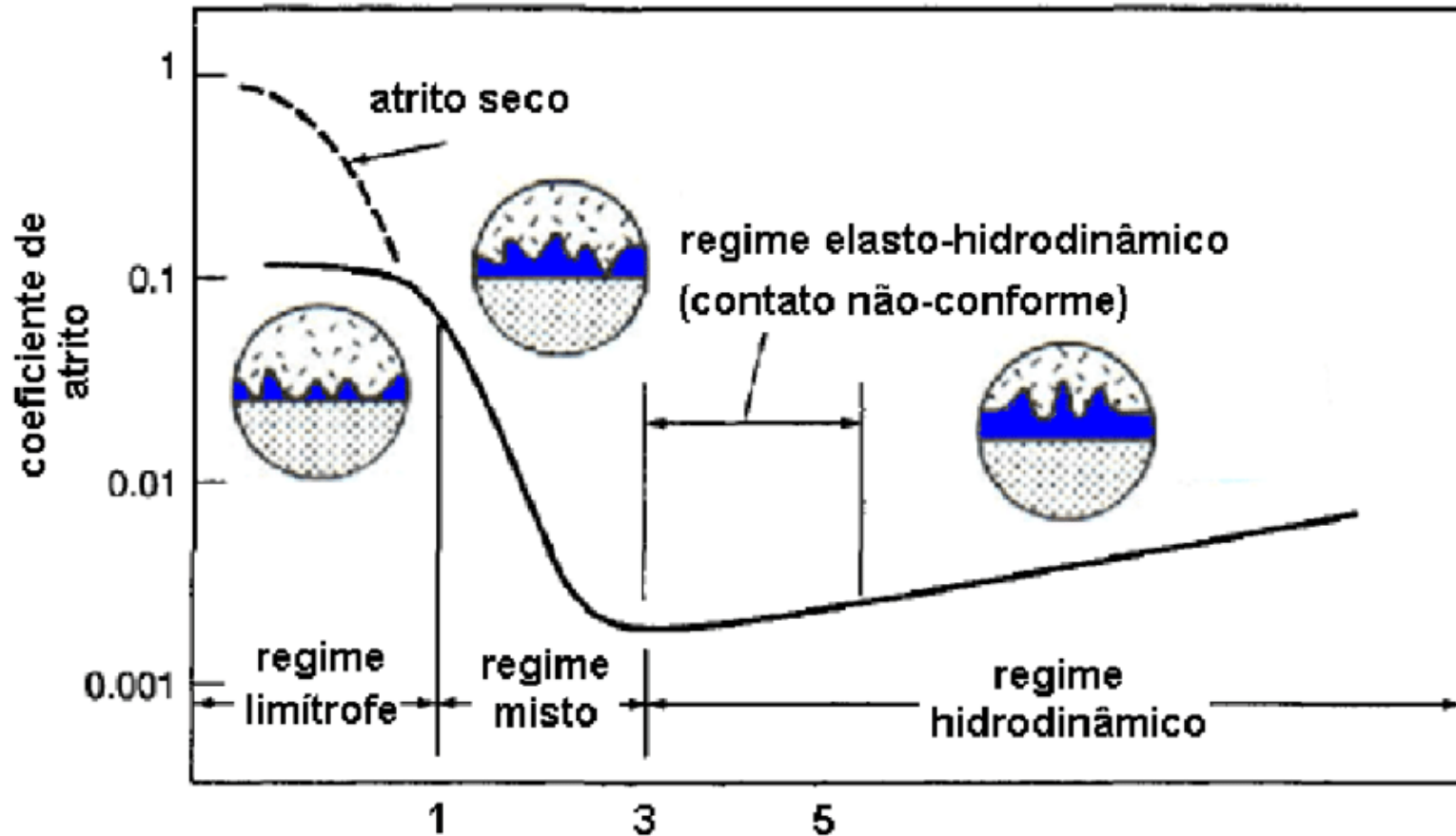
# Superfícies fixas em contato



- Aperto do cabeçote
- Vazamento x integridade da junta

©cab

# Superfícies em contato lubrificado



$$\Lambda = \frac{h_{\min}}{\sigma}$$

©str

# Montagem de partes mecânicas

- Eixamento: **rugosidade** mínima no eixo



©eix

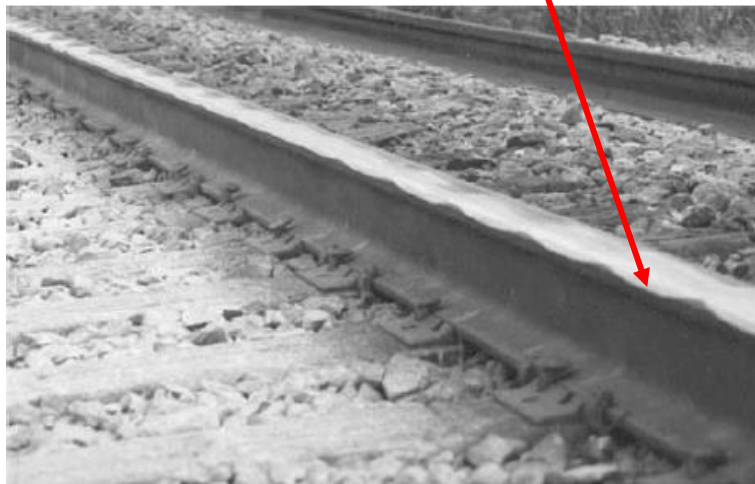


# Contato de rolamento (c/ ou sem escorregamento)

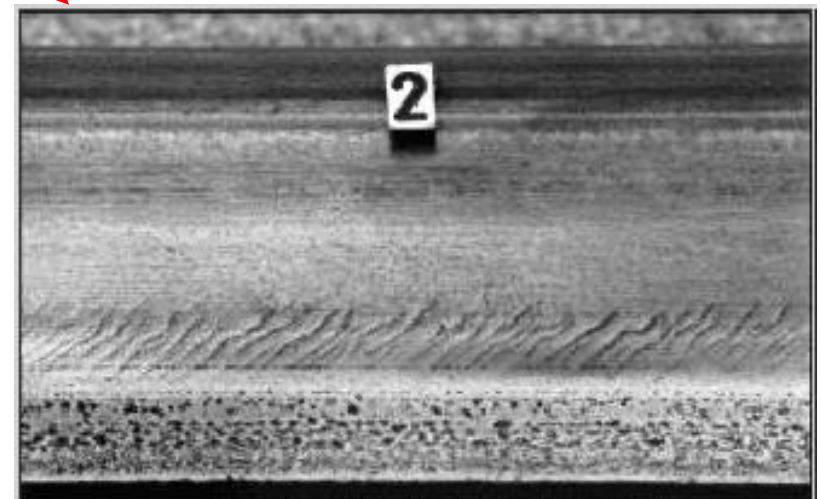
- Roda/trilho
- Fadiga de contato de rolamento (RCF)
- Ruído/Vibração
- Corrugação



©rtr



©cor



©hch

# Acabamento



- Aspecto visual
- Resistência ao risco
- Consumo de tinta

©pne

# RUGOSIDADE



# Questões importantes

- Definição
- Terminologia
- Aplicação a escalas distintas
- Distinção de outras características da superfície
- Medição

# Definição

Aurélio Século XXI

- Rugosidade: s.f., qualidade de rugoso
- Rugoso: adj., que tem rugas
- Ruga: s.f., prega ou dobra em qualquer superfície

New Oxford American Dictionary

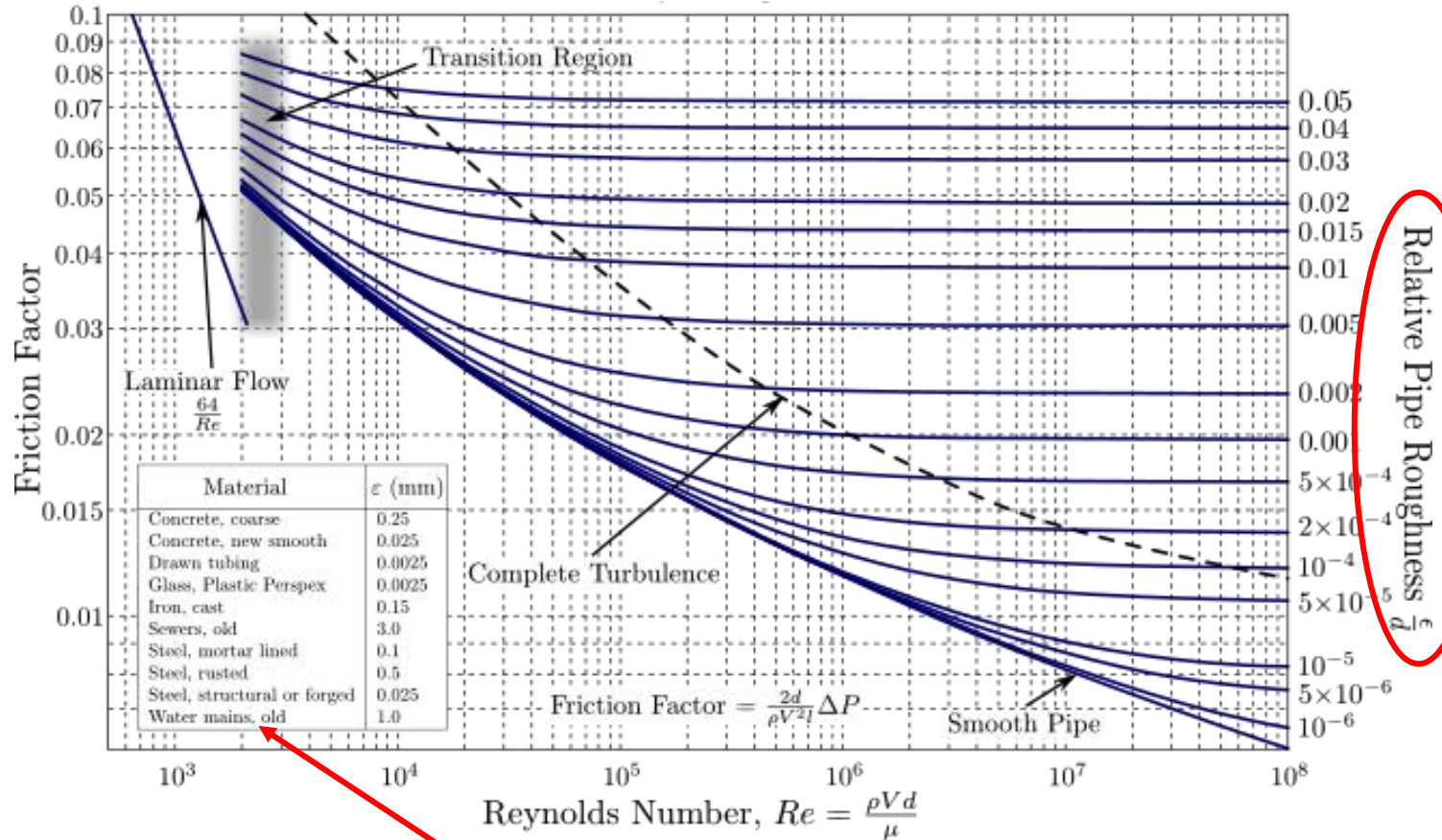
- Roughness: the quality or state of having an uneven or irregular surface

ISO 25178-2

- Média aritmética do valor absoluto das alturas ( $S_a$ )

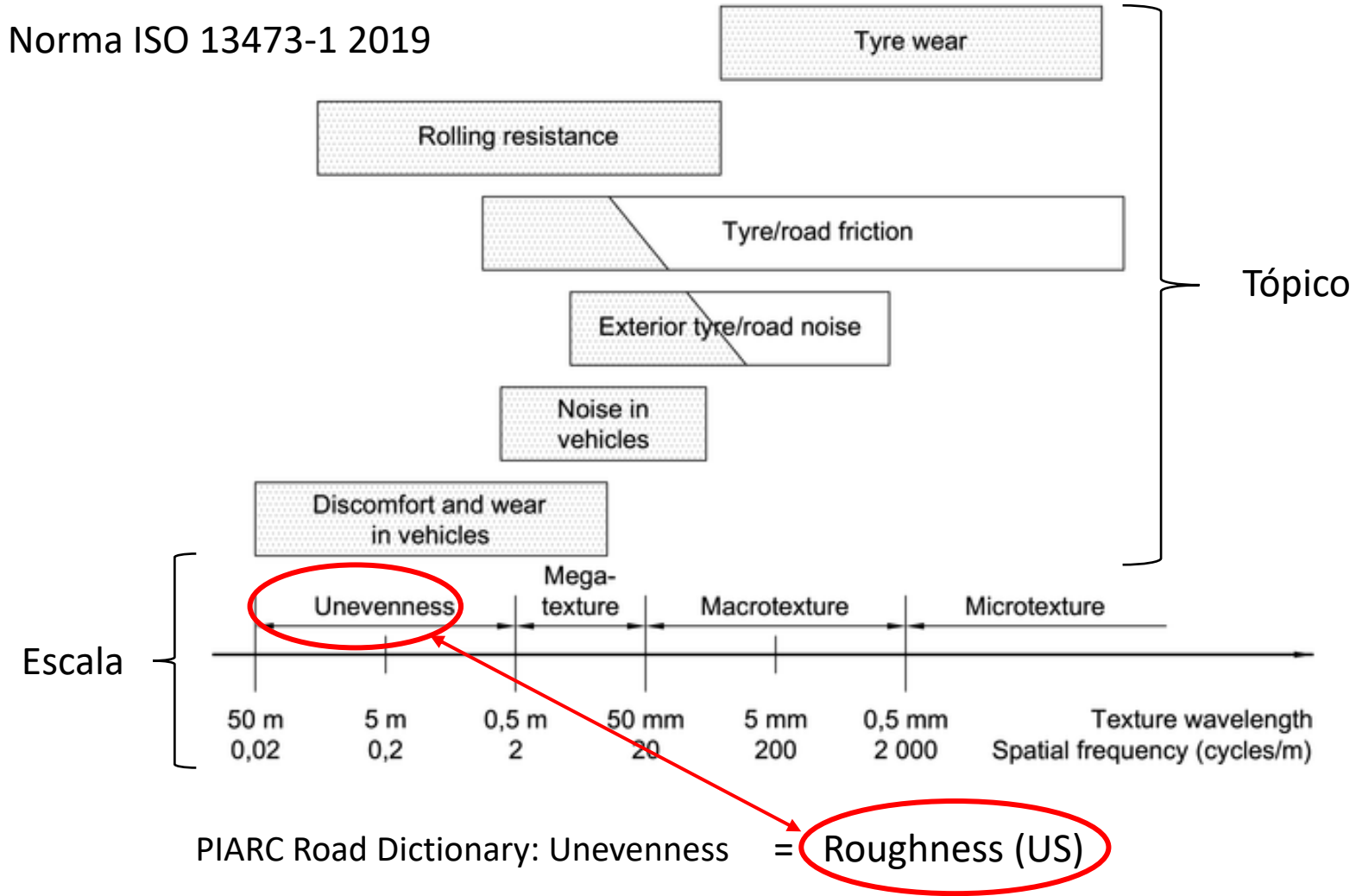
# Problemas com o rigor da definição

## Perda de carga em tubulações



rugosidade relativa = rugosidade absoluta (?) / diâmetro do tubo

# Terminologia



©is2

# Escalas distintas na mesma especialidade



Escala de centímetros

©pav

Escala de milímetros



©pav



# Rugosidade x outros aspectos da topografia

É usual distinguir três aspectos da topografia de uma superfície:

- Forma
- Ondulação
- Rugosidade (Aspereza)

Esta distinção é arbitrária e nem sempre é clara a linha divisória.

# Asa de avião de pequeno porte



©as1

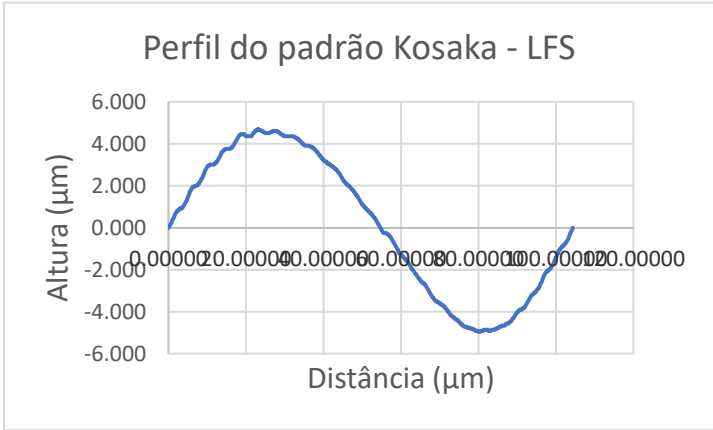
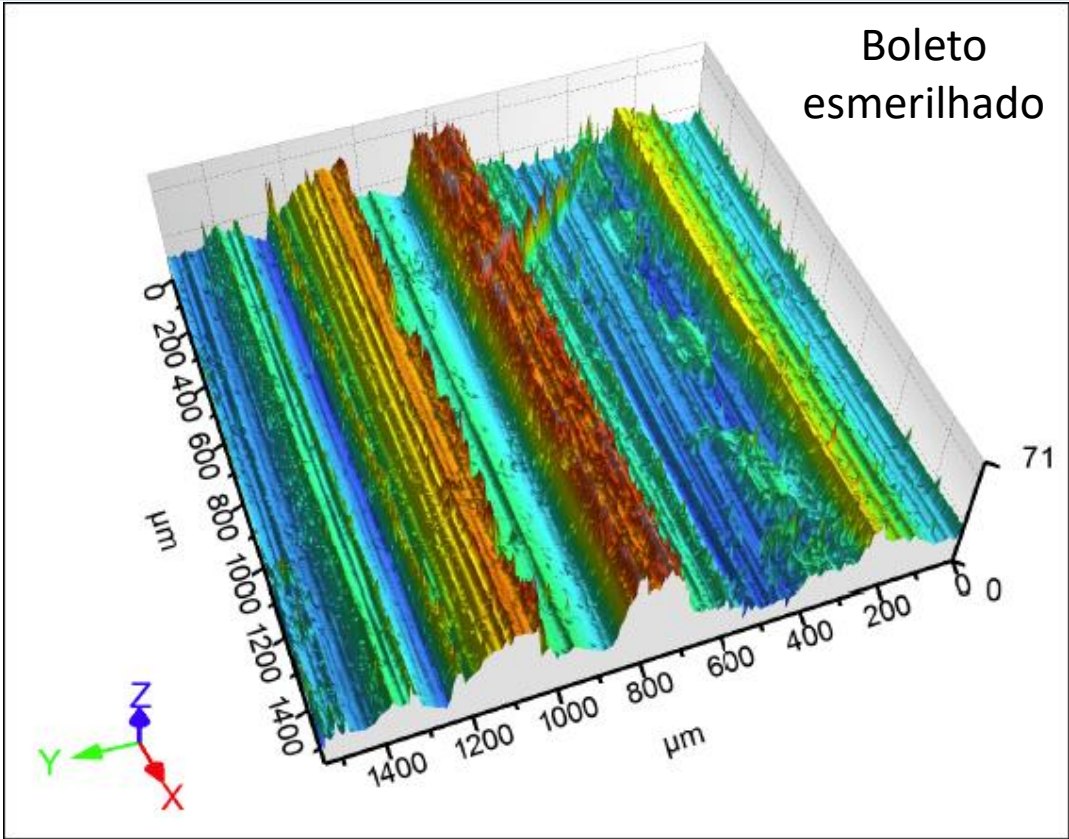
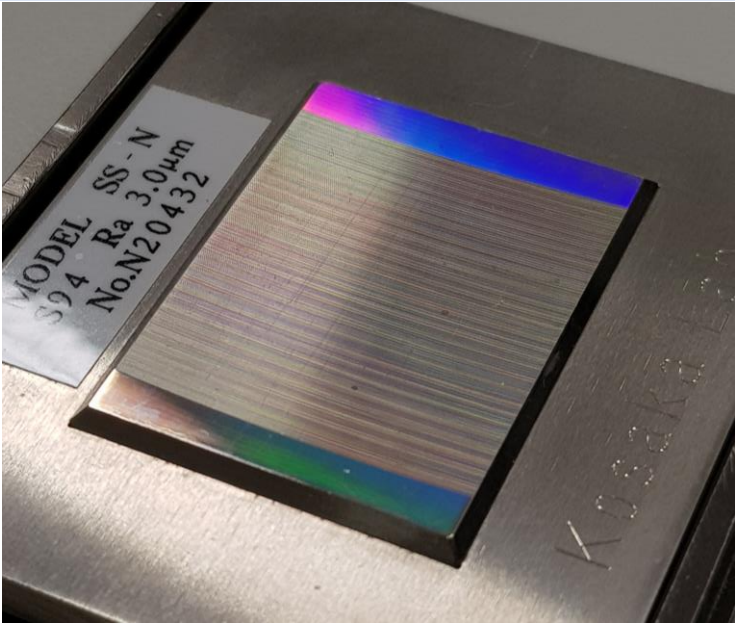


©as2

- Forma: perfil do aerofólio
- Ondulação: defeito do processo
- Rugosidade: do material de cobertura (tela)



# Rugosidade x ondulação



O que interessa: rugosidade ou ondulação?

# O que interessa em Tribologia

- 1. Erro de Forma

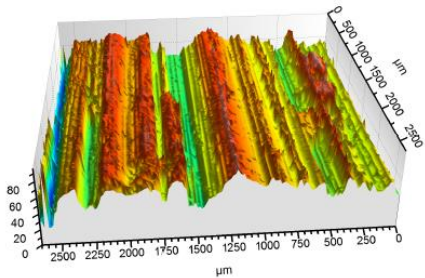
Normalmente não é tratado, assunto de tolerâncias

- 2. Ondulações

São ignoradas muitas vezes, mas podem ser importantes como indicação de problemas de processo (vibrações de equipamento, por ex.) ou por introduzirem perda de funcionalidade (estanqueidade)

- 3. Rugosidade

Crucial, por exemplo, para a análise de desgaste de camisas de cilindros ou na ativação de aditivos de lubrificantes



©Imc

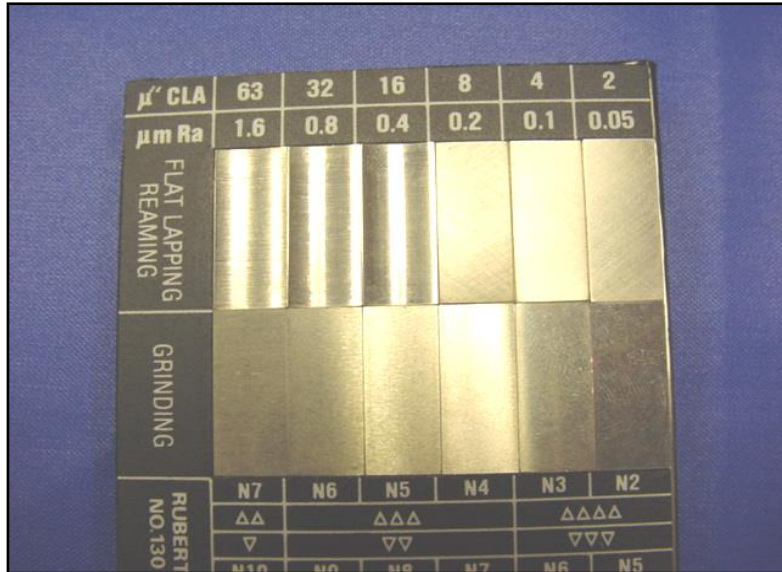
# MEDIÇÃO



# Medição de superfícies

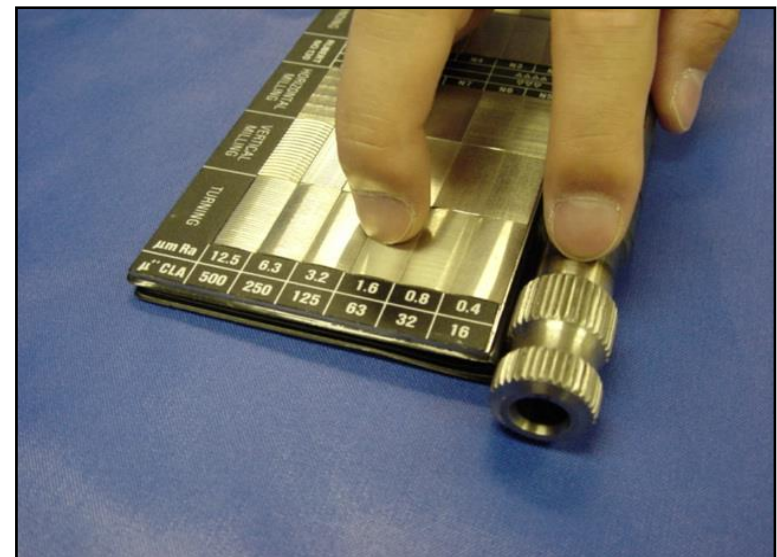
- Instrumentos/procedimentos capazes de expressar numericamente as características de interesse das texturas das superfícies.
- Características de interesse estão essencialmente associadas a medições de *alturas* (relevo) da superfície.

# Procedimento de avaliação visual/táctil



Cartela com padrões de rugosidade e respectivos valores

Comparação da sensação do dedo sobre a peça com a do dedo sobre a cartela.



O resultado da avaliação é expresso numericamente, mas o procedimento é robusto?

©thl

# Rugosidade de pavimento ASTM E965-15



$$\text{Texture depth}(mm) = \frac{4V}{\pi d^2}$$

where :

©spt

d = average diameter of sand patch circle (mm)

V = volume of sand used (mm<sub>3</sub>)



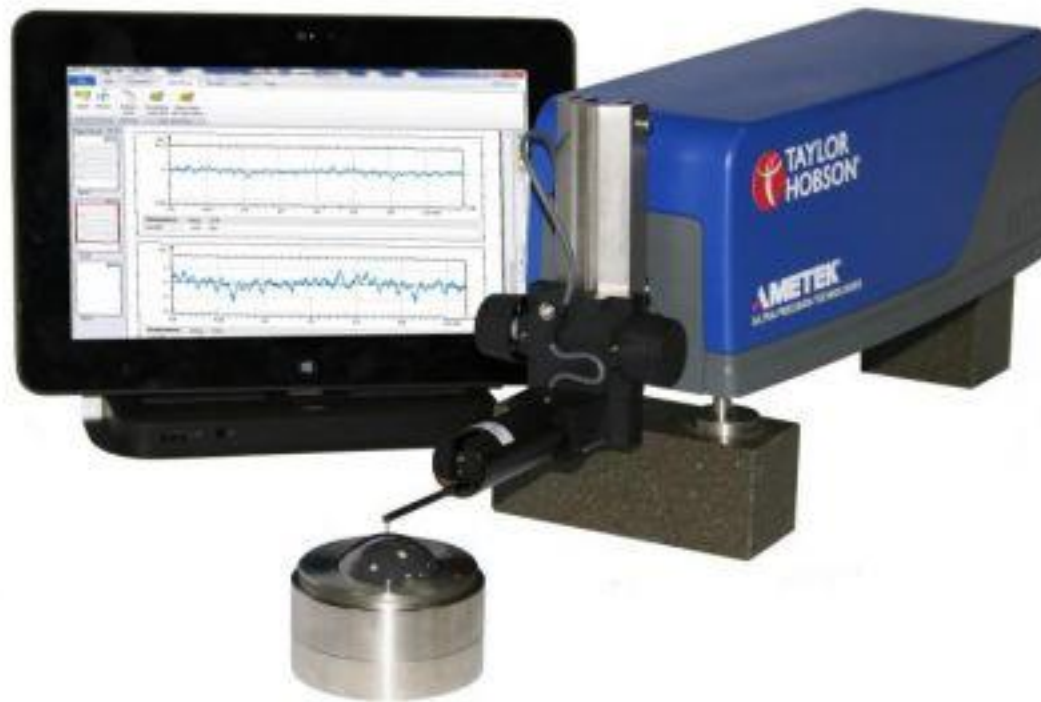
# Abordagens com tecnologia mais avançada

- **Apalpação**
  - Instrumentos eletro-mecânicos (obtém-se um perfil 2D)
- **Sem contato**
  - Instrumentos ópticos (“mapa” 3D)
  - Scanners
  - CRP (“close range photogrammetry”)

# INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO



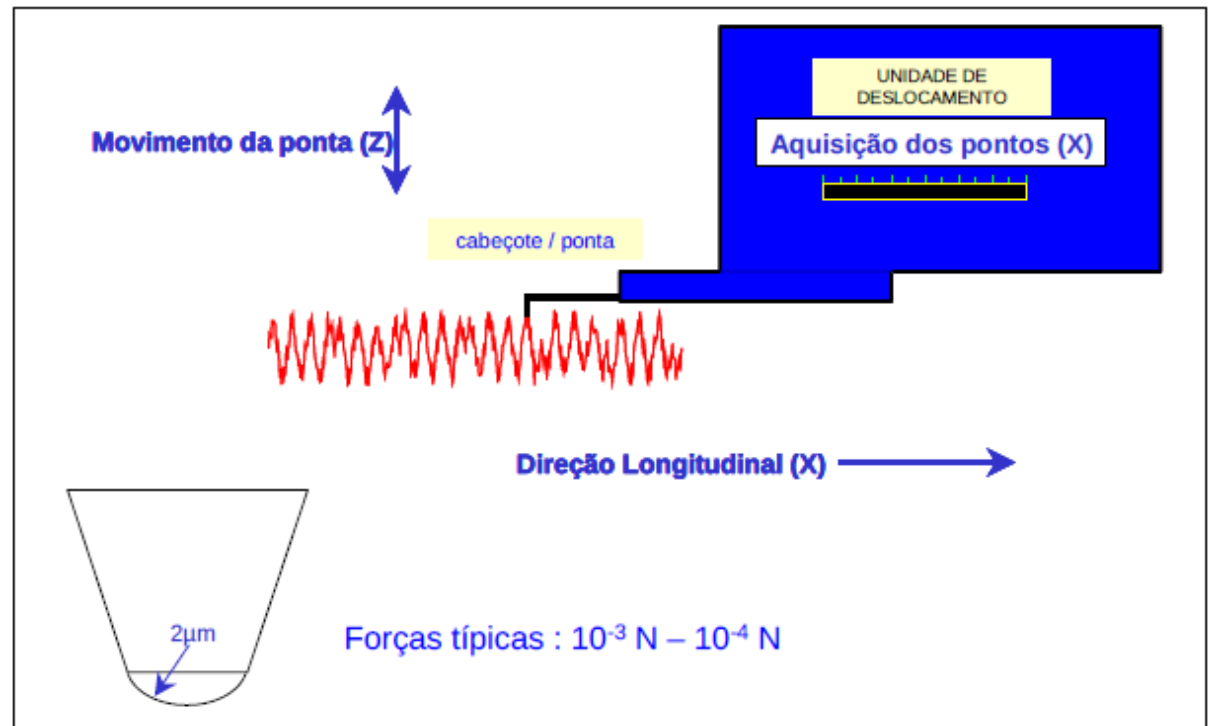
# Perfilômetro 2D



Perfilômetro Talysurf Intra Touch (Taylor Hobson)

©thl

# Perfilômetro 2D



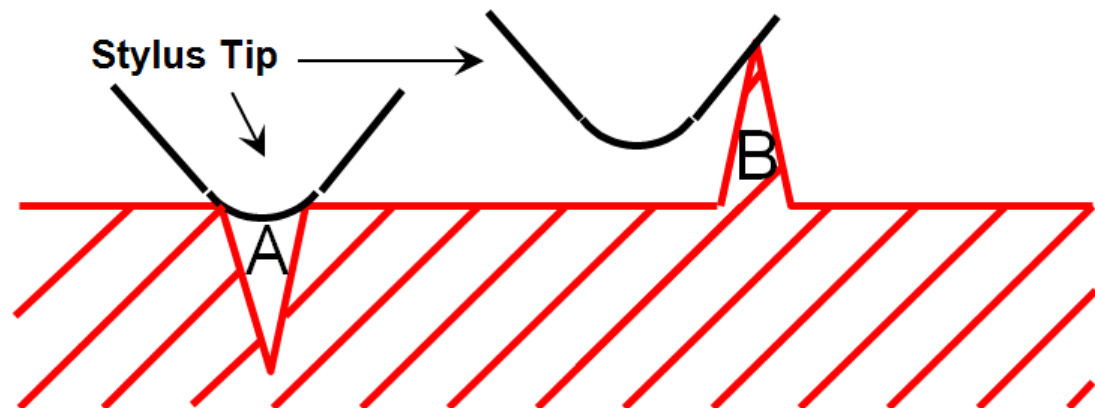
©thl

# Geração de perfis

Perfil gerado pela ponta



Situação real

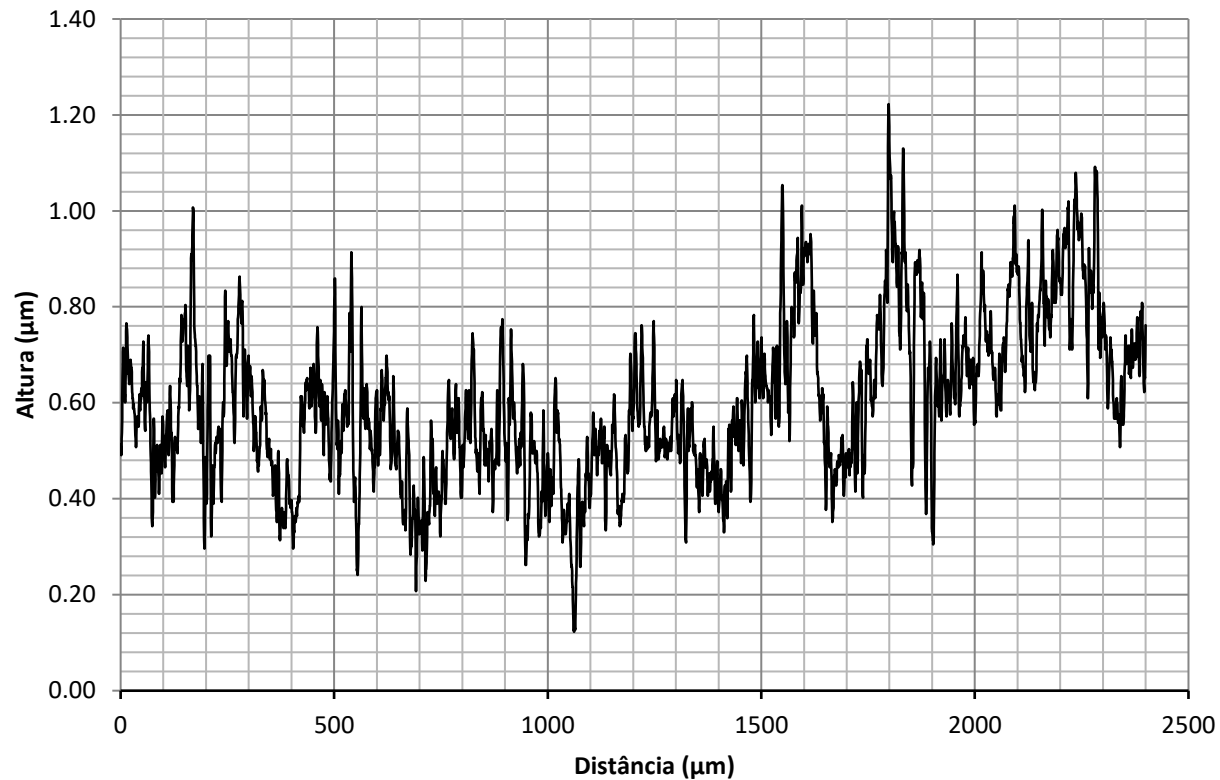


A ponta atua como "filtro" atenuando alterações bruscas de altura.

©thl

# Traçado usual

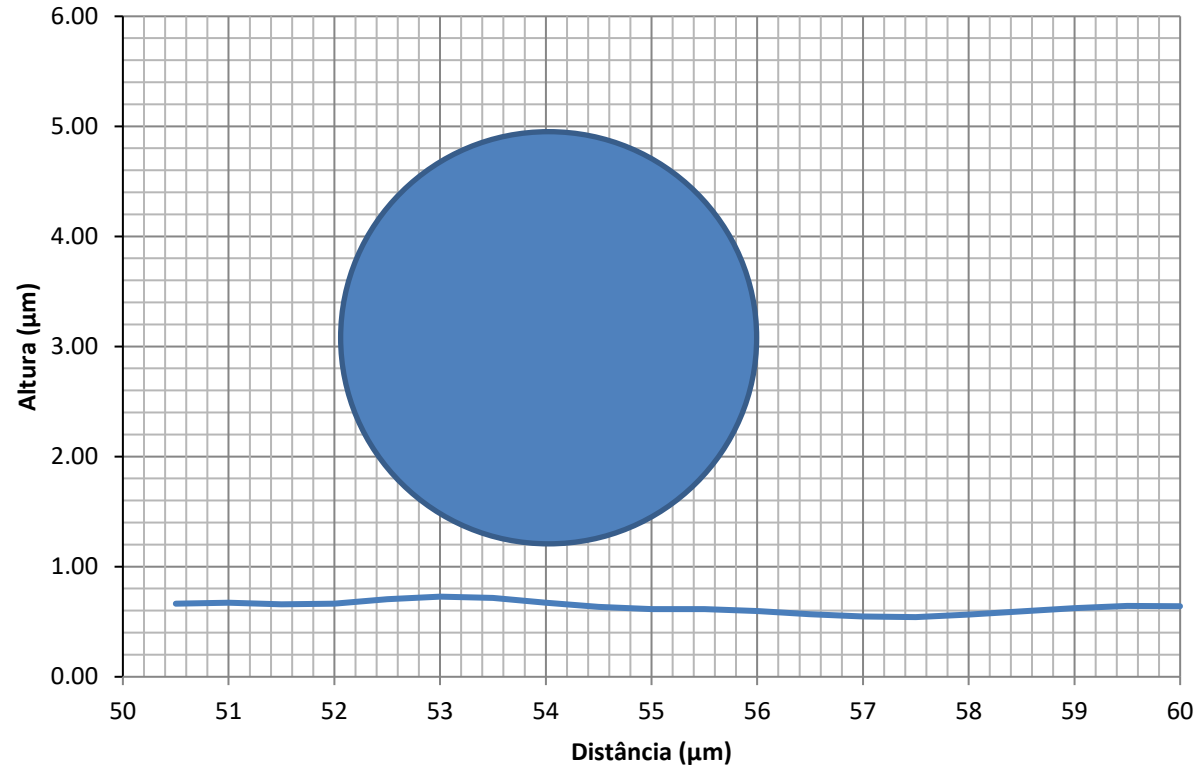
## Corpo de prova retificado



As alturas estão numa escala muito mais ampliada.

# Perfil com escalas iguais

Corpo de prova retificado



As inclinações são usualmente muito suaves.

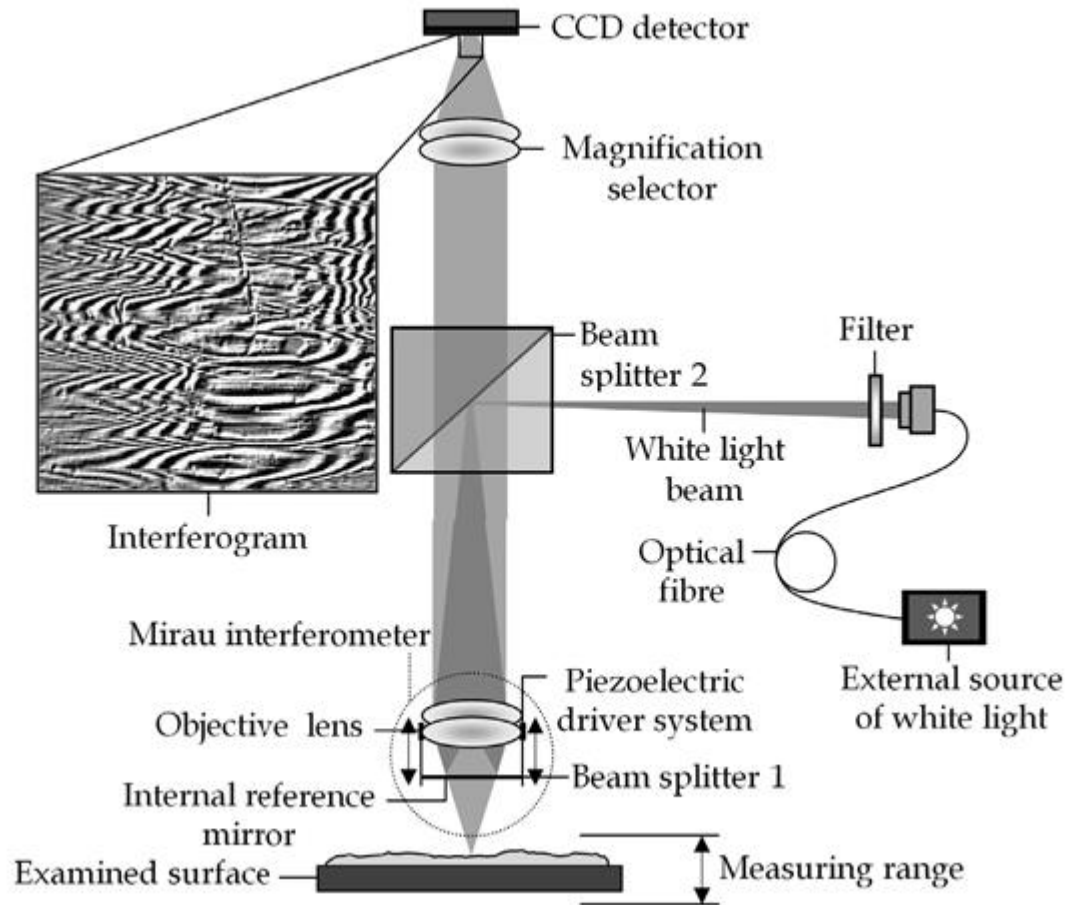
# Perfilômetro óptico 3D (TAYLOR-HOBSON CCI MP)



©thl

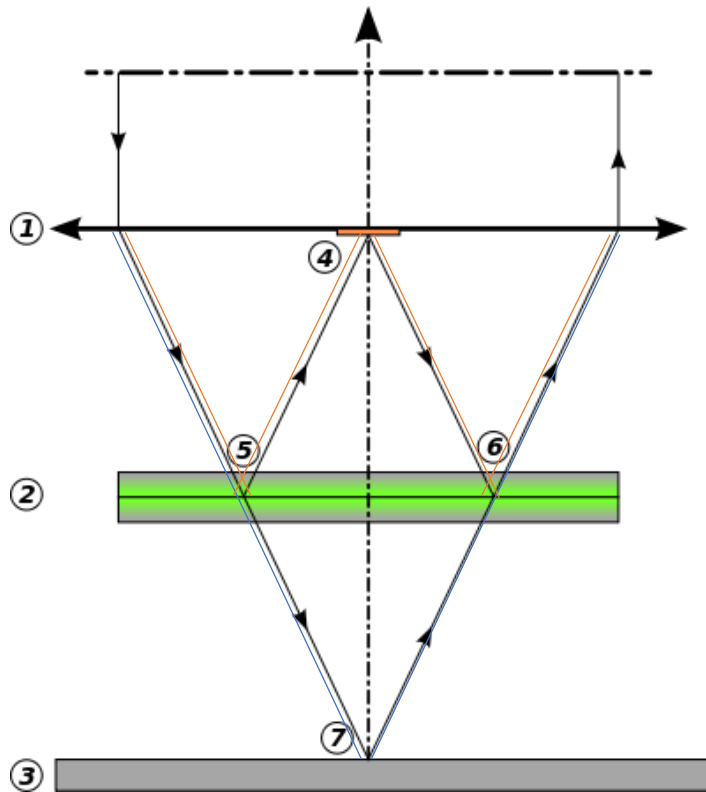


# Princípio de funcionamento



©kap

# Interferômetro de Mirau



1. Objetiva
2. Espelho semi-transparente
3. Amostra
4. Espelho de referência
5. 1ª reflexão do feixe de referência
6. 3ª reflexão do feixe de referência
7. Reflexão do feixe de análise

©kap

# Dados técnicos mais importantes (CCI-MP)

Performance	CCI MP
Single scan range (Z)	2.2 mm as standard (closed loop)
Z -stitching range	Greater than 50 mm (closed loop)
Noise floor (Z) <sup>1</sup>	<0.08 nm [0.8 Å]
Repeatability of surface RMS <sup>2</sup>	<0.02 nm [0.2 Å]
Number of measurement points	1024
Step height repeatability <sup>3</sup>	<0.1%
Surface reflectivity	<0.3% - 100%

Stages	CCI MP
Component weight (max)	10 Kg
Automated X-Y stage (medium)	112 mm x 75 mm
Automated X-Y stage (large)	150 mm x 150 mm
Manual tip/tilt (standard)	+/- 4 degrees

Magnification	Field of view (mm)	Optical resolution (um)	Pixel size (um)	Slope (max) (deg)	Working distance (mm)	NA	Design
10x	1.73 x 1.73	1.3	1.7	8.6	7.4	0.3	Mirau
20x	0.865 x 0.865	1.0	0.85	16.5	4.7	0.4	Mirau
50x	0.346 x 0.346	0.4 - 0.6	0.34	27.5	3.4	0.55	Mirau

# Cuidados na medição

- Amostra
  - Limpeza da amostra (ultrassom, secagem etc.)
  - Manuseio (luvas, pinças, não riscar amostra)
- Ambiente
  - Temperatura
  - Umidade
  - Vibrações
- Equipamento
  - Nivelamento da amostra
  - Ajuste de refletância
  - Áreas de medição emendadas (*stitching*)

# Medições fora do laboratório

- Equipamento portátil
  - Cuidados no deslocamento
  - Posicionamento mais adequado
- Uso de réplicas
  - Escolha de material
  - Produção de moldes
  - Aplicação no campo



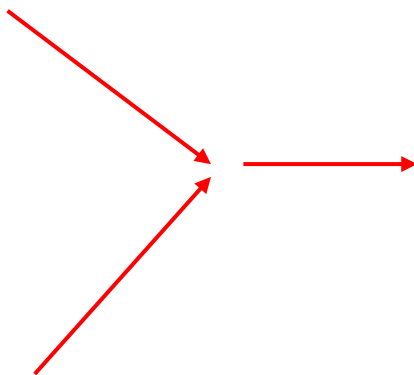
# Preparação do molde



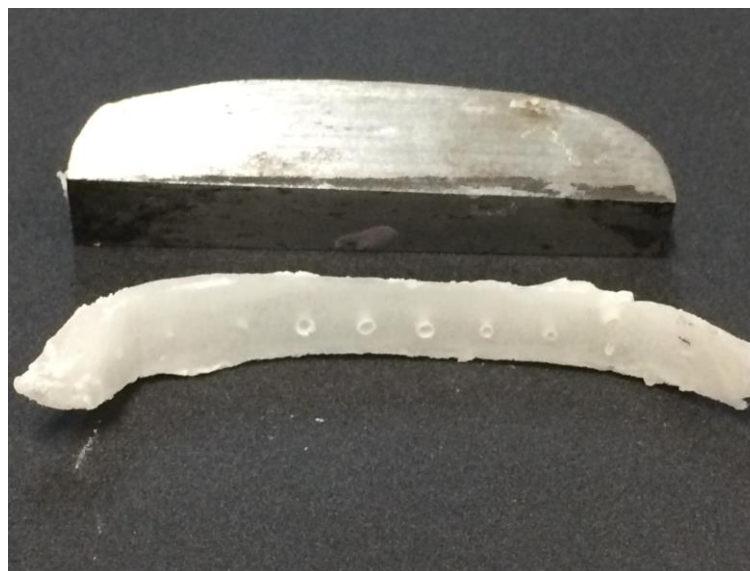
acrílico líquido



acrílico em pó



molde



# Aplicador de silicone (material odontológico)



Figura 1 Cartucho contendo o silicone de adição



Figura 2 Esquema de montagem de conjunto para a aplicação do silicone

# Aplicação do silicone sobre a peça





# Pressão da forma sobre o silicone

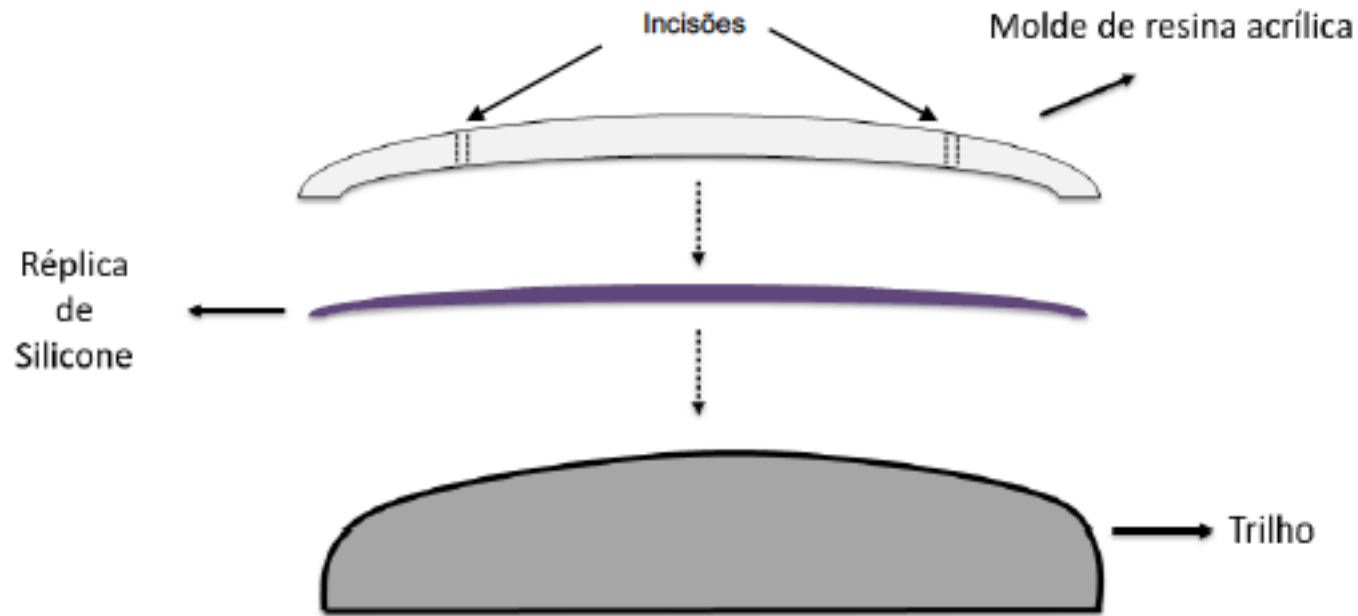
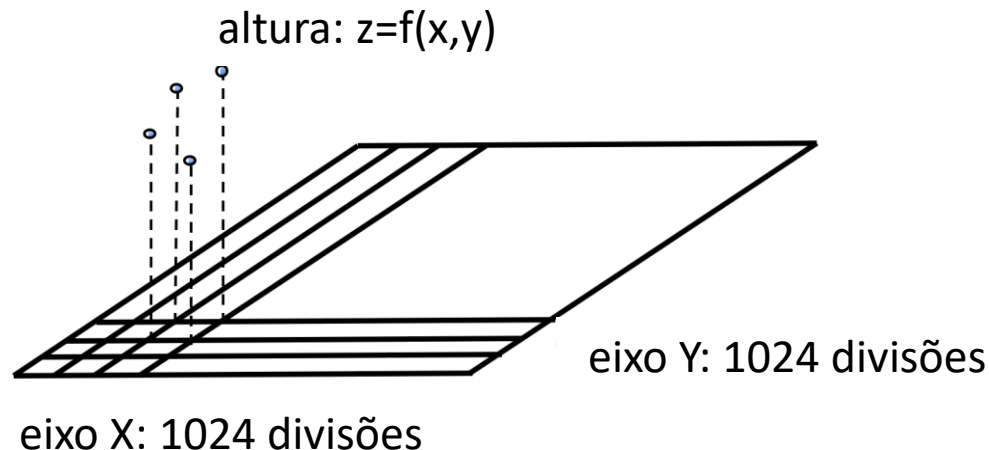


Figura 3 - Esquema de aplicação do silicone

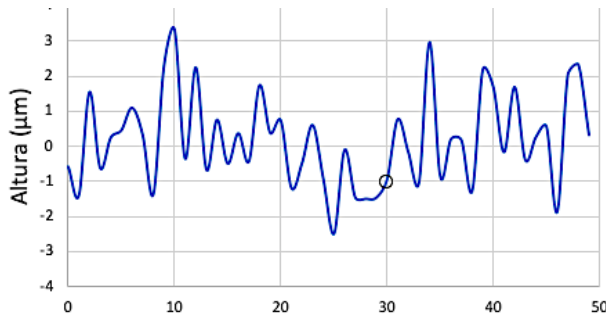
# RESULTADO DA MEDIÇÃO

# Mapeamento da superfície

- O espelho pode ser deslocado verticalmente pelo cristal piezo-elétrico.
- Esse movimento permite identificar o ponto de interferência máxima.
- Para cada pixel, o registro da altura em que isso ocorre permite mapear  $z=f(x,y)$ .

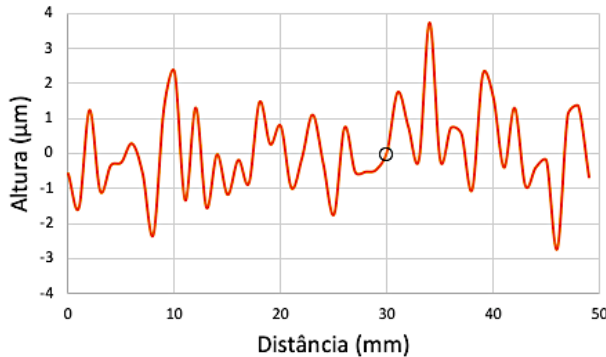


# Composição de um perfil (2D)



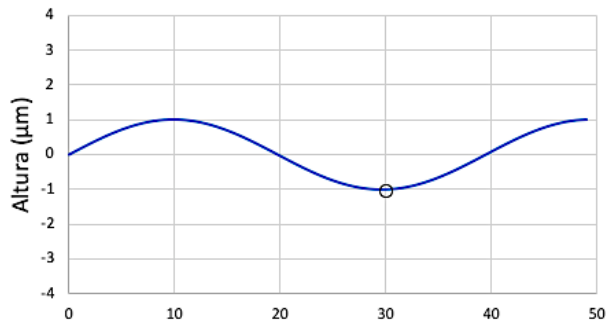
Perfil primário

=



Perfil de rugosidade

+



Perfil de ondulação

Separação de rugosidade e ondulação:

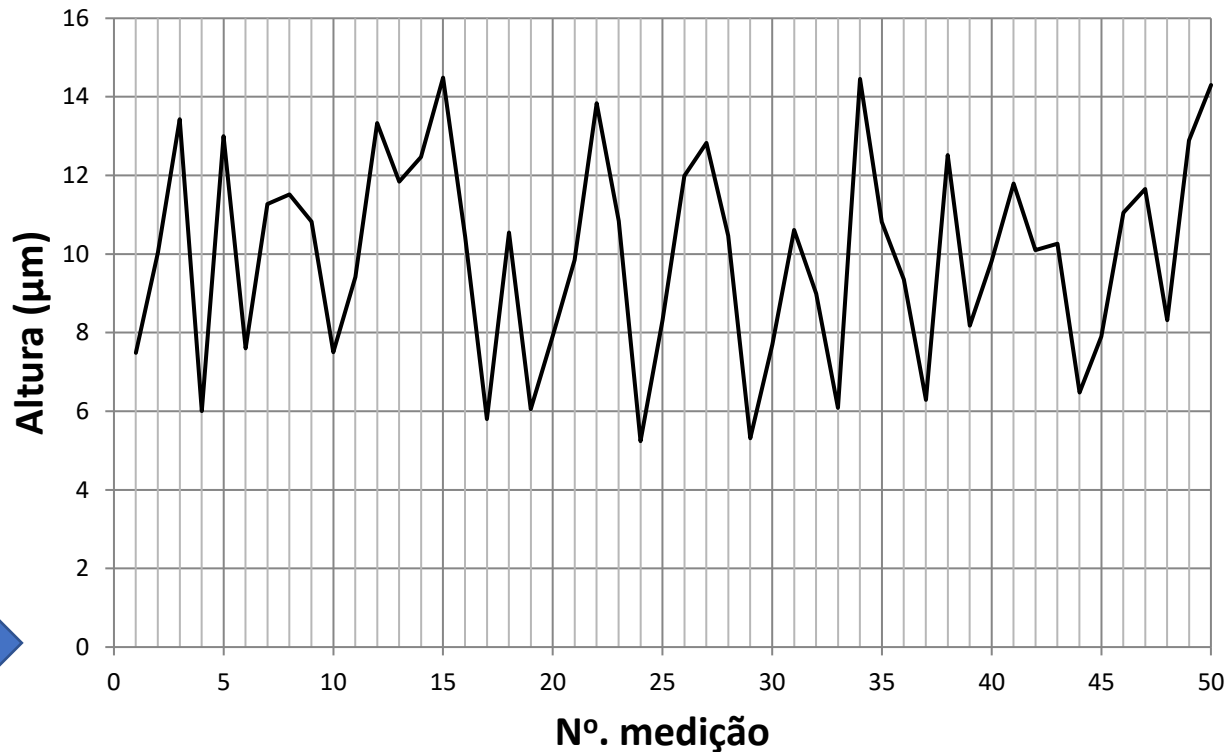
- Critério relativamente arbitrário
- Depende do uso de filtros
- Norma dá orientação para seleção do filtro
- Interesse usual é rugosidade, mas há casos em que o foco pode ser a ondulação

# REFERÊNCIA PARA AS MEDIÇÕES

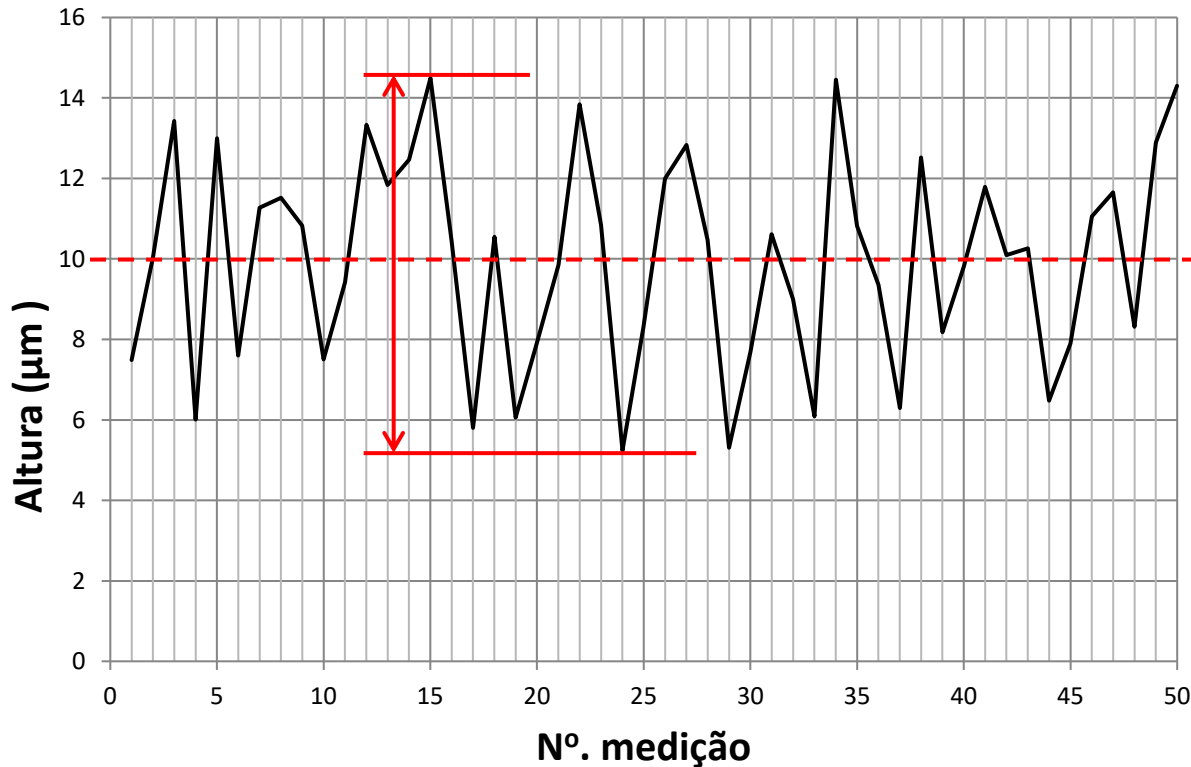


# Perfil inicial

A referência inicial da medição de um perfil é arbitrária:



# Definição da linha de referência



- 50 medições de altura ao longo de um perfil
- Adotada como linha de referência a média das alturas:  $10 \mu\text{m}$
- Distância máxima pico/vale:  $9,3 \mu\text{m}$
- Soma das áreas acima = soma das áreas abaixo da linha de referência

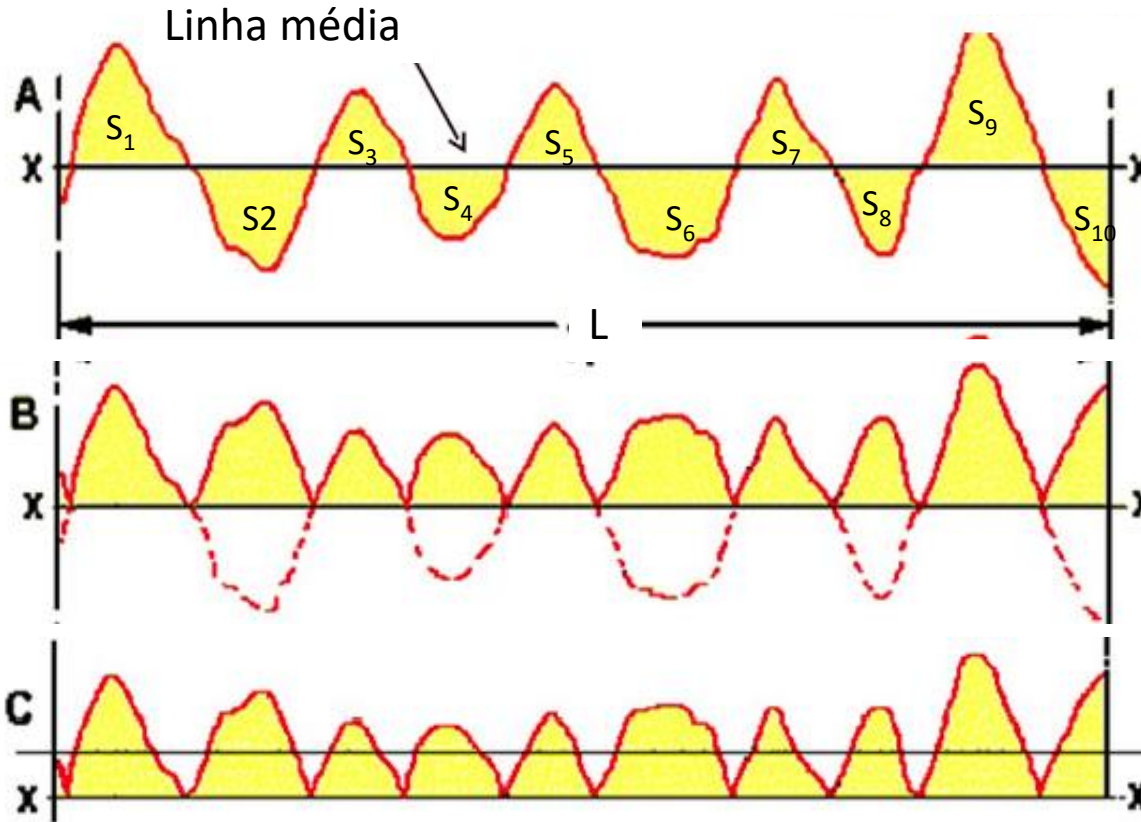
# Primeiro parâmetro numérico de rugosidade

## RUGOSIDADE MÉDIA ARITMÉTICA

- $R_a$ : símbolo para rugosidade 2D (de um perfil)
- $S_a$ : símbolo para rugosidade 3D (de uma superfície)
- De longe o mais usado na indústria
- Útil no acompanhamento sistemático de um mesmo processo
- mas...
- Insensível a variações de frequência espacial
- Mesmo valor para superfícies muito diferentes



# Rugosidade média aritmética ( $R_a$ )



$$S_1 + S_3 + S_5 + S_7 + S_9 = S_2 + S_4 + S_6 + S_8 + S_{10}$$

$L$ =comprimento da amostra

Considerando os valores absolutos

Obtida a média

Matematicamente:  $R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| dx$  ou  $R_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y(x)_i|$

# Cálculo de $R_a$

Dadas 10 leituras de um perfil, obter a rugosidade média aritmética ( $R_a$ ), sabendo que o fator de conversão é de  $0,6 \mu\text{m}/\text{milivolt}$

Ponto	Saída (mV)	Z ( $\mu\text{m}$ )	Y ( $\mu\text{m}$ )	abs (Y)
1	438	262,8	-14,22	14,22
2	461	276,6	-0,42	0,42
3	458	274,8	-2,22	2,22
4	460	276,0	-1,02	1,02
5	452	271,2	-5,82	5,82
6	477	286,2	9,18	9,18
7	449	269,4	-7,62	7,62
8	477	286,2	9,18	9,18
9	467	280,2	3,18	3,18
10	478	286,8	9,78	9,78
©drx	Médias:	277,0	0	6,26

A média das alturas é tomada como linha de referência

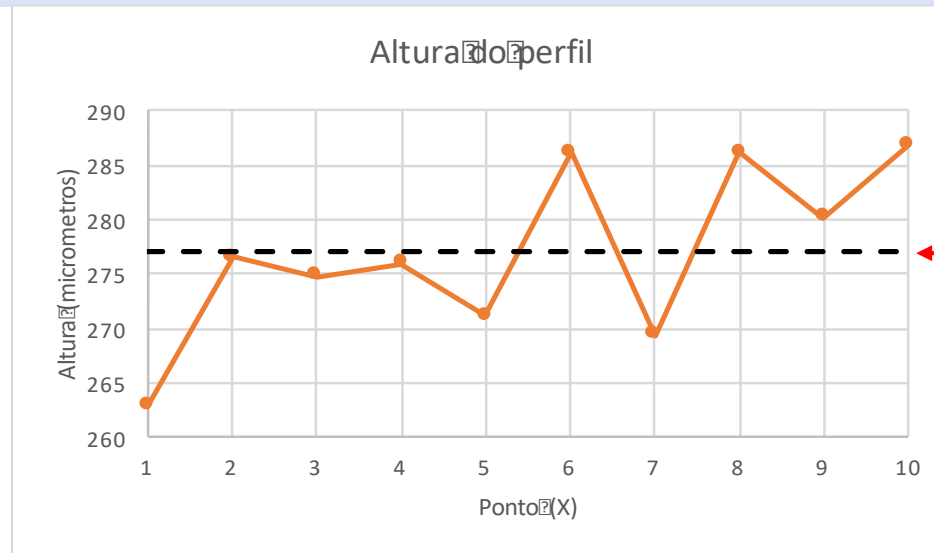
Y é a altura do perfil em relação à linha de referência:  $Y = Z - 277$

$R_a$  = média aritmética dos valores absolutos de Y

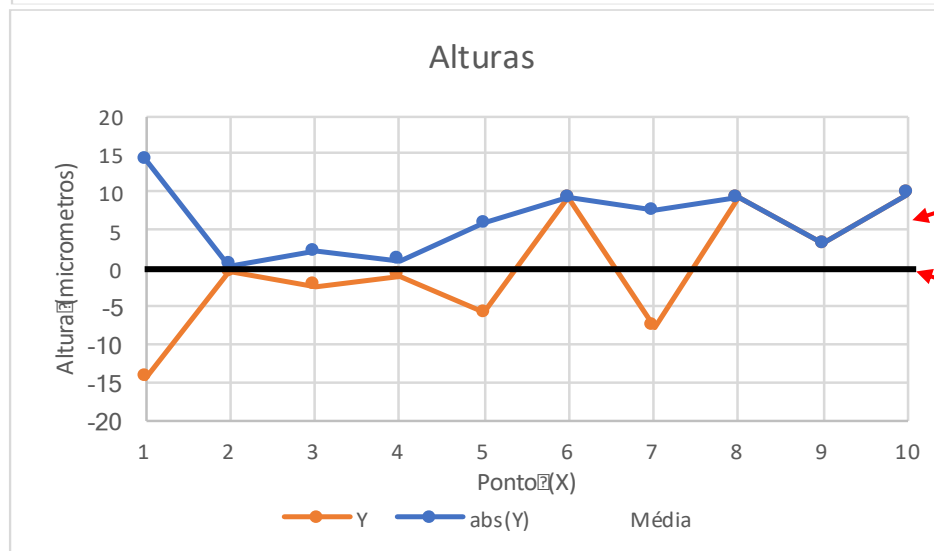
$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{1}^N |Y| = 6,26$$



# Cálculo de $R_a$



Média = 277  $\mu\text{m}$



$R_a = 6,26 \mu\text{m}$

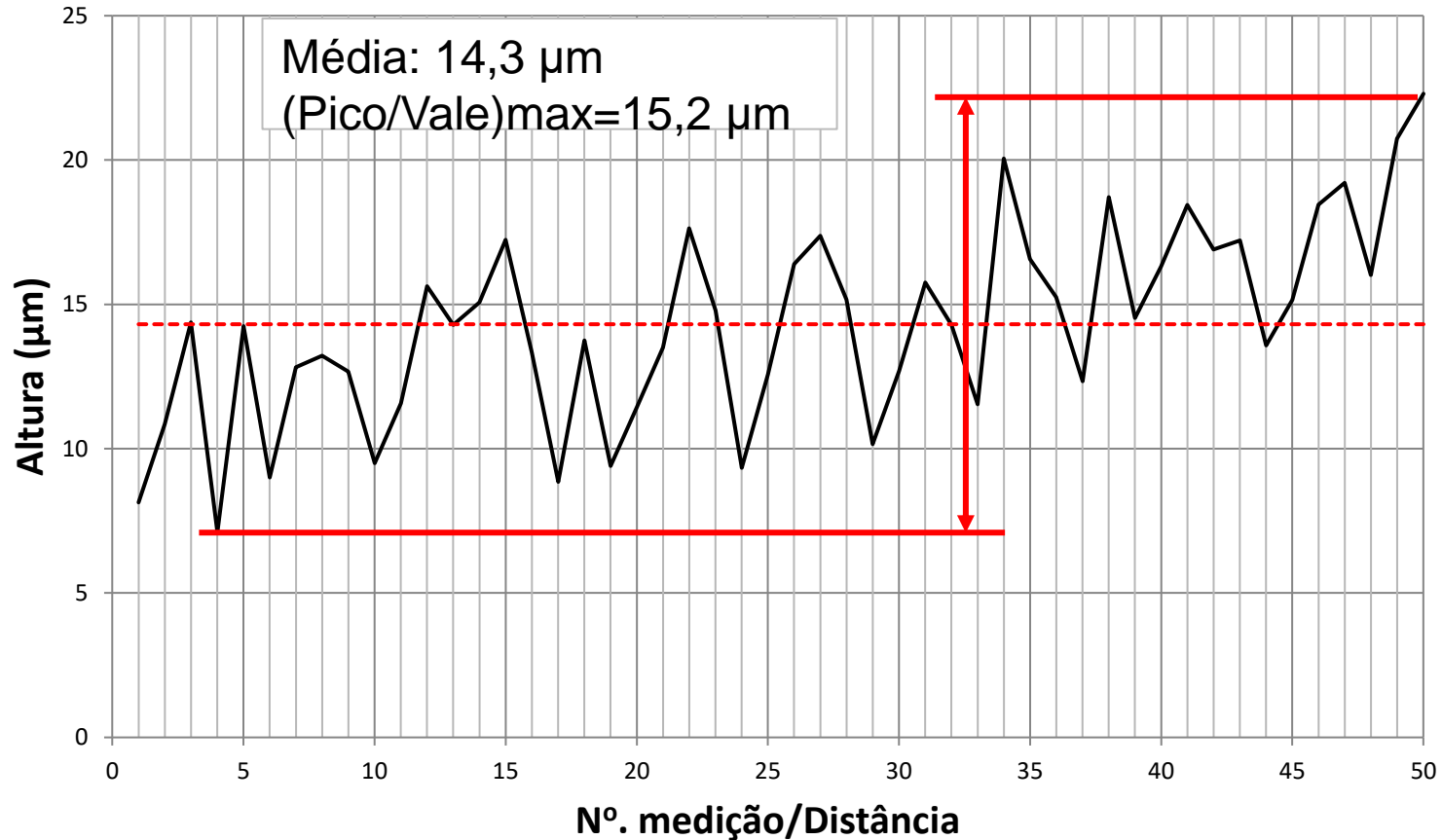
linha média

# Linha de referência

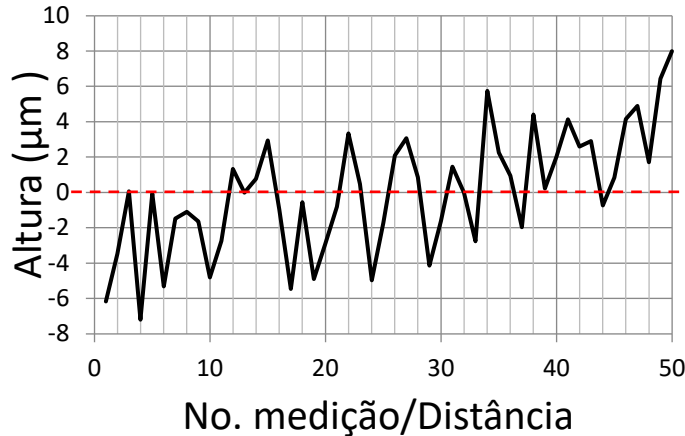
A linha de referência, determinada pela média aritmética dos valores medidos, corresponde ao plano ideal da superfície sem "acidentes".

- Áreas do perfil acima e abaixo da linha de referência são iguais. Sempre?
- A soma dos quadrados das diferenças entre as alturas e a linha média é mínima. Sempre?

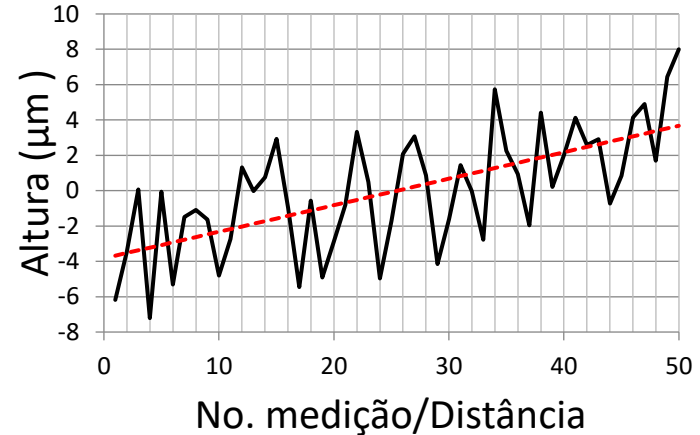
# Perfil de amostra inclinada



# Linha de referência



$(\text{pico a vale})_{\text{max}} = 15,2 \mu\text{m}$

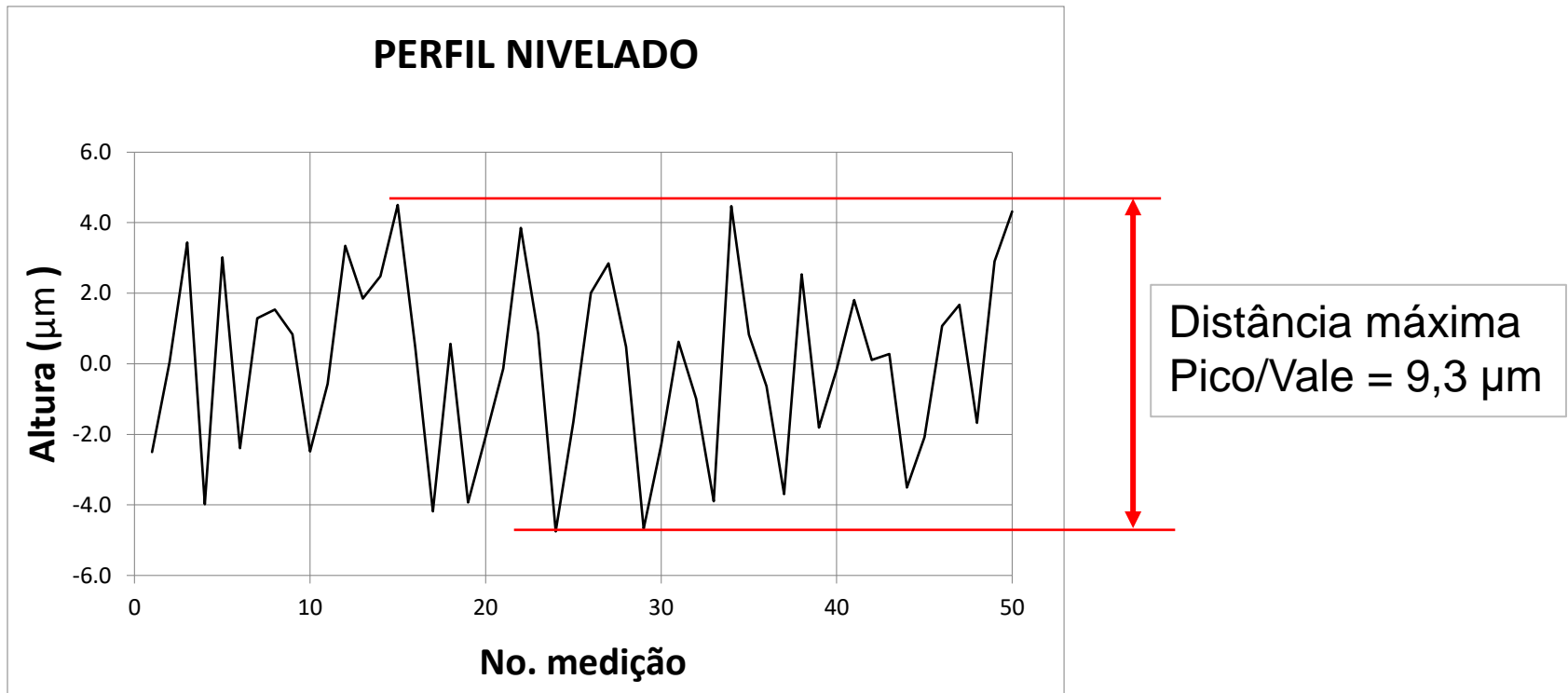


$(\text{pico a vale})_{\text{max}} = 15,2 \mu\text{m}$

- Áreas iguais acima e abaixo da linha média.
- Soma dos quadrados das diferenças não é mínima.
- Distância máxima pico/vale está distorcida.

- Áreas iguais acima e abaixo da linha de tendência.
- Minimizada a diferença de quadrados.
- Distância máxima pico/vale continua distorcida.

# Perfil nivelado

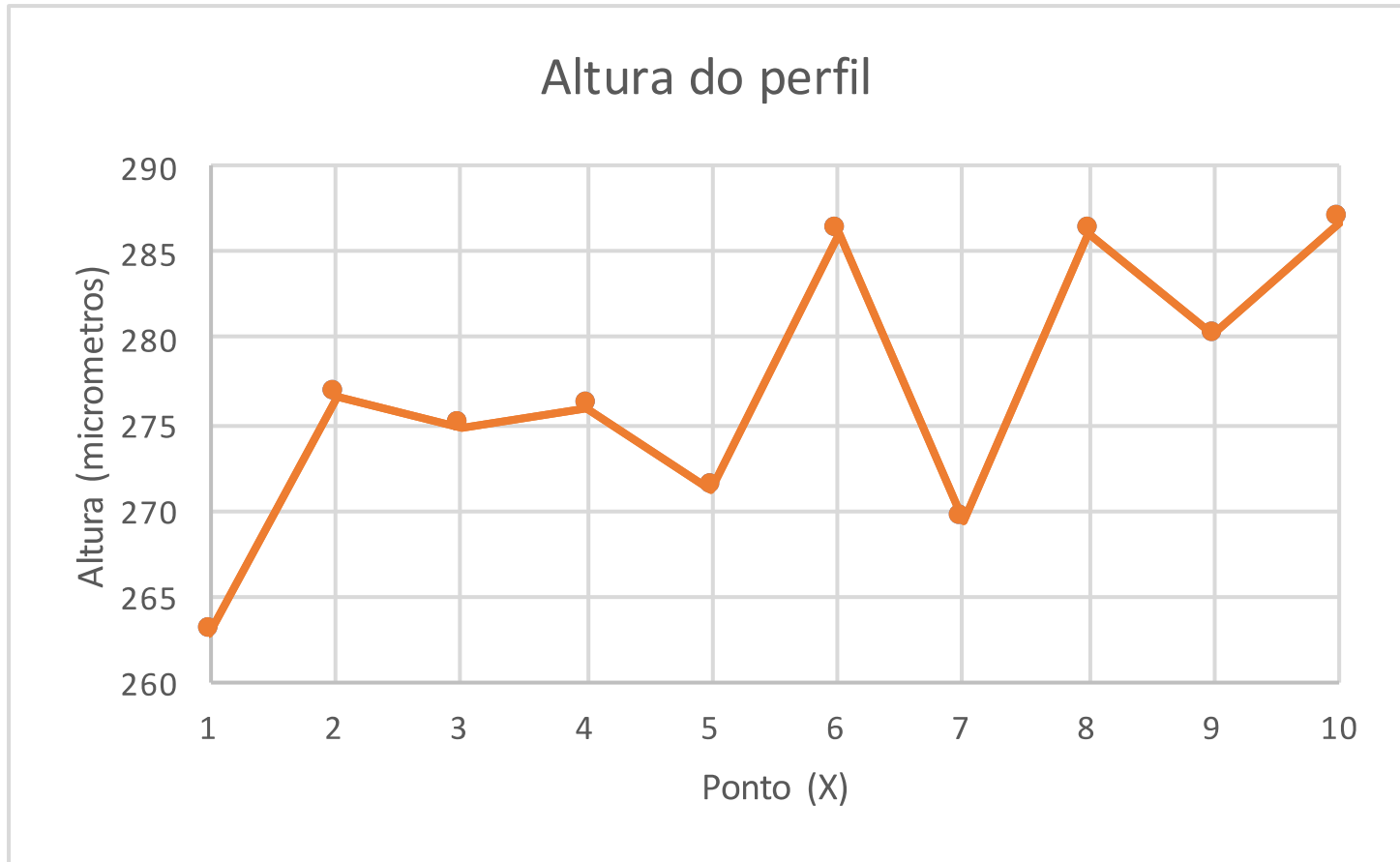


Correção pela linha de tendência:

- válida para perfil (2D)
- em 3D é válida só para pequenas inclinações

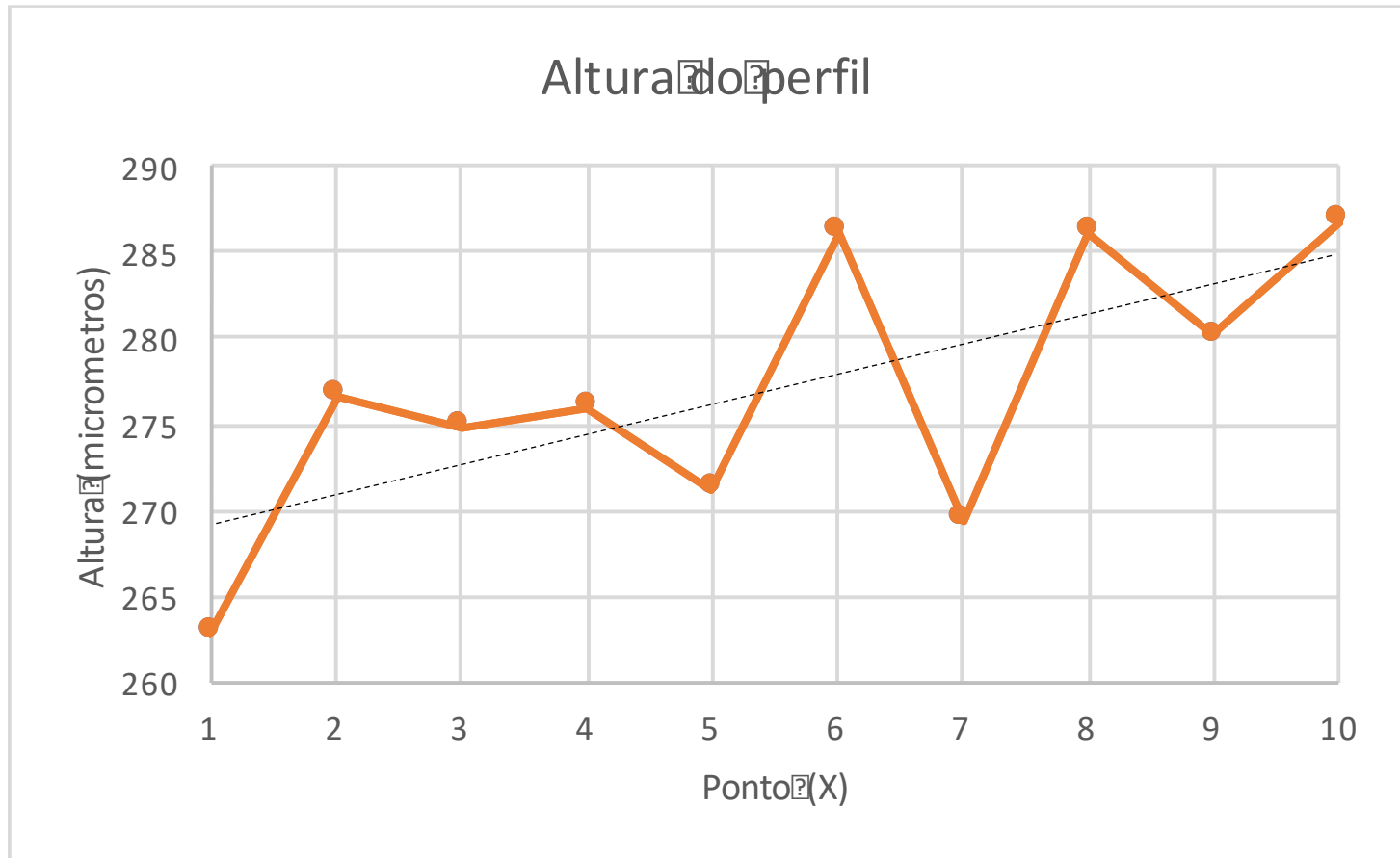
# Problema com o cálculo anterior

O perfil apresenta uma inclinação.





# Correção pela linha de tendência



Equação da linha de tendência:  $Z = (1,7782 \cdot X) + 267,24$

# Cálculo corrigido (do exercício anterior)

**Enunciado original:** Dadas 10 leituras de um perfil, obter a rugosidade média aritmética ( $R_a$ ), sabendo que o fator de conversão é de  $0,6 \mu\text{m}/\text{milivolt}$ .

Reconhecido o fato de que o perfil tem uma inclinação, a referência deixa de ser a média das alturas e passa a ser a linha de tendência.

Ponto	mV	Y ( $\mu\text{m}$ )	Z	Y-Z	abs(Y-Z)
1	438	262,8	269,02	-6,22	6,22
2	461	276,6	270,80	5,80	5,80
3	458	274,8	272,57	2,23	2,23
4	460	276,0	274,35	1,65	1,65
5	452	271,2	276,13	-4,93	4,93
6	477	286,2	277,91	8,29	8,29
7	449	269,4	279,69	-10,29	10,29
8	477	286,2	281,47	4,73	4,73
9	467	280,2	283,24	-3,04	3,04
10	478	286,8	285,02	1,78	1,78

linha de tendência

$$Z = (1,7782 \cdot X) + 267,24$$

Y-Z é a altura em relação à linha de tendência.

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_1^N \text{abs}(Y - Z) = 4,90 \mu\text{m}$$

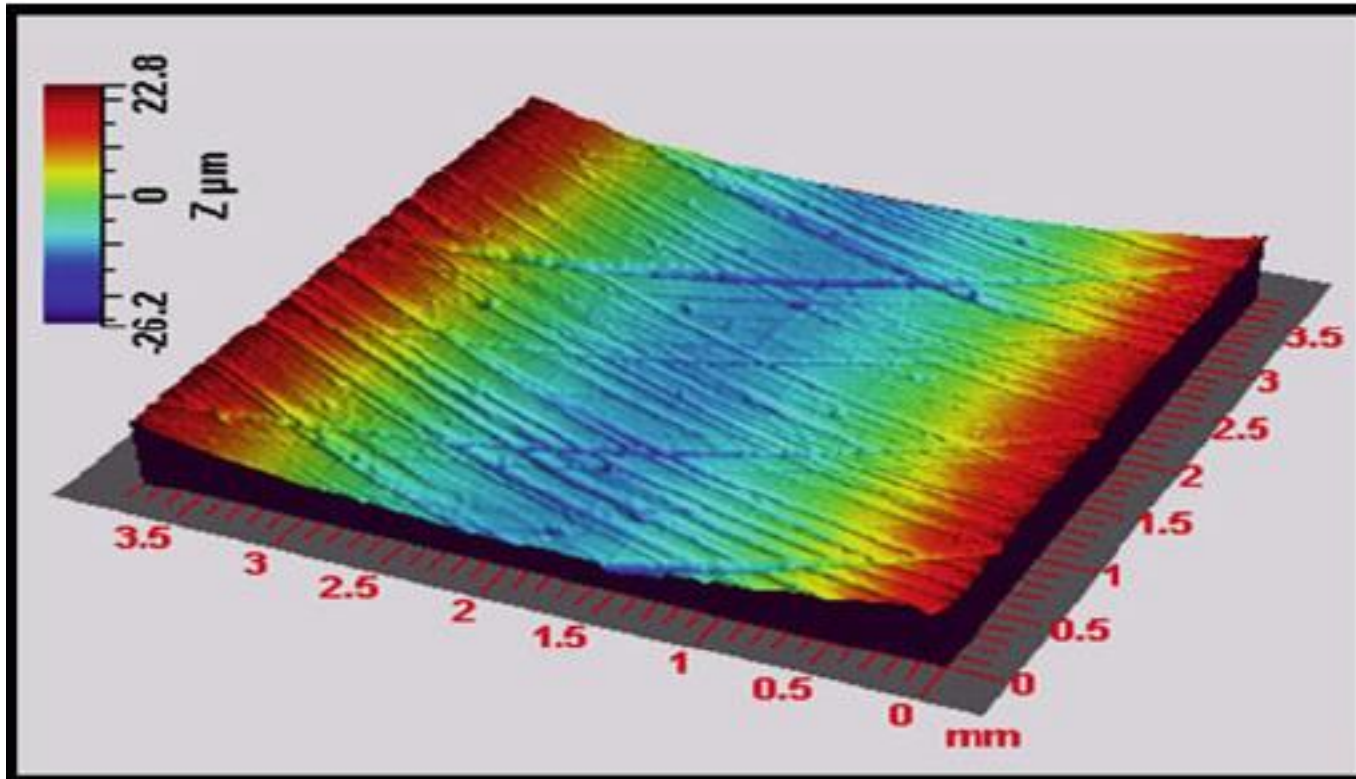
Correção pela linha de tendência:

- válida para perfil (2D)
- em 3D é válida só para pequenas inclinações

# Cuidados com a linha de referência

- Nivelamento de amostras desniveladas
- Remoção de forma de amostras não planas
- Evitar o uso de regiões das amostras que apresentem deformações

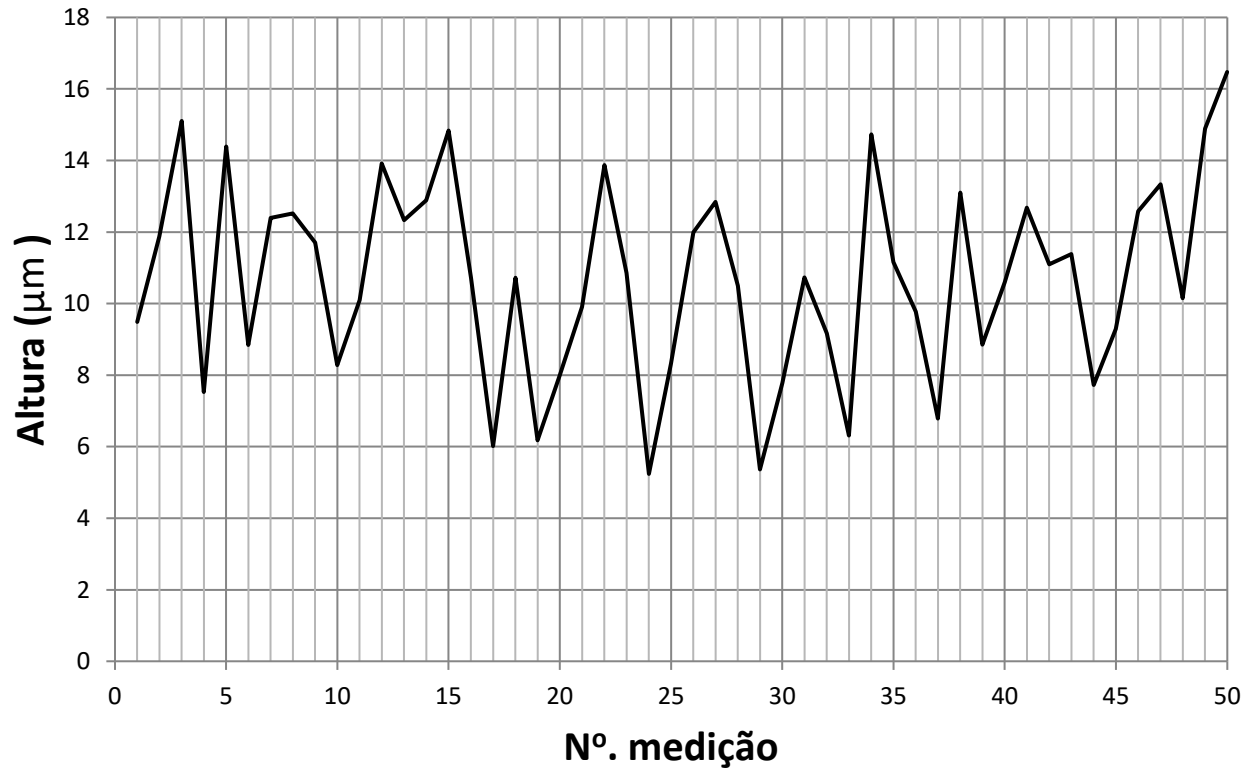
# Amostra com curvatura



©zah

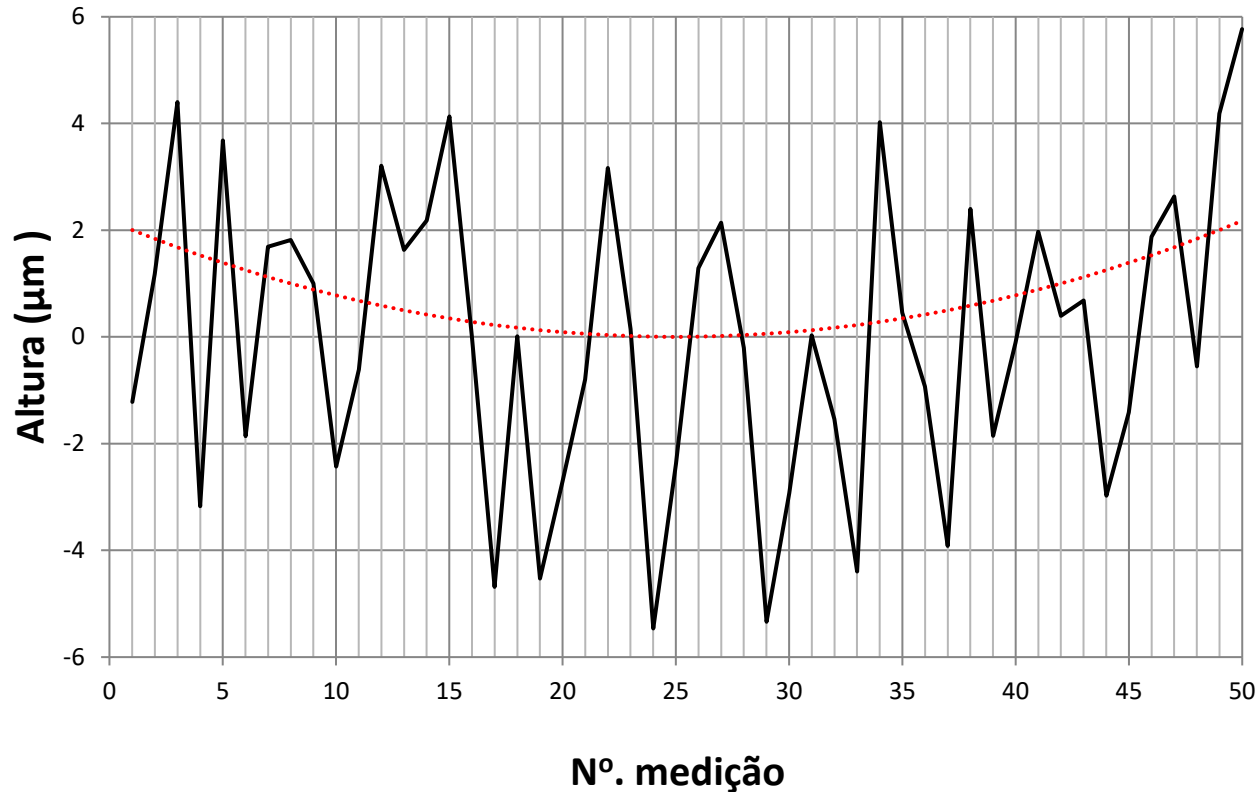
Amostra de camisa de um cilindro de motor evidenciando o processo de brunimento.

# Amostra com curvatura



Média: 10,7  $\mu\text{m}$   
(Pico/Vale) $\text{max}=11,2 \mu\text{m}$

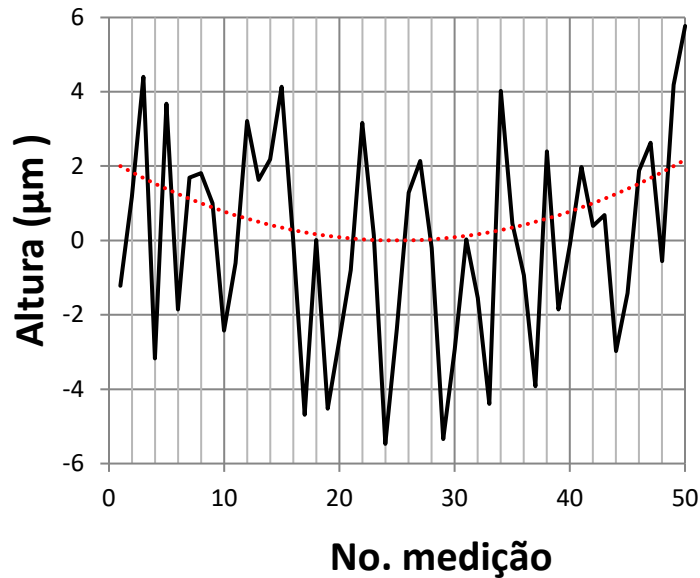
# Forma a remover



O conhecimento do processo indica que deve ser utilizada uma função de 2º grau (círculo), pois se trata do interior de um cilindro.

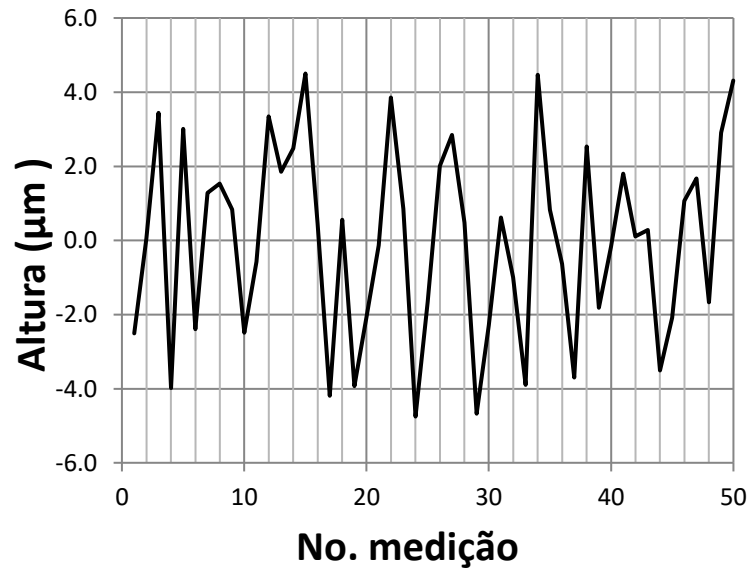
# Perfil antes e após remoção de forma

ANTES



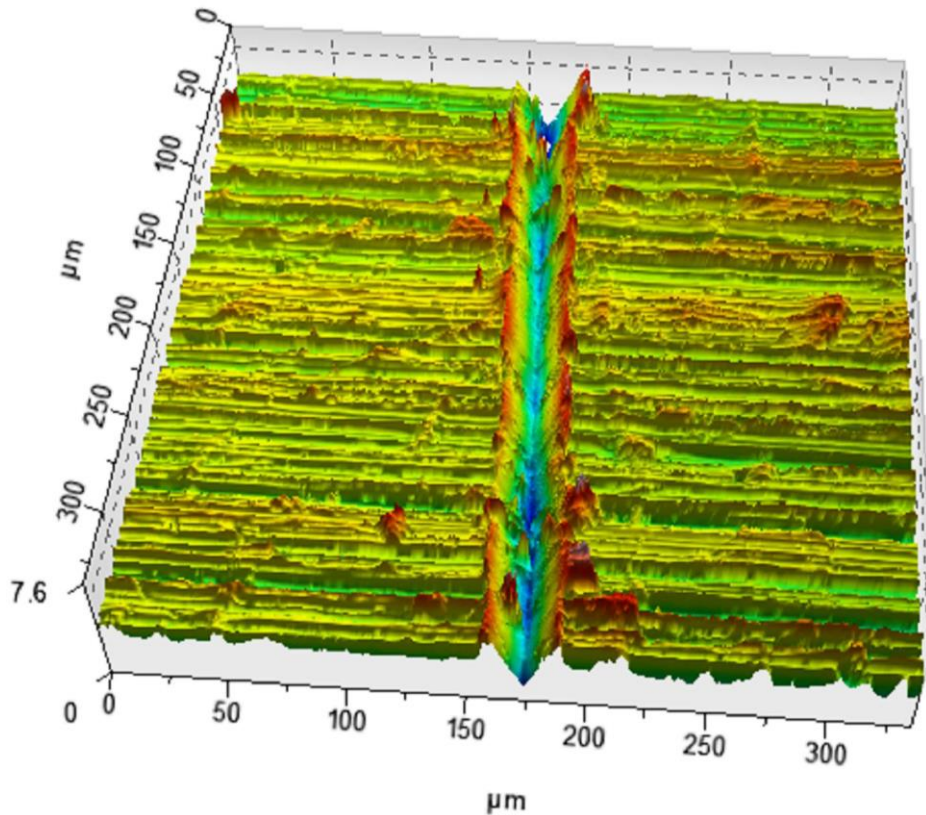
(Pico/Vale)max=11,2 µm

DEPOIS



(Pico/Vale)max= 9,3 µm

# Superfície com alteração



- A superfície apresenta a marca de um ensaio de riscamento.
- É necessário interagir de forma criteriosa com o perfilômetro para evitar que ele defina um plano de referência incluindo o risco.



# PARÂMETROS PADRONIZADOS

# Parâmetros numéricos

Muitos parâmetros propostos, inclusive por empresas  
(*parameter rash* na literatura em inglês)

$R_a$   
 $S_a$

$S_{mr1}$

$R_t$   
 $S_z$

$R_z$

$S_{dr}$

$R_{sk}$

$R_{sk}$   
 $S_{sk}$

$R_{pk}$   
 $S_{pk}$

Daimler Benz  
31007

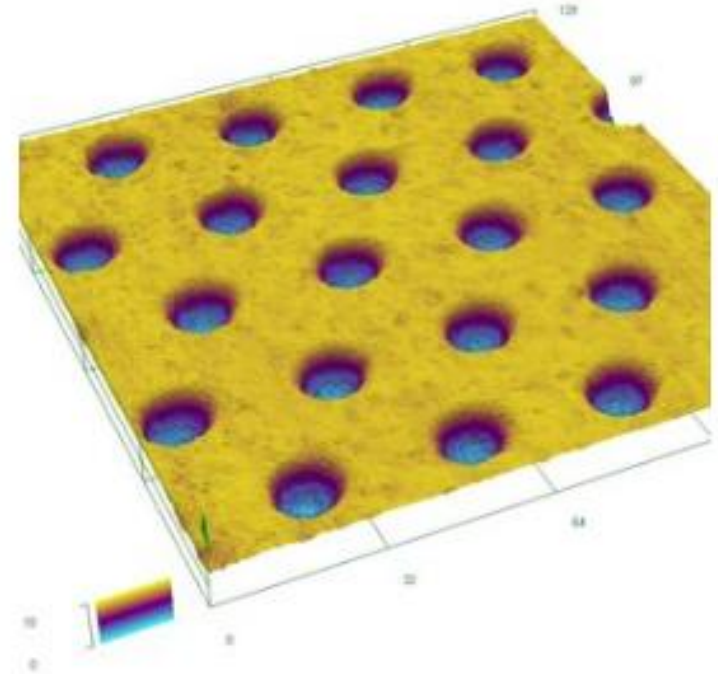
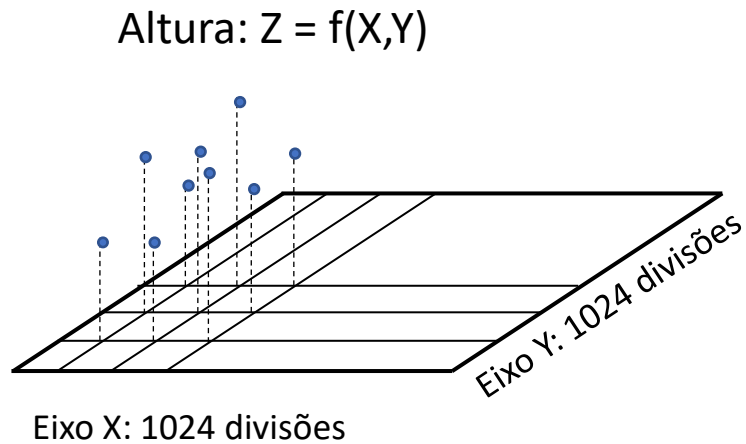
$R_{ku}$   
 $S_{ku}$

**Letra inicial "R.": extraído de perfil 2D**  
**Letra inicial "S.": extensão para 3D**

# Parâmetros 2D x 3D

- 2D: perfilômetros apalpam a superfície e geram um perfil da mesma; parâmetros se aplicam ao perfil.
- O uso de parâmetros 2D ainda é muito difundido.
- 3D: mais realistas; trabalham com uma região da superfície e não sobre um perfil. (ISO 25178-2)
- Alguns parâmetros 3D são extensões dos seus correspondentes 2D:  $S_a$  e  $R_a$ , por ex.
- Parâmetros 3D sem equivalente 2D: direção da textura da superfície ( $S_{td}$ )
- Cuidados para definir o plano de referência da superfície: análogos aos da linha de referência.

# Natureza dos parâmetros 3D



- Parâmetros de campo: usam todos os pontos medidos; alturas, por exemplo.
- Parâmetros de aspecto: focam características específicas da superfície; exemplo: volume de bacias (*dimples*).

# Norma ISO 25178-2 Surface texture

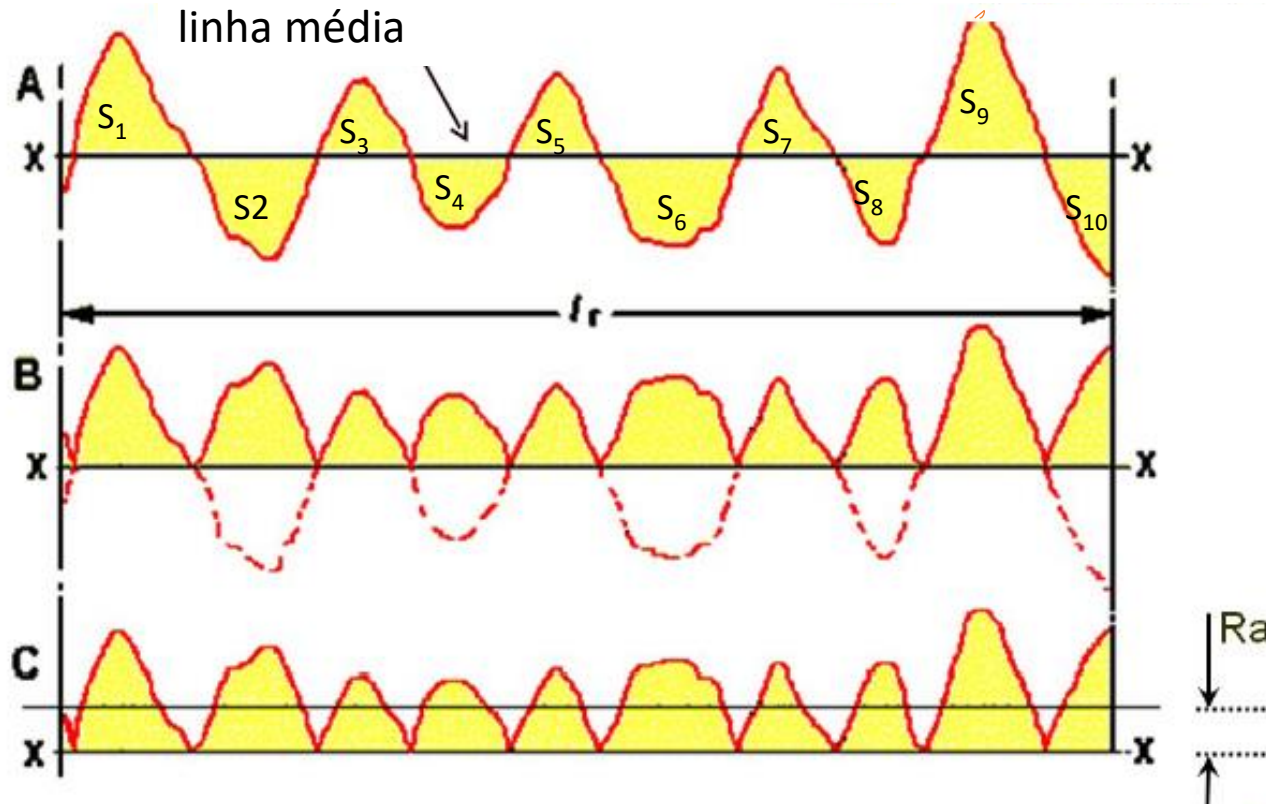
- Parâmetros de altura
- Parâmetros espaciais
- Parâmetros híbridos
- Parâmetros funcionais
- Parâmetros de aspecto

# Parâmetros básicos de altura

- $S_a/R_a$  : rugosidade média aritmética ( $\mu\text{m}$ )
- $S_q/R_a$  : rugosidade média quadrática ( $\mu\text{m}$ )
- $S_p/R_p$  : altura máxima de pico ( $\mu\text{m}$ )
- $S_v/R_v$  : profundidade máxima de vale ( $\mu\text{m}$ )
- $S_z/R_t$  : altura máxima pico/vale  $=S_p+S_v$  ( $\mu\text{m}$ )

# Rugosidade média aritmética – $R_a/S_a$

áreas iguais acima e abaixo da linha de referência:  $S_1 + S_3 + S_5 + S_7 + S_9 = S_2 + S_4 + S_6 + S_8 + S_{10}$



©thl

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)dx| \quad \text{ou} \quad R_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y(x)_i|$$

# Significado da igualdade de áreas

- Fisicamente a igualdade de áreas significa que o volume de material acima da linha de referência é igual ao volume de vazios abaixo da mesma.
- Em 2D (perfil) tratar material e vazio como iguais e obter a média aritmética ( $R_a$ ) é fácil.
- Em 3D algumas geometrias podem confundir.



# $R_a$ de superfície com perfil senoidal

- Equação da senoide

$$y = A \cdot \text{sen}(x)$$

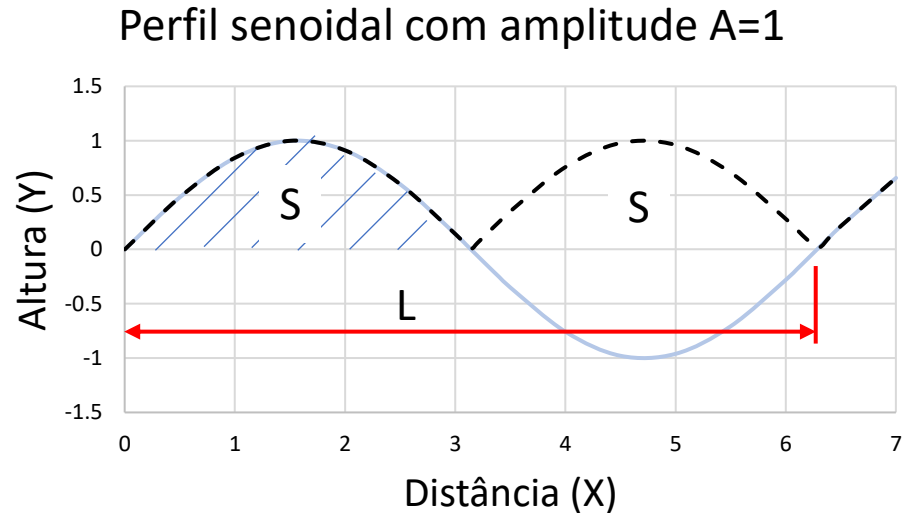
$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| dx = \frac{2S}{L}$$

$$S = \int_0^{\pi} A \cdot \sin x dx =$$

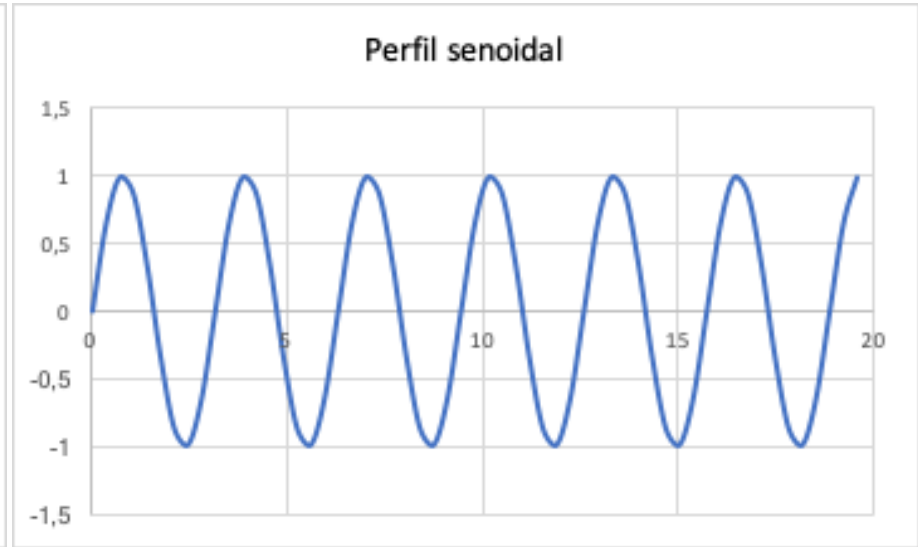
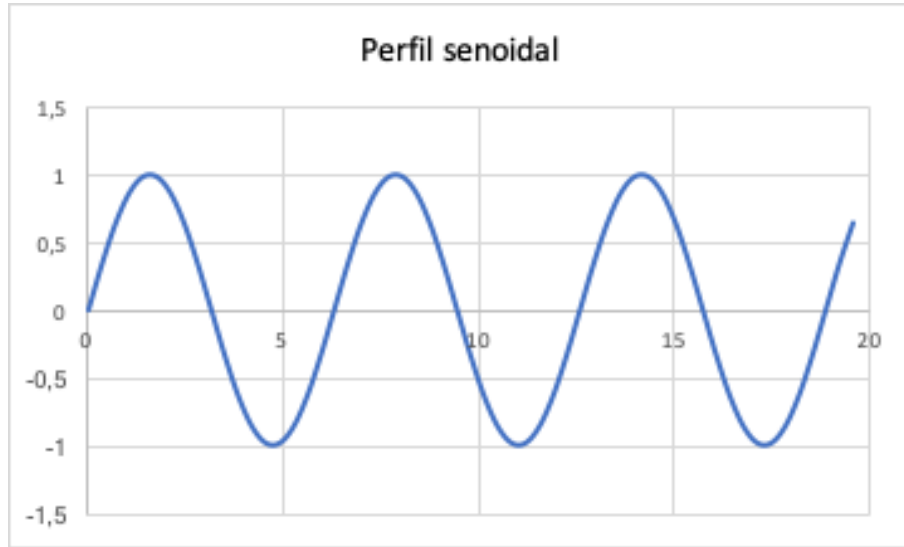
$$S = A \cdot [-\cos(\pi) + \cos(0)] = 2A$$

$$R_a = \frac{2S}{L} = \frac{4A}{2\pi} = \frac{2A}{\pi} \cong 0,64A$$

Conclusão:  $R_a$  não depende do comprimento de onda espacial, só da amplitude.

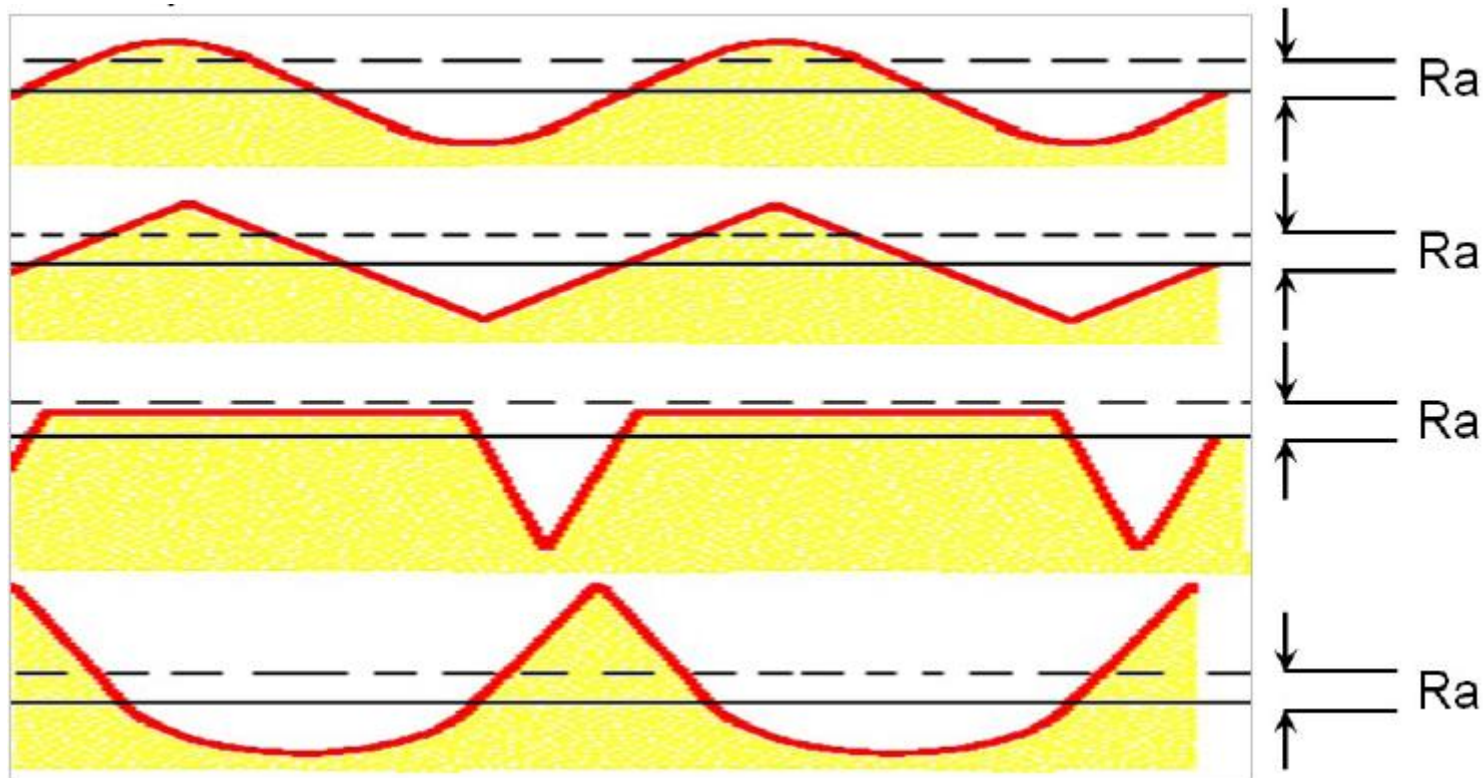


# Consequência



Mesma rugosidade média aritmética  
Mesmo  $R_a = 0,64$

# Problemas do parâmetro mais usado: $R_a/S_a$

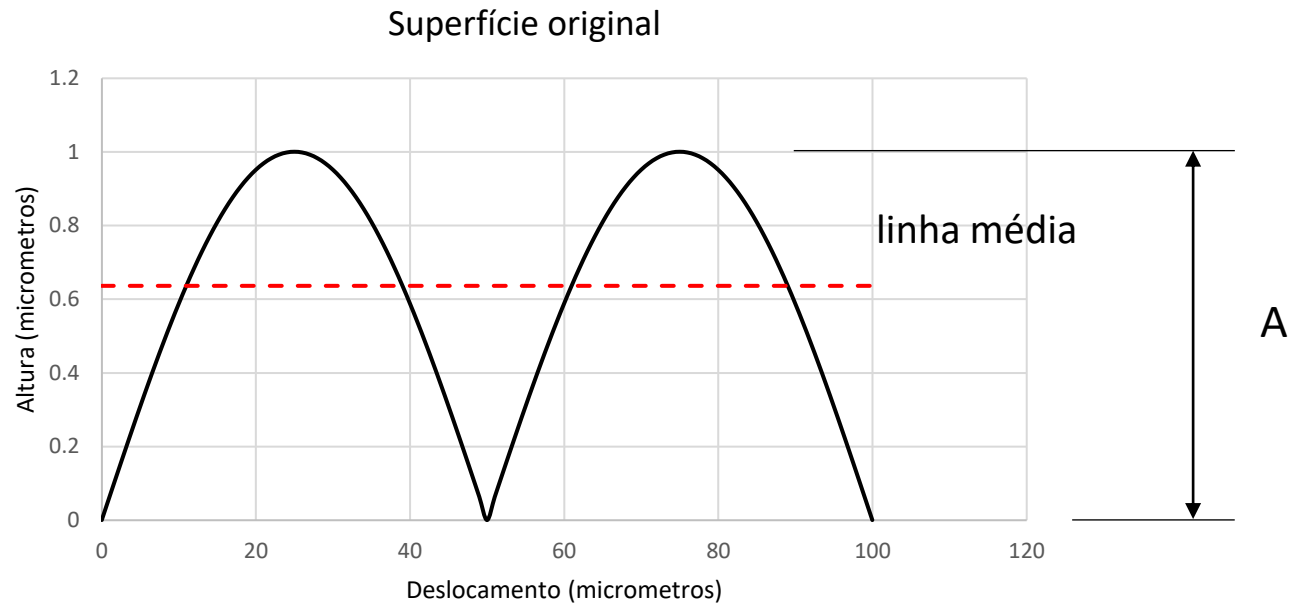


©thl

Superfícies muito diferentes com  
mesmo valor de  $R_a$ .

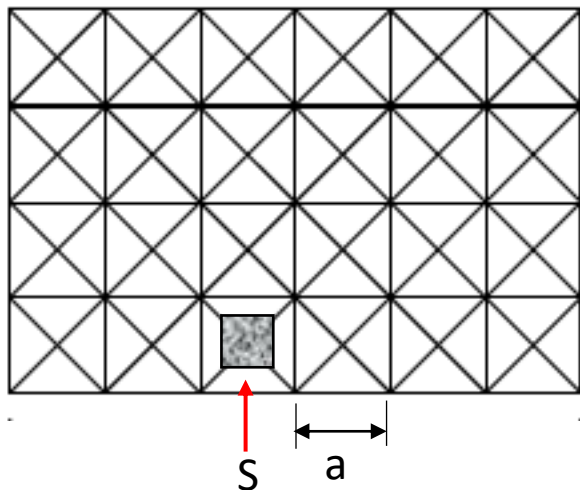
# $R_a$ de perfil semi-senoidal

$$y = |A \cdot \text{sen}(2\pi f x)|$$

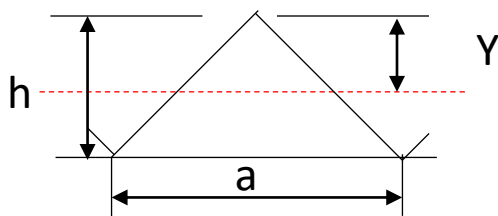


$$R_a = 0,268 A$$

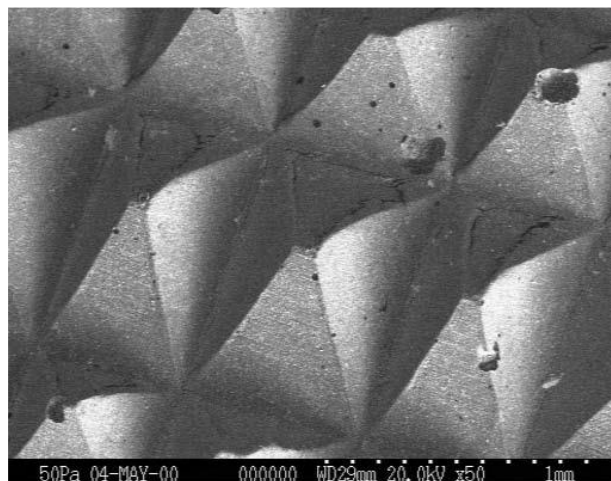
# Superfície estruturada



- Constituída por grãos de abrasivo de formato piramidal, base quadrada de lado “a” e altura “h”.
- Plano à distância “Y” abaixo do pico, cortando cada pirâmide numa área S.
- S varia com a altura de corte Y.
- Para o plano de corte ser um plano de referência, o volume de material acima dele tem que ser igual ao volume de vazios abaixo dele.

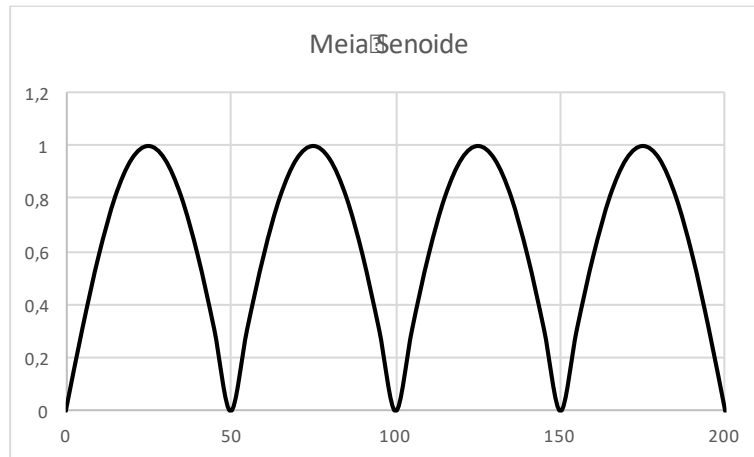


$$S_a = \frac{8}{27} \cdot h$$

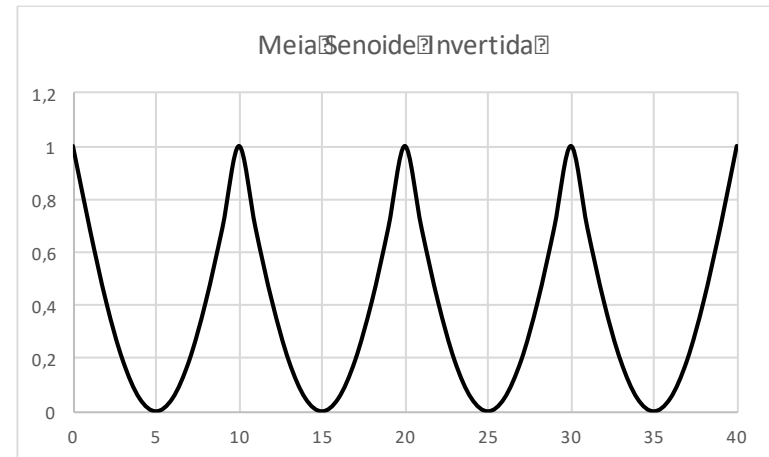


©car

# COMPARAÇÃO FUNCIONAL

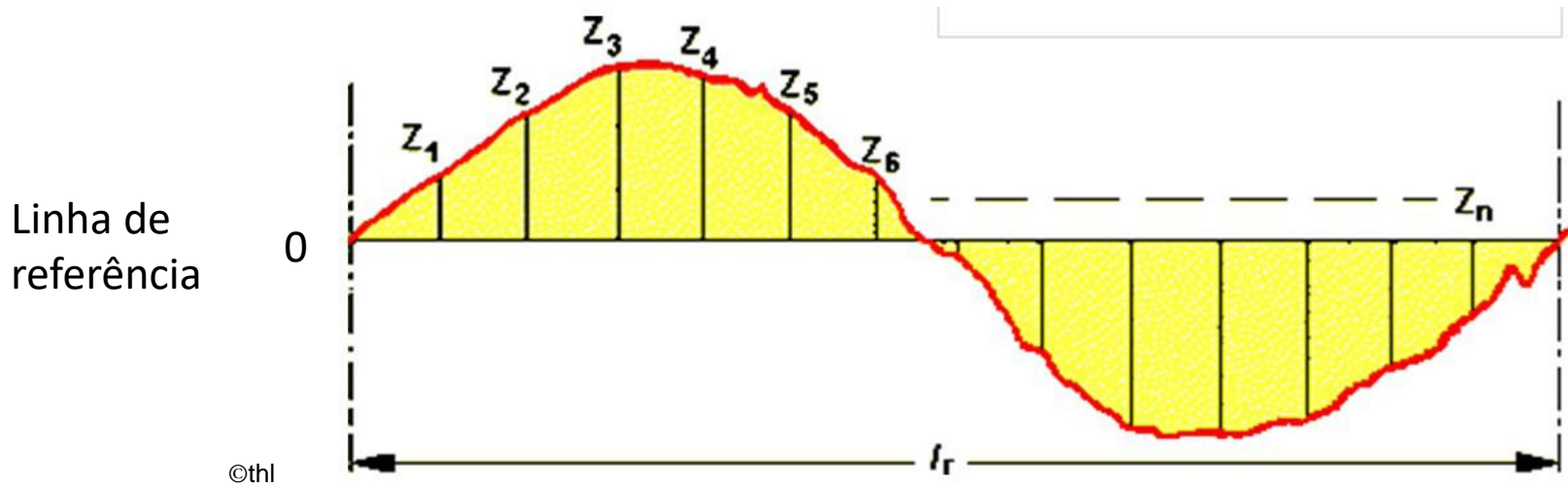


a) bom suporte, mau travamento



b) resistência ao deslocamento, mau suporte

# Rugosidade RMS – $R_q/S_q$



$$R_q = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i^2}$$

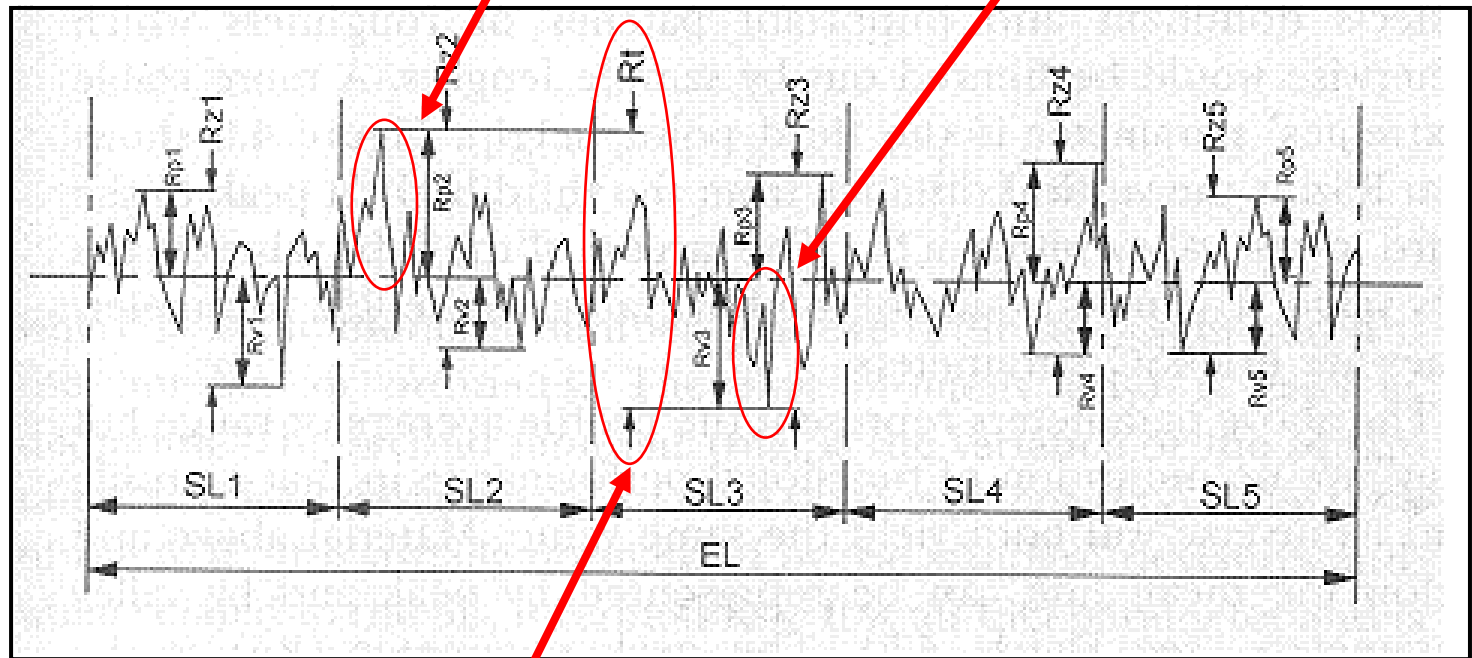
Para uma superfície gaussiana:

- $R_q = \sigma$  (*desvio padrão*)
- $R_q = \frac{\sqrt{2\pi}}{2} R_a \cong 1,25 R_a$

$$S_p (R_p), S_v (R_v), S_z (R_t)$$

$R_p$  = altura máxima de pico

$R_v$  = altura máxima de vale



©mar

$R_t$  = altura máxima pico a vale

$$R_t = R_p + R_v$$

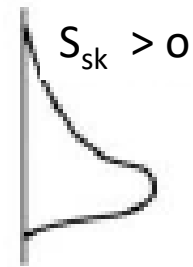
$$S_z = S_p + S_v$$



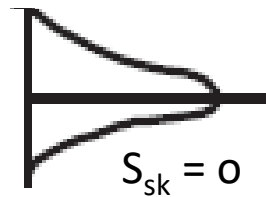
$S_{sk}$  e  $S_{ku}$

- Parâmetros definidos em norma ISO
- Correspondem aos parâmetros estatísticos:
  - $S_{sk}$  : assimetria (*skewness*)
  - $S_{ku}$  : curtose

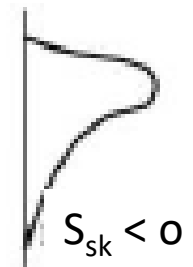
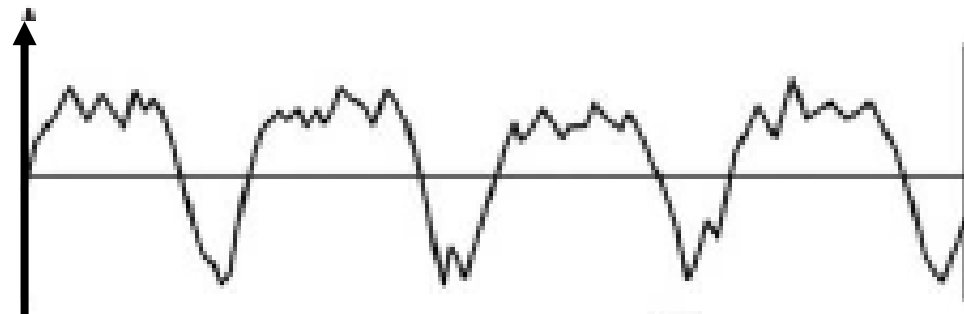
# Parâmetro de assimetria- $R_{sk}/S_{sk}$



$$S_{sk} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{X_i - \mu}{\sigma} \right)^3$$



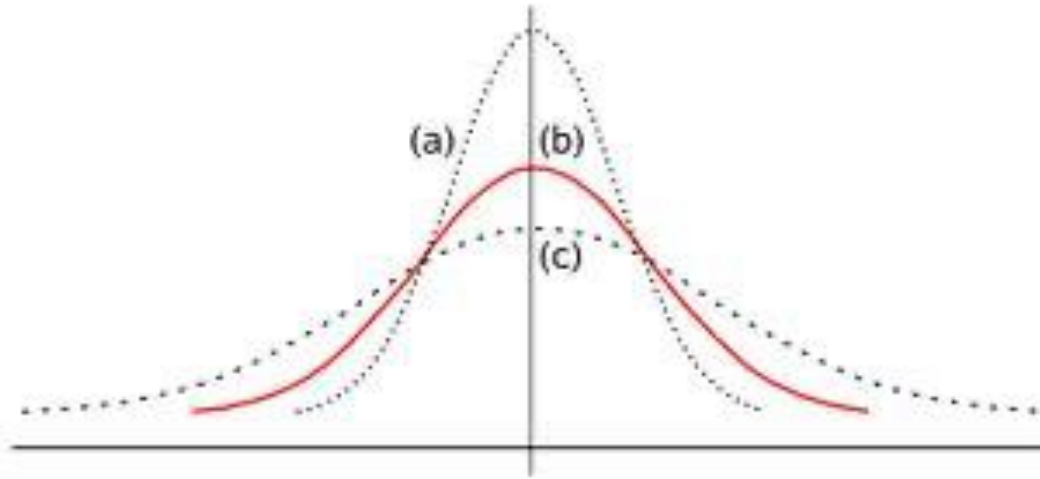
ou



$$R_{sk} = \frac{1}{R_q^3} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y(x)^3$$

©hex

# Parâmetro de curtose- $R_{ku}/S_{ku}$

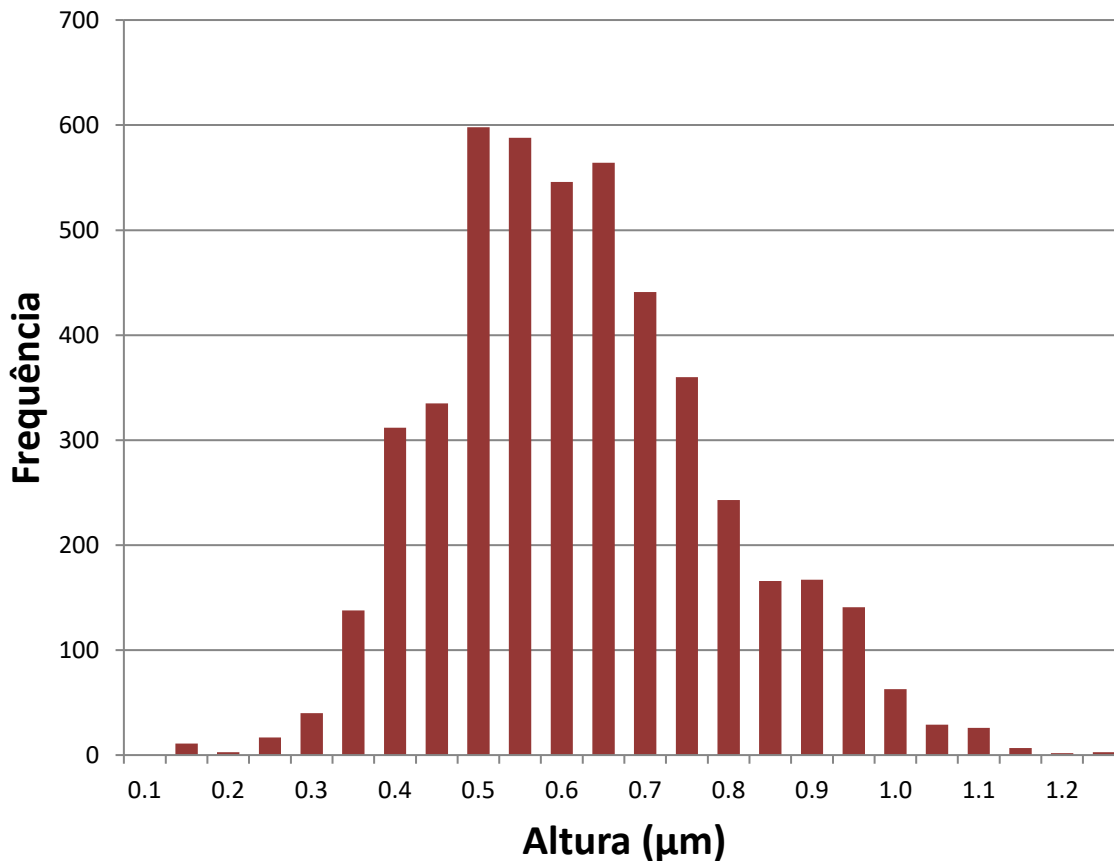


$$S_{ku} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{X_i - \mu}{\sigma} \right)^4$$

- A distribuição normal, curva (b), tem curtose = 3
- A curva (a) é dita leptocúrtica:  $R_{ku} > 3$
- A curva (c) é dita platicúrtica:  $R_{ku} < 3$
- As áreas sob todas as curvas são unitárias (100% de probabilidade).
- A curtose é associada ao achatamento da distribuição, mas é preciso considerar tanto a concentração de valores próximos à média como a “espessura” das caudas.

# Parâmetros de uma distribuição de alturas

## Corpo de prova retificado



### Parâmetros de posição

- Média:  $0,599 \mu\text{m}$
- Moda:  $0,500 \mu\text{m}$
- Mediana:  $0,583 \mu\text{m}$

### Parâmetros de dispersão

- Amplitude:  $1,10 \mu\text{m}$
- Desvio-padrão:  $0,175 \mu\text{m}$

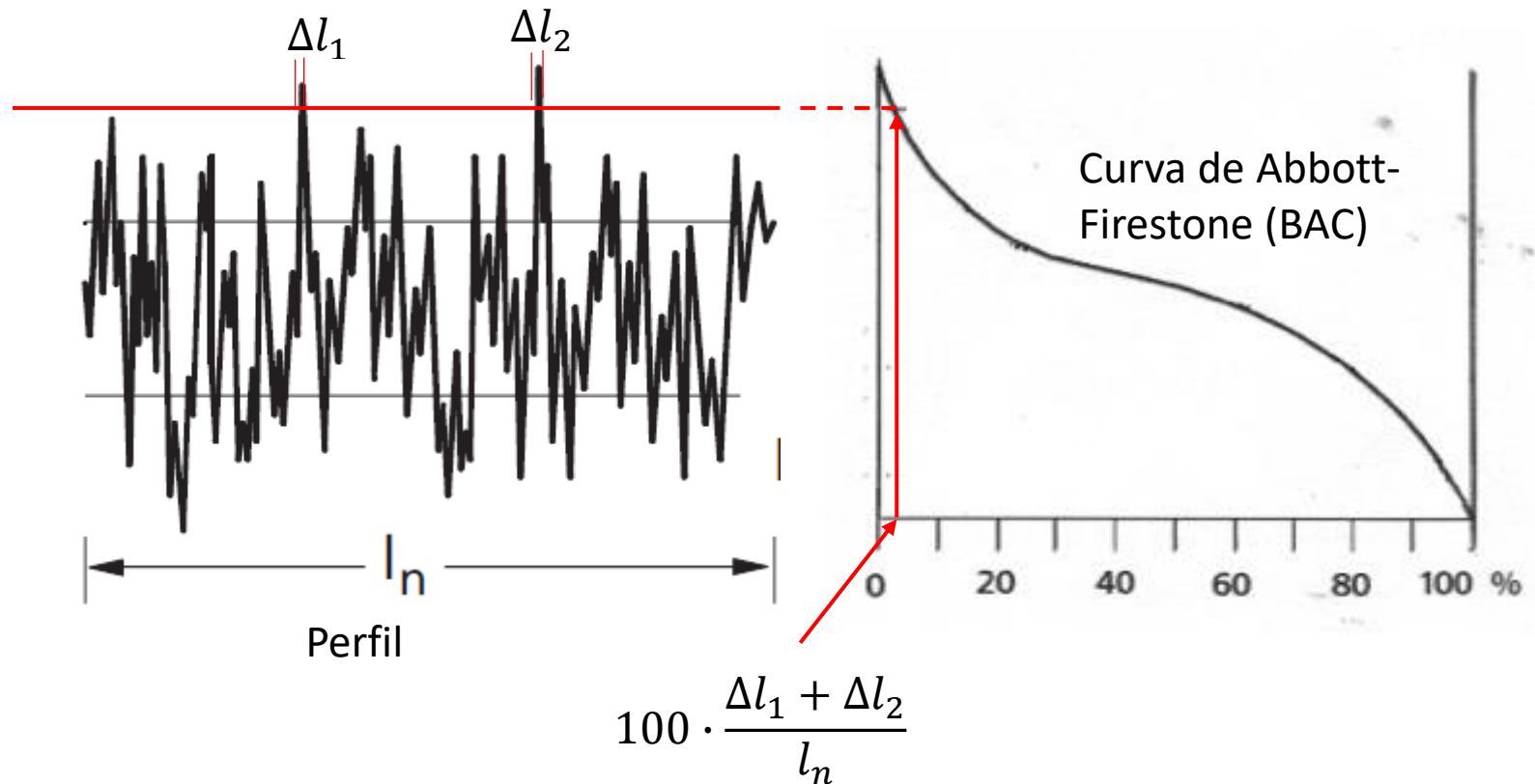
### Parâmetros de forma

- Assimetria:  $S_{sk} = 0,45$
- Curtose:  $S_{ku} = 3,07$

$S_{sk}$  próximo de zero e  $S_{ku}$  próximo de 3 indicam a validade da aproximação pela normal.

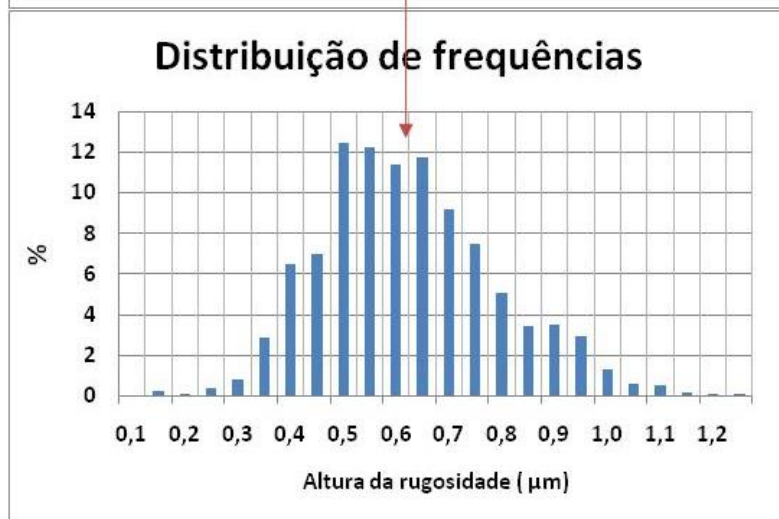
# A CURVA DE ABBOT-FIRESTONE

# Curva de Abbott-Firestone (BAC – bearing area curve)

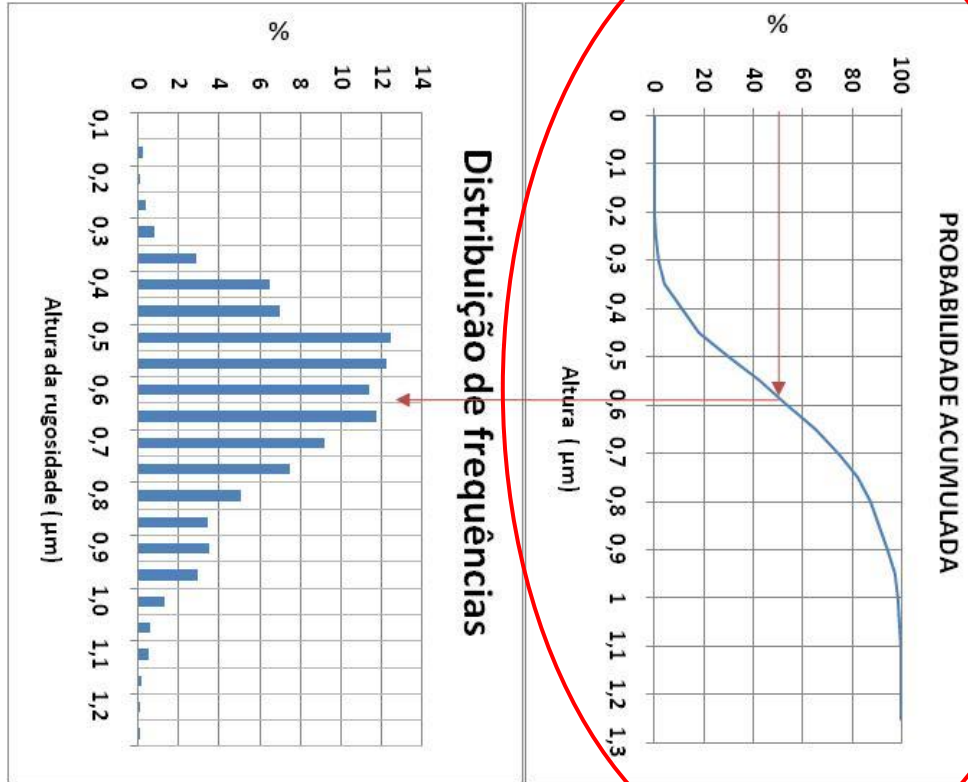


- Valores no eixo vertical da BAC: do vale mais profundo ao pico mais alto ( $S_z$ ).
- A BAC apresenta, sob outra forma, a curva de distribuição de probabilidade acumulada.

# Probabilidade acumulada



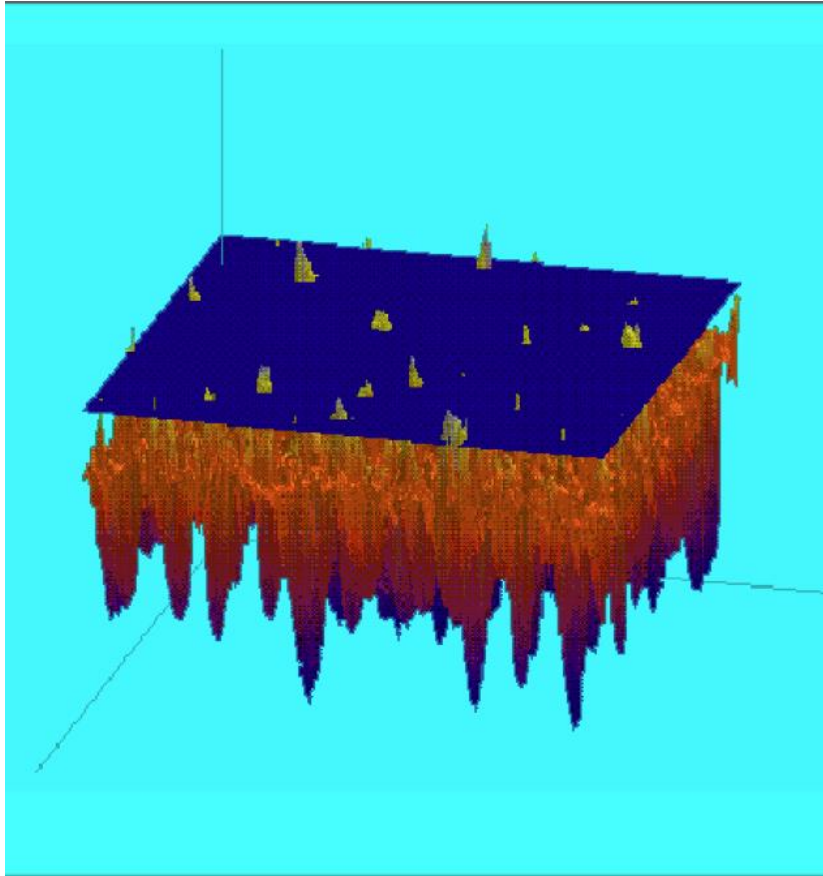
# Função de distribuição de probabilidade (90°)



Curva de Abbott-Firestone



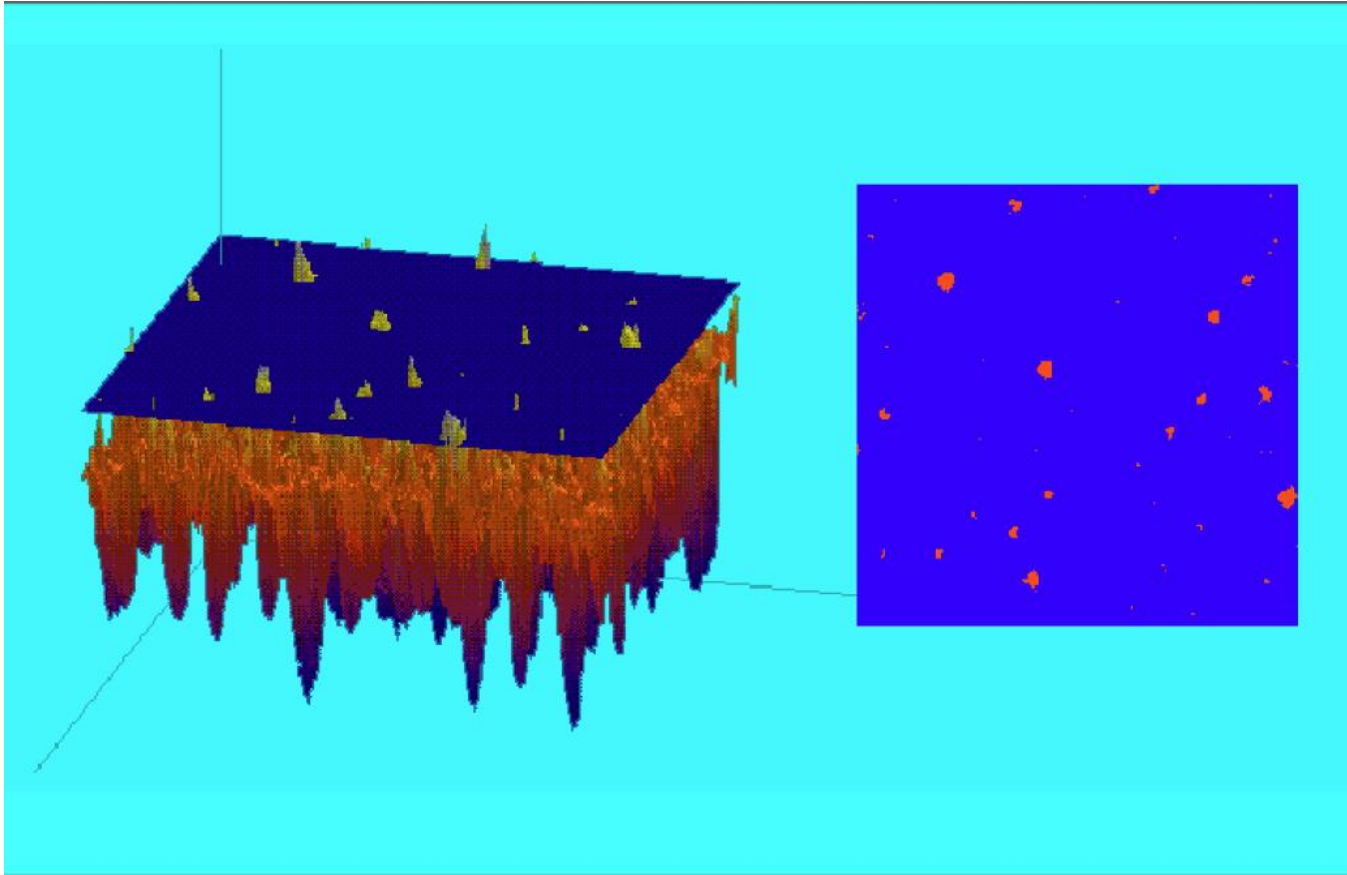
# Curva de Abbott-Firestone em 3D



©sta

- Plano paralelo ao plano de referência, cortando a superfície a uma certa altura.
- Alguns dos picos têm altura maior do que a altura do plano de corte em relação ao plano de referência.

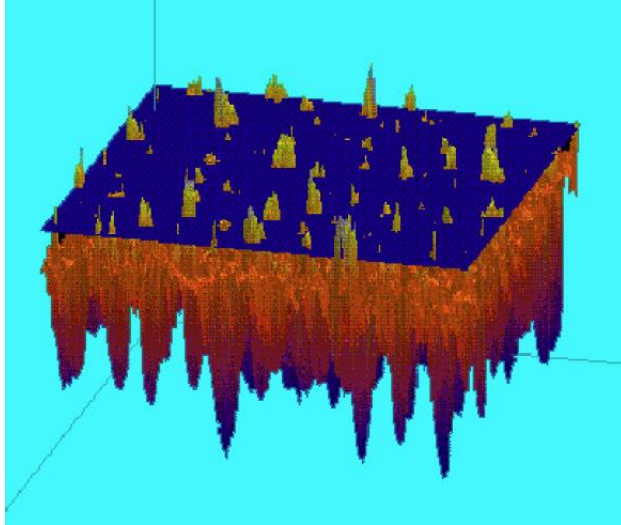
# Curva de Abbott-Firestone em 3D



©sta

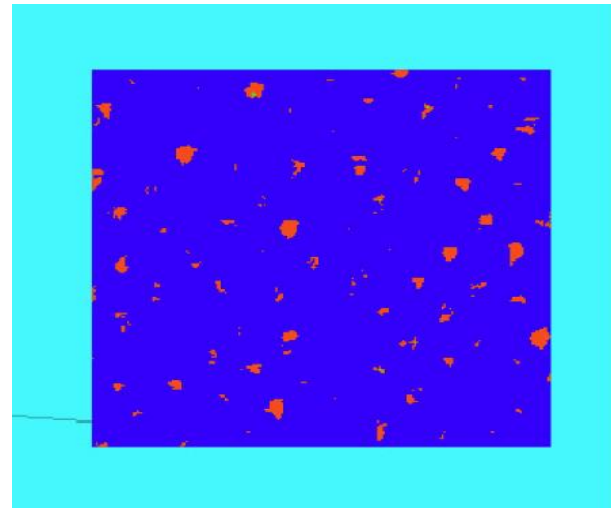
À direita na figura vê-se um “mapa” das seções dos picos cortados pelo plano.

# Área real de contato



©sta

- Novo “mapa” com o plano de corte mais avançado em direção ao interior da superfície.
- Admitindo o desgaste dos picos, a área real de contato do plano com a superfície será uma fração da área total (abscissa da curva de Abbott-Firestone).
- A fração de contato é denominada “razão portante” na NBR ISO 4287 (*bearing ratio* ou *material ratio* na literatura em inglês).



# Em resumo:

O eixo horizontal da curva de Abbott-Firestone expressa:

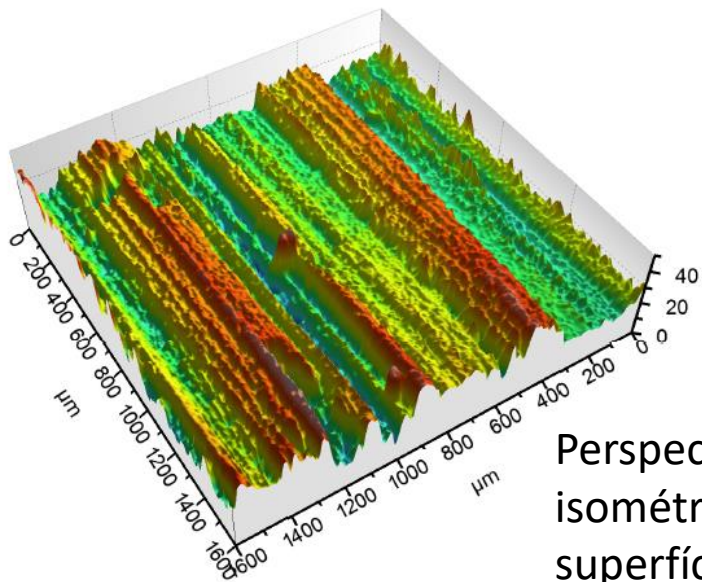
- Em 2D: a fração do comprimento total do perfil que se encontra acima de uma certa altura.
- Em 3D: a fração da área total analisada que se encontra acima de uma certa altura.

©mar

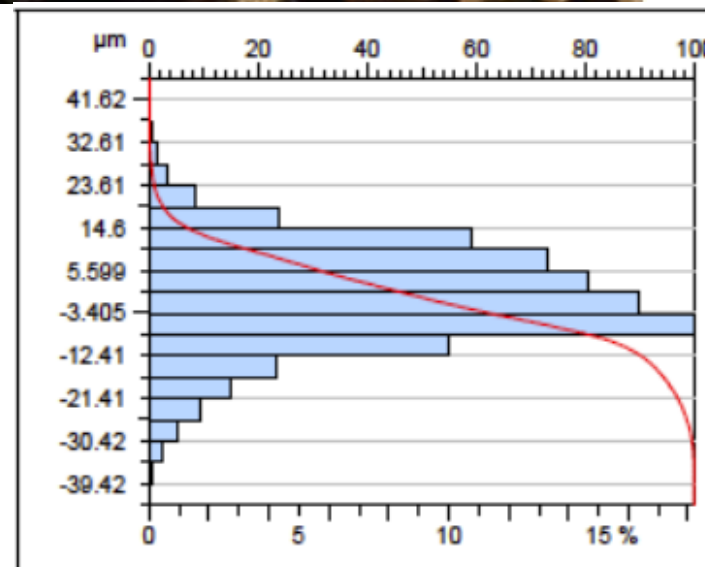
# Trilho recém esmerilhado



Boleto



Perspectiva isométrica da superfície



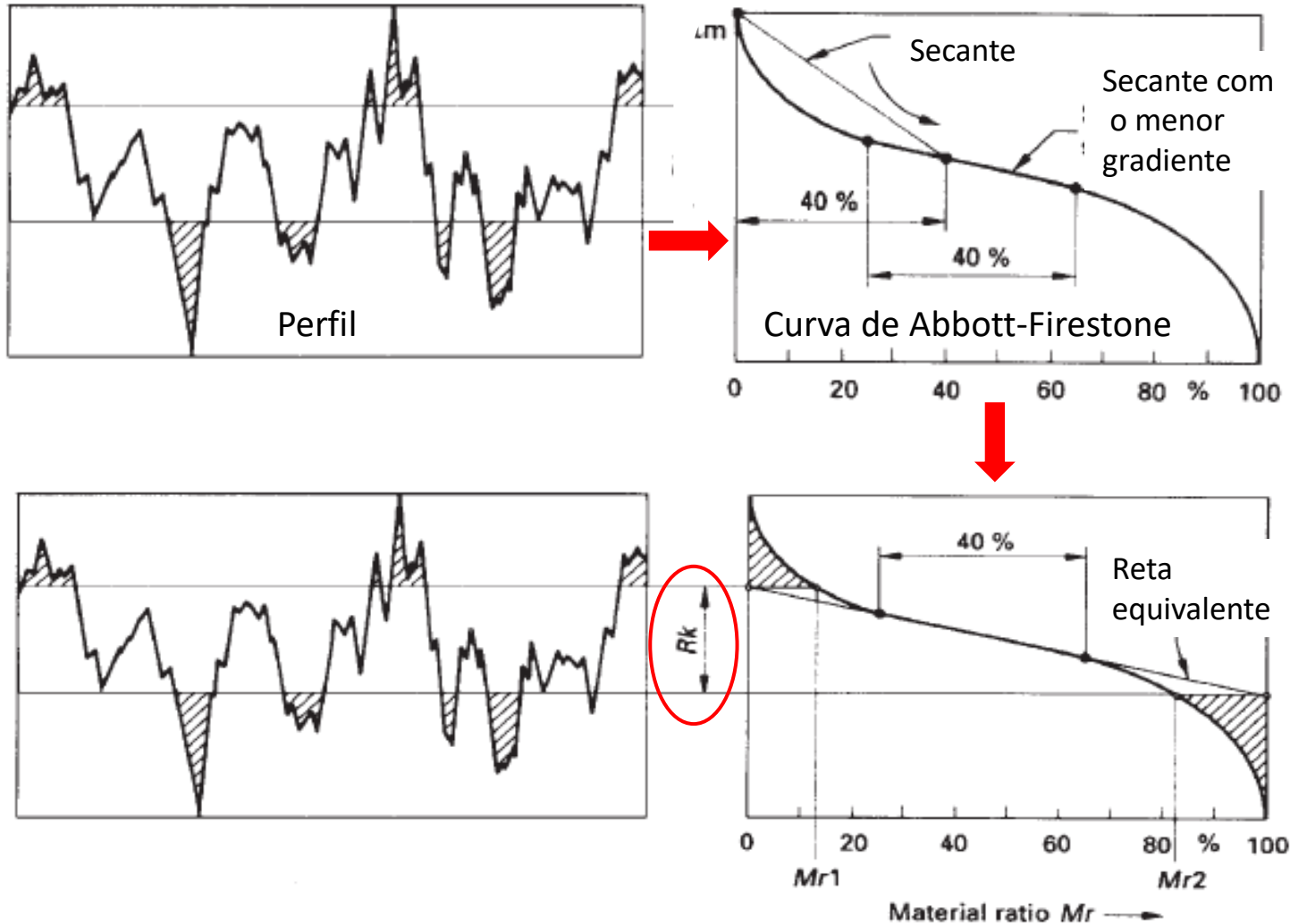
Distribuição de alturas e curva de Abbott-Firestone

# PARÂMETROS FUNCIONAIS E DE VOLUME

# Parâmetros funcionais e de volume

- $S_k(R_k)$ : altura do “núcleo” da superfície
- $S_{pk}(R_{pk})$ : altura reduzida dos picos
- $S_{vk}(R_{vk})$ : altura reduzida dos vales
- $V_{mp}$ : volume de material por unidade de área relativo aos picos acima do núcleo
- $V_{mc}$ : volume de material por unidade de área no “núcleo”
- $V_{vc}$ : volume de vazios por unidade de área no núcleo
- $V_{vv}$ : volume de vazios por unidade de área nos vales abaixo do núcleo

# Definição da altura do núcleo $S_k/R_k$ ( $\mu\text{m}$ )



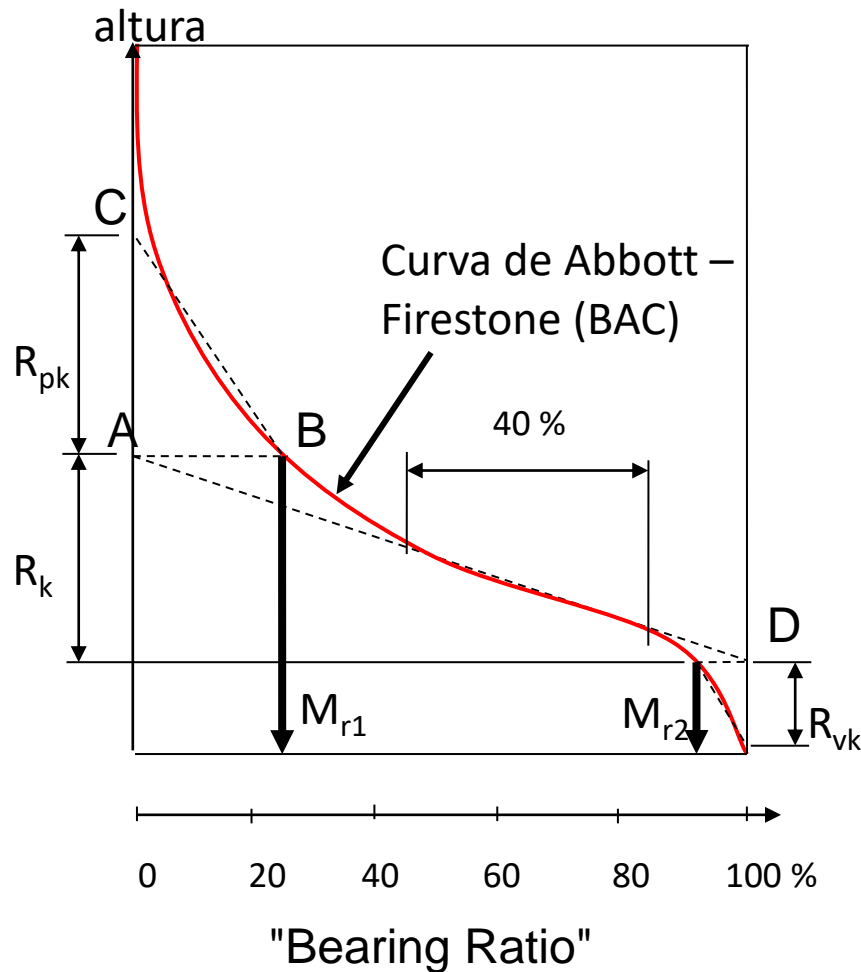
Secantes com extremos sobre a curva.

Projeção das secantes cobrindo 40% da escala horizontal.

- Prolongamento das extremidades da secante de menor inclinação.
- Intersecções da reta equivalente com verticais a 0% e 100% de "bearing ratio" definem a altura do núcleo =  $R_k$ .



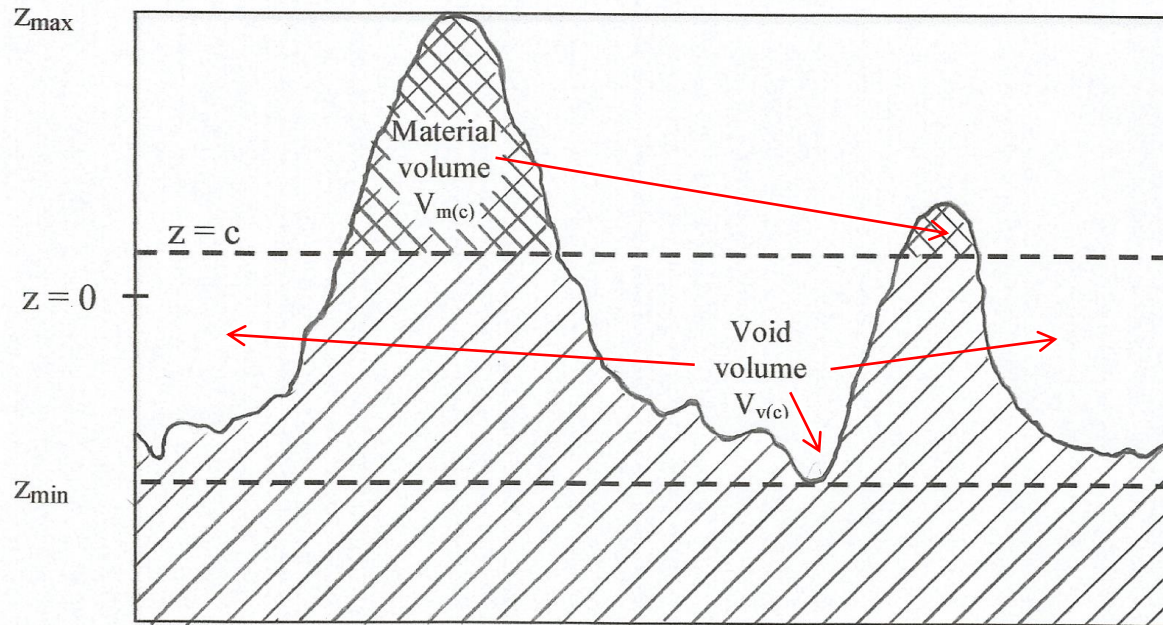
# Obtenção de $R_{pk}/S_{pk}$ , $R_{vk}/S_{vk}$ , $M_{r1}/S_{mr1}$ e $M_{r2}/S_{mr2}$



- A reta AD é a extensão da secante de menor inclinação.
- De A traçar uma reta horizontal até encontrar a curva em B.
- Ponto C: a área do triângulo ABC deve ser igual à área limitada por AB e pela curva.
- $AC = R_{pk}$ .
- $M_{r1}$ : porcentagem de material acima do núcleo.
- $100 - M_{r2}$ : porcentagem de vazios abaixo do núcleo.
- O cálculo de  $R_{vk}$  é análogo.

Procedimento igual para os parâmetros em 2D e 3 D.

# Parâmetros de volume ( $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$ )

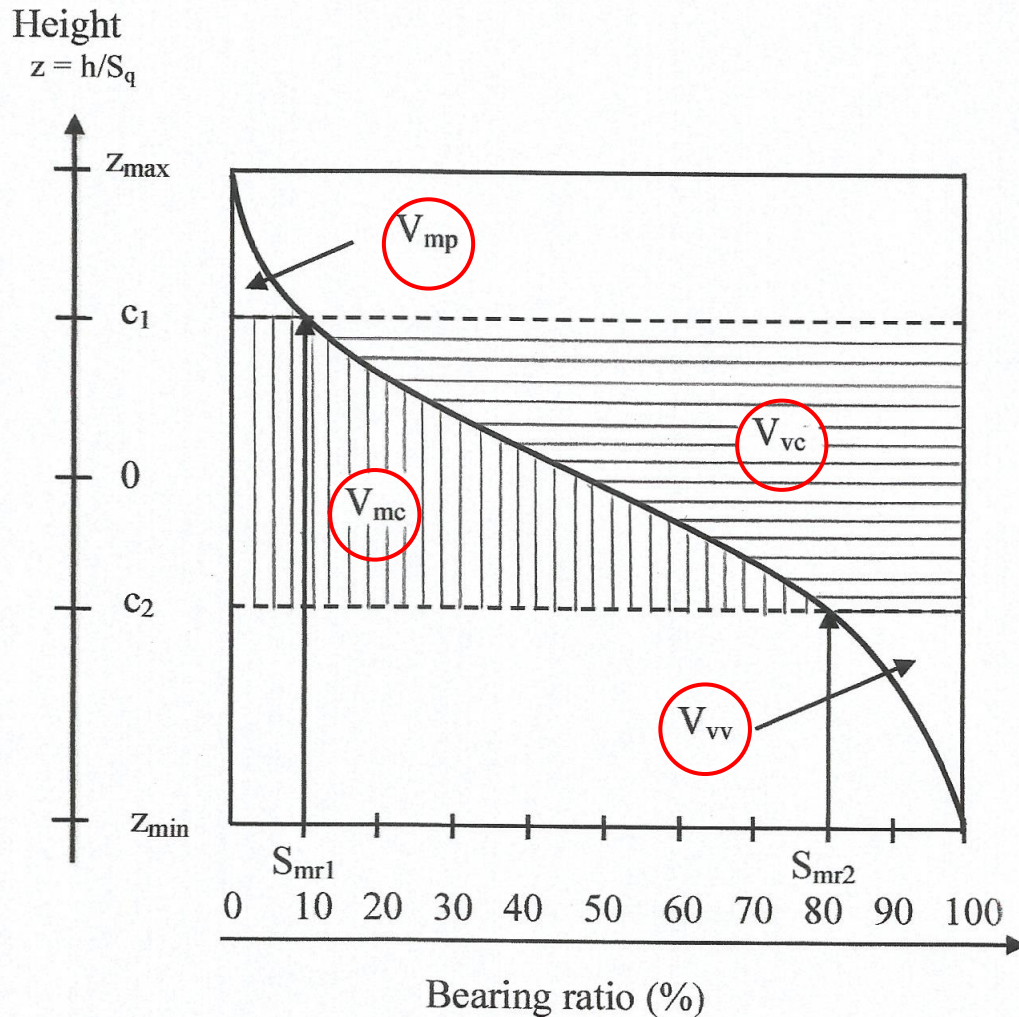


$V_{m(c)}$ : volume de material acima de um plano que corta a superfície a uma altura  $c$ .

$V_{v(c)}$ : volume de vazios abaixo do plano que corta a superfície a uma altura  $c$ .

©sto

# BAC e parâmetros de volume



- $V_{mp}$ : volume de material acima de  $S_{mr1}$ .
- $V_{mc}$ : volume de material no núcleo ("core").
- $V_{vc}$ : volume de vazios no núcleo.
- $V_{vv}$ : volume de vazios abaixo de  $S_{mr2}$ .

Default da Norma:

$$S_{mr1} = 10\%$$

$$S_{mr2} = 80\%$$

**Atenção:  $c_1$  e  $c_2$  não são os valores que definem  $Sk$ .**

©bla

# ISO 25178, 13565, Mahr et al: erro!

$R_k$ ,  $R_{pk}$ ,  $R_{vk}$ ,  $M_{r1}$ ,  $M_{r2}$

## DIN EN ISO 13565-1 and -2

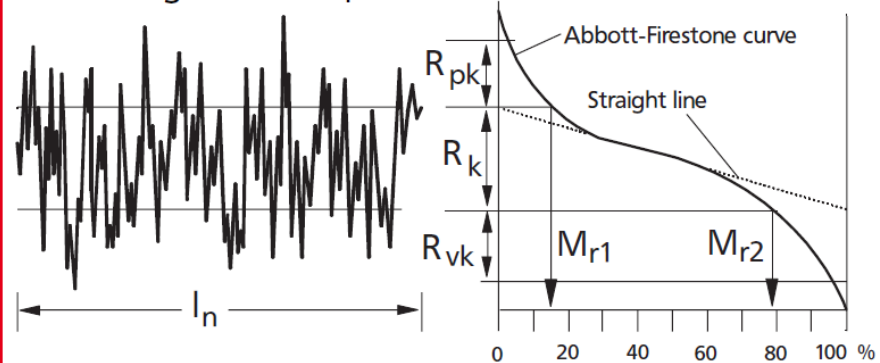
The roughness profile as per 13565-1 is generated by a special filtering technique minimizing profile distortions due to deep valleys in plateau profiles. A straight line divides the Abbott-Firestone curve into three areas from which the parameters are then computed as per 13565-2:

**Core roughness depth  $R_k$**  is the depth of the roughness core profile.

**Reduced peak height  $R_{pk}$**  is the mean height of the peaks protruding from the roughness core profile.

**Reduced valley depth  $R_{vk}$**  is the mean depth of the valleys protruding from the roughness core profile.

$M_{r1}$  and  $M_{r2}$  are the smallest and the highest material ratios of the roughness core profile.

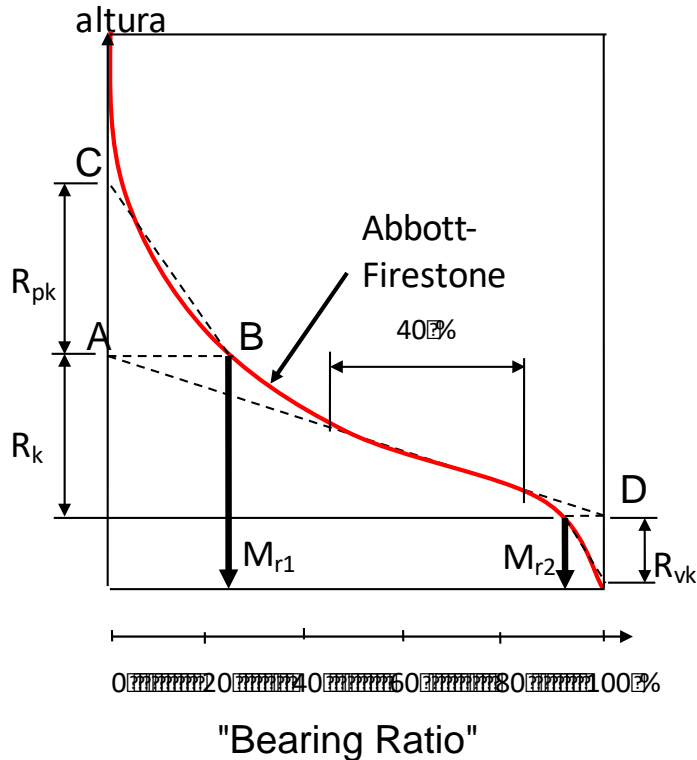


ERRADO!

ERRADO!

©mar

# Conceituação correta de $S_{pk} / R_{pk}$



Área limitada por AB (0 a  $M_{r1}$ ) e pela curva de Abbott-Firestone é o volume de material acima do núcleo ( $V_{mp}$ ) como indicado na norma.

Esse volume também pode ser expresso em termos de altura média:

$$V_{mp} = (\text{altura média de picos acima de A}) \times M_{r1}$$

Seguindo a Norma, a área do triângulo ABC deve ser igual a  $V_{mp}$ :

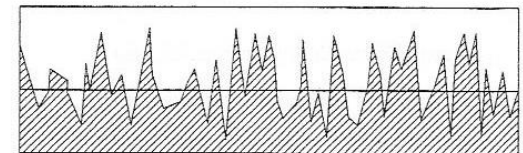
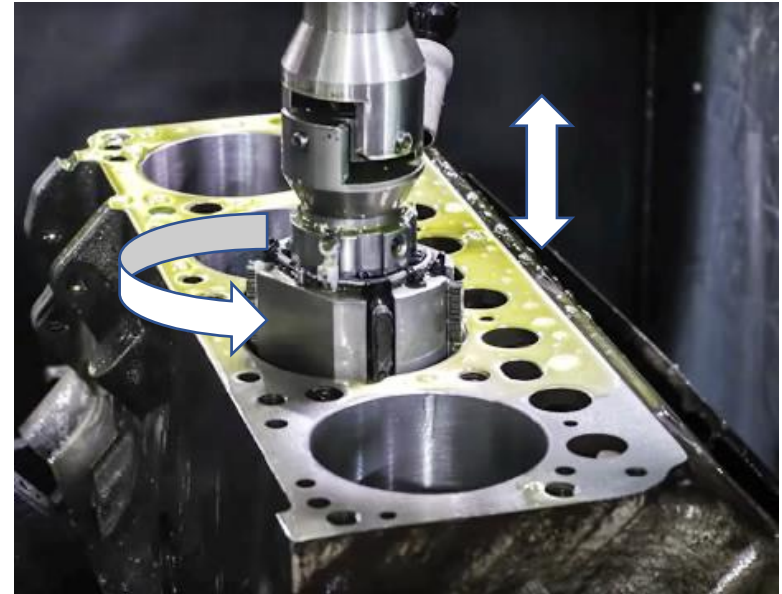
$$\frac{1}{2} S_{pk} \times M_{r1} = V_{mp} = \text{altura média} \times M_{r1}$$

$$\therefore \text{A altura média de picos acima de A} = \frac{1}{2} S_{pk}$$

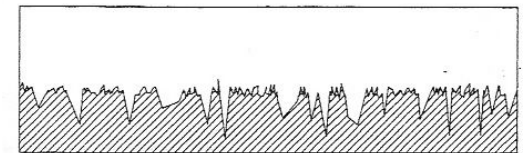
Franco, L.A. e Sinatora, A., *3D surface parameters (ISO 25178-2): Actual meaning of  $S_{pk}$  and its relationship to  $V_{mp}$* , Precision Engineering 40, 2015.

# Processos em sequência

- Uso pela indústria de processos sucessivos de acabamento superficial.
- Exemplo importante: brunimento de platô (plateau honing) em camisas de cilindros de motores de combustão interna.
- Descrição simplificada:
  - Etapa inicial com ferramenta de granulometria mais grosseira.
  - Geração de superfície com sulcos profundos, úteis para retenção de óleo lubrificante.
  - Segunda etapa com ferramenta de granulometria fina.
  - Remoção dos picos mais altos da textura superficial.
  - Criação de platô com área de sustentação adequada para o contato.

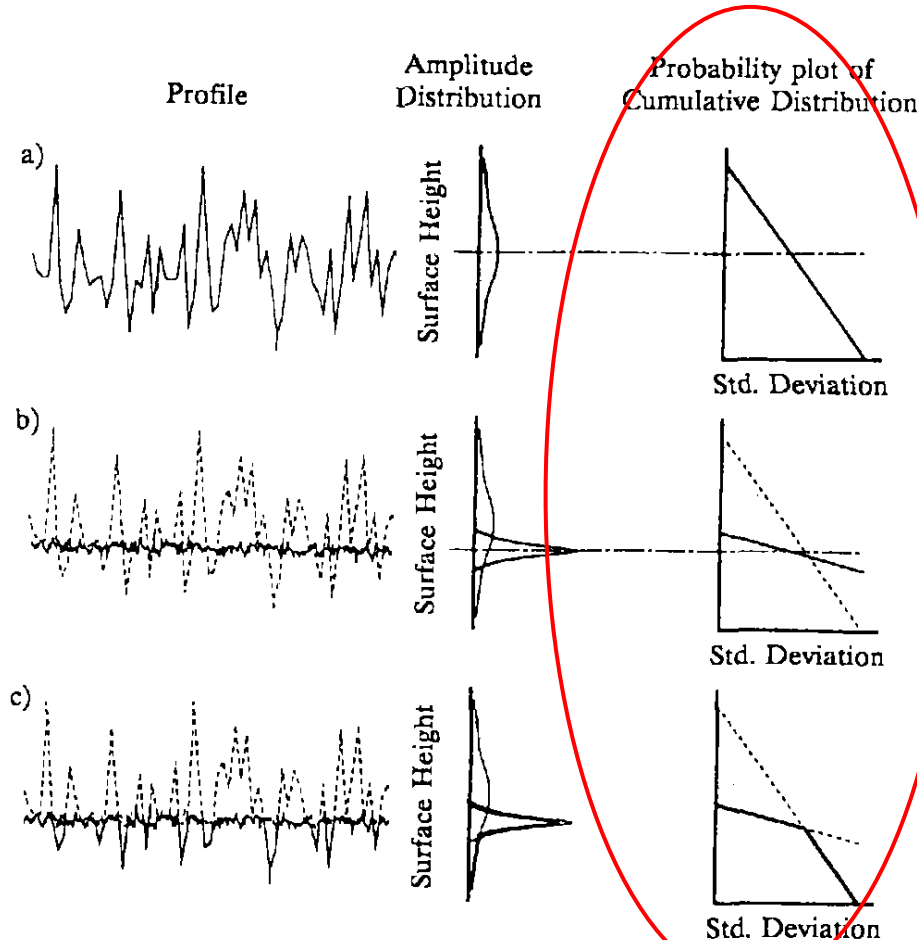


©rfm

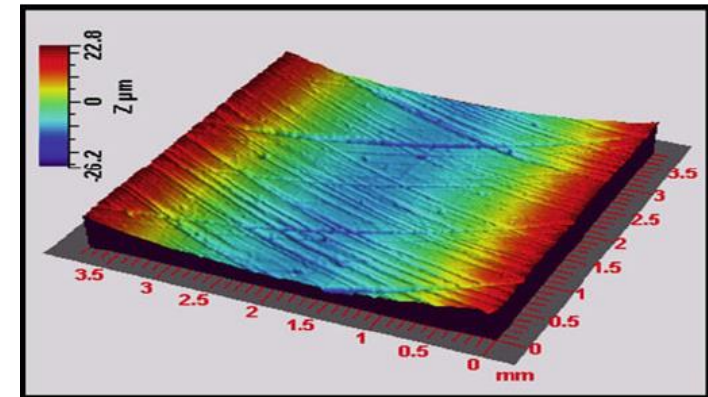


# Brunimento: distribuição de alturas

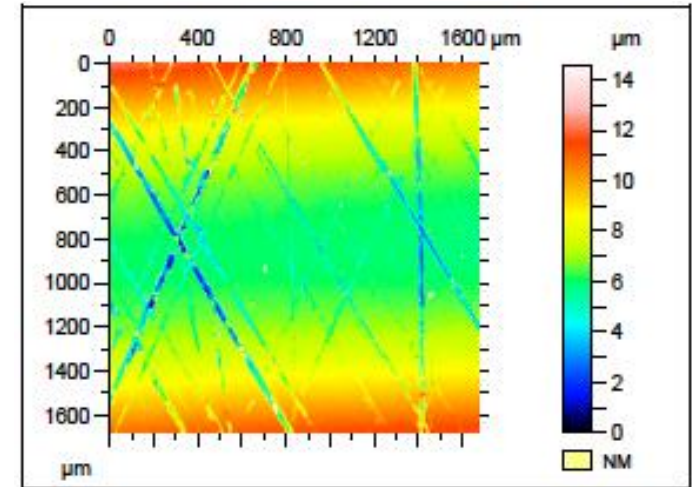
Brunimento gera superfícies com distribuição de altura gaussiana (curva normal)



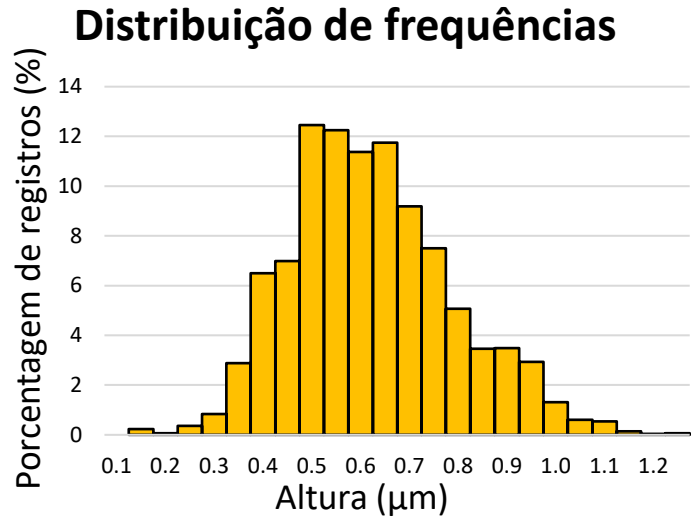
©mal



©zah



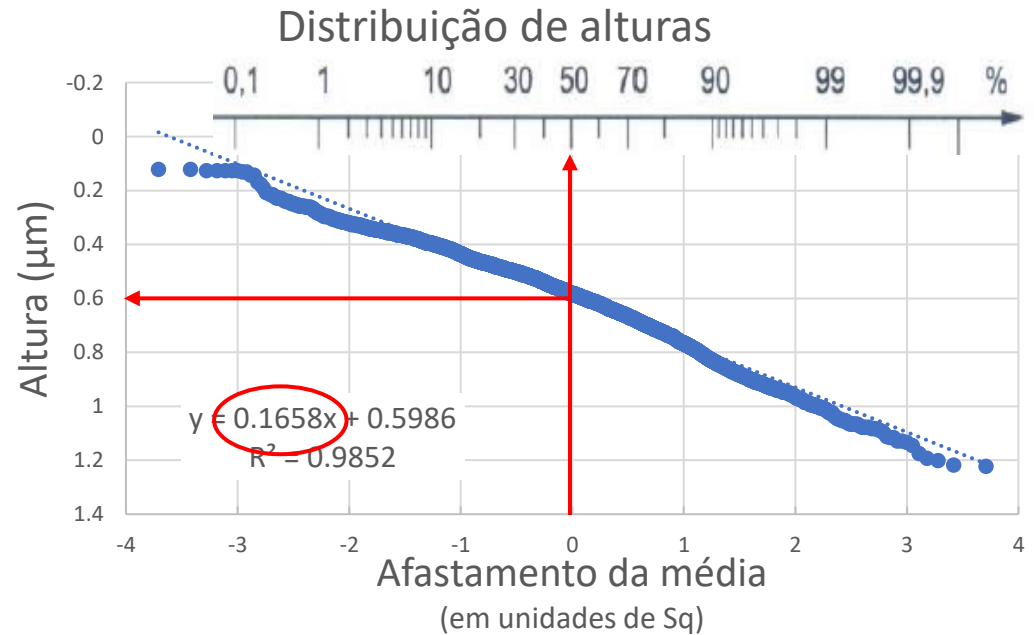
# Nova representação da distribuição de alturas



Média: 0,60

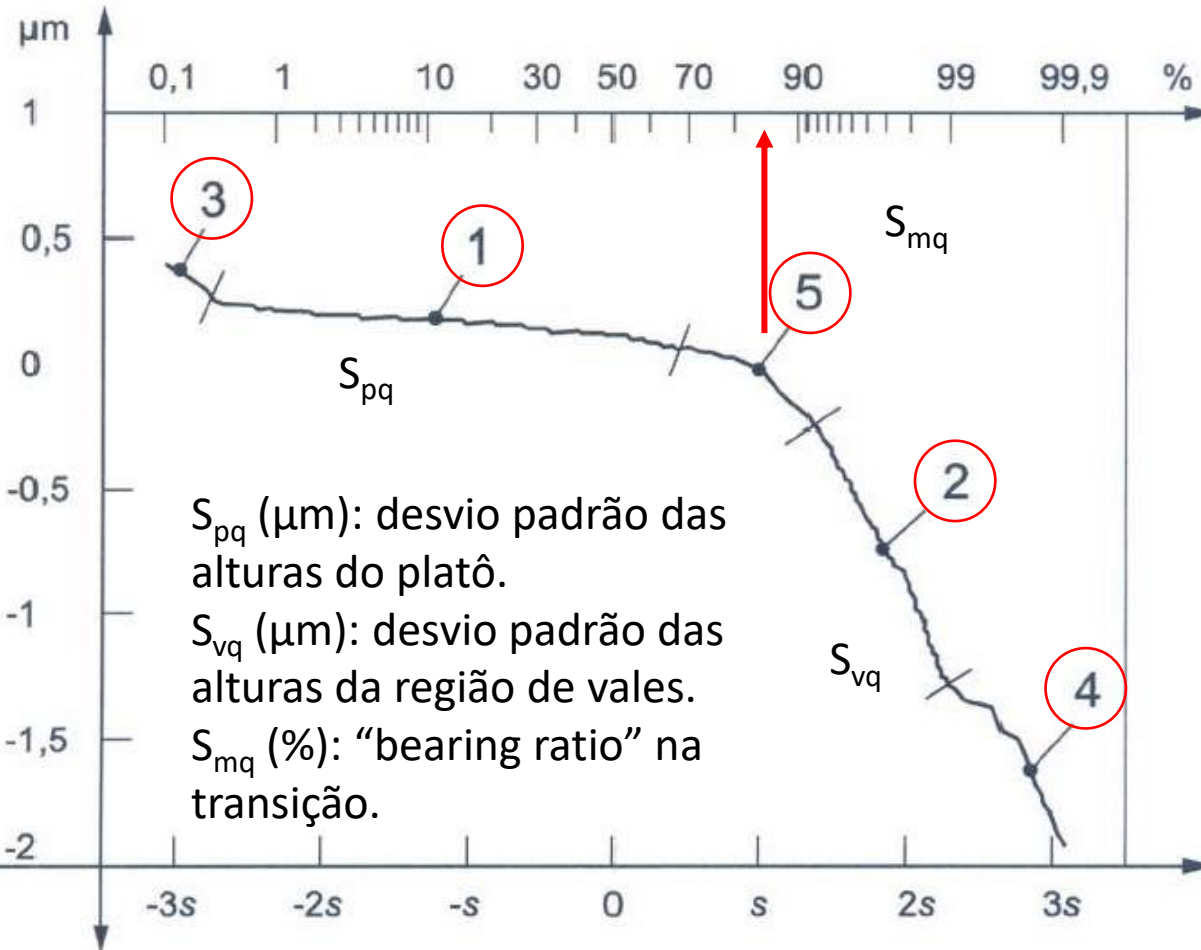
Desvio padrão: 0,17

### Verificação da “normalidade”





# Norma ISO 25178-2: $S_{pq}$ , $S_{vq}$ e $S_{mq}$

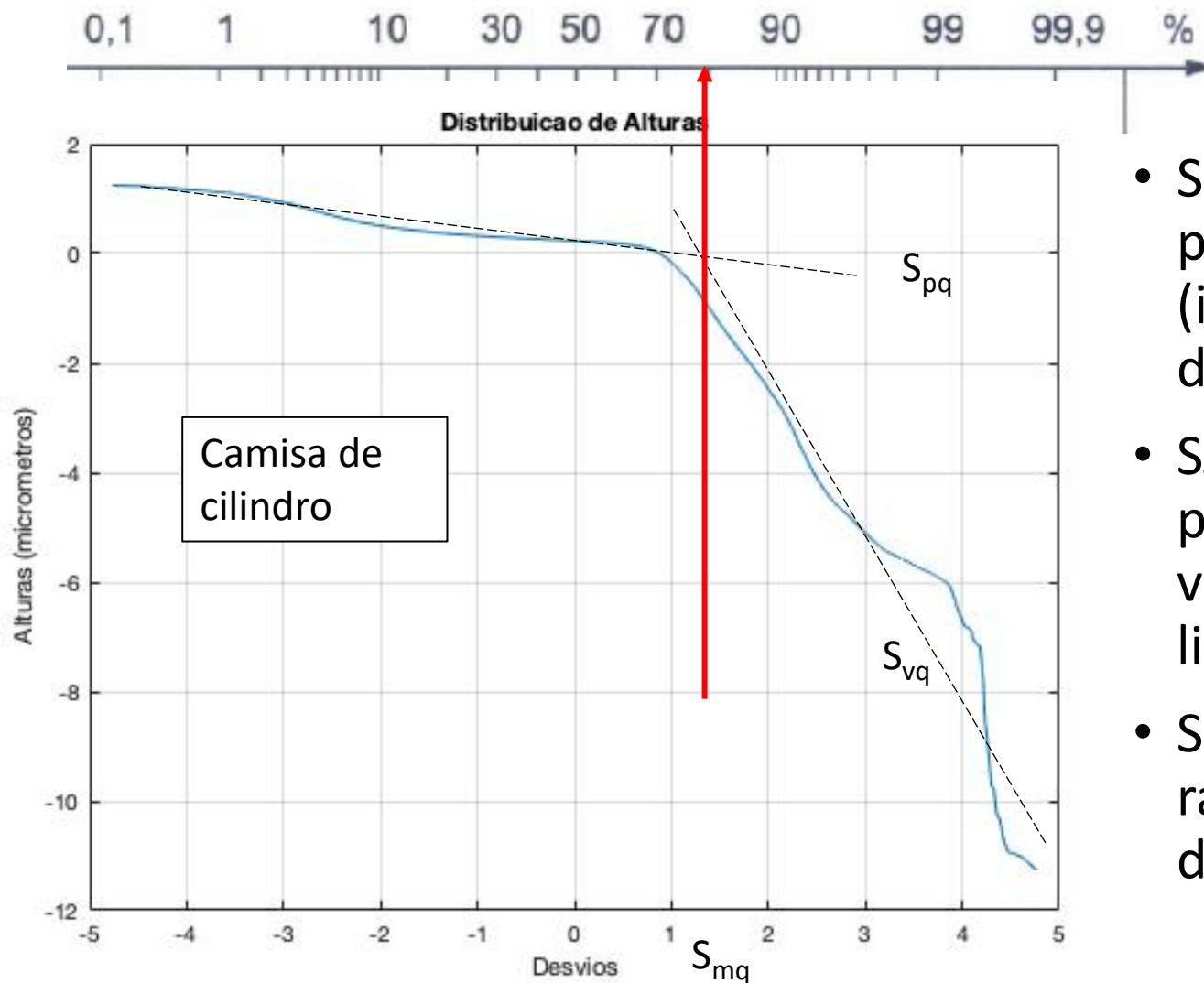


$S_{pq}$  ( $\mu\text{m}$ ): desvio padrão das alturas do platô.  
 $S_{vq}$  ( $\mu\text{m}$ ): desvio padrão das alturas da região de vales.  
 $S_{mq}$  (%): "bearing ratio" na transição.

- 1 região de platô
- 2 região de vales
- 3 debris ou *outliers*
- 4 riscos profundos ou *outliers*
- 5 ponto de transição platô/vales; combinação de distribuições.

Curva de probabilidades de alturas

# Caso real - Motor Diesel

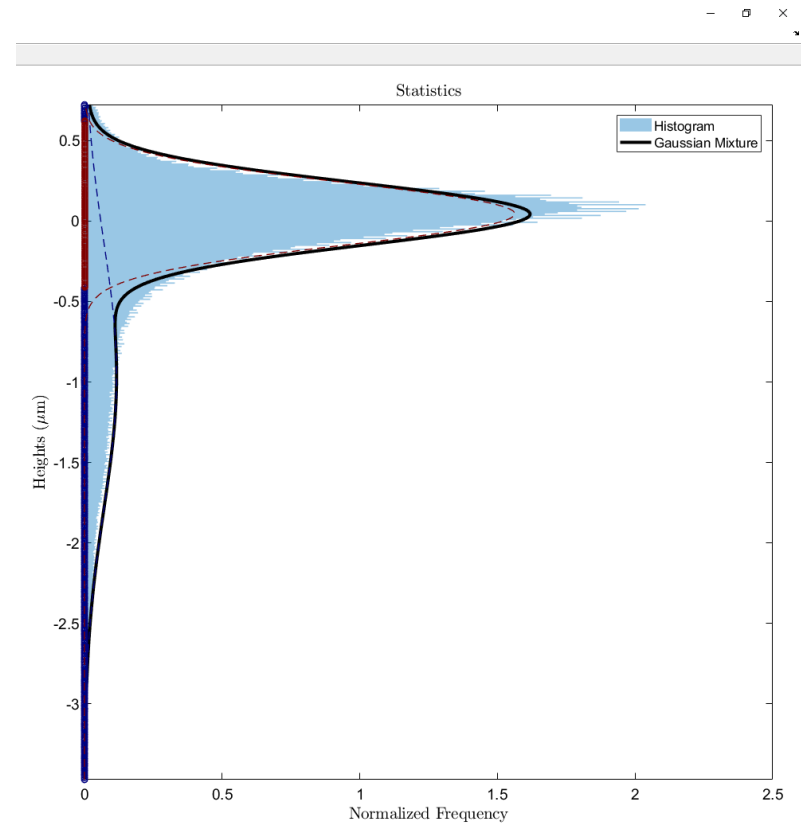
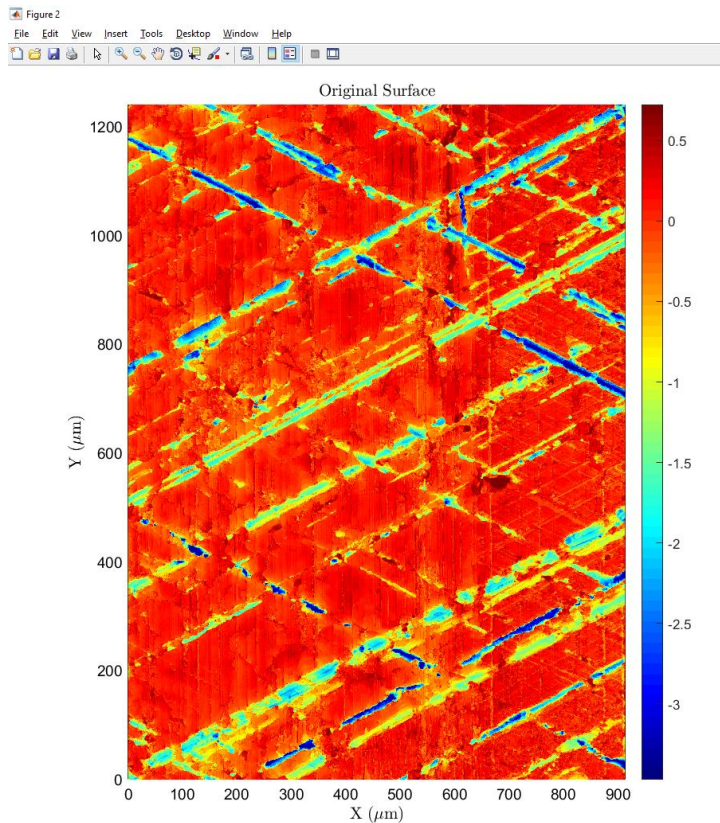


- $S_{pq}$  ( $\mu\text{m}$ ): desvio padrão do platô (inclinação da linha de tendência).
- $S_{vq}$  ( $\mu\text{m}$ ): desvio padrão da região de vales (inclinação da linha de tendência).
- $S_{mq}$  (%): “bearing ratio” na interseção das duas linhas.

# GMM – Gaussian Mixture Model

Camisa com marcas do "plateau-honing"

Técnicas estatísticas avançadas para extrair parâmetros das distribuições

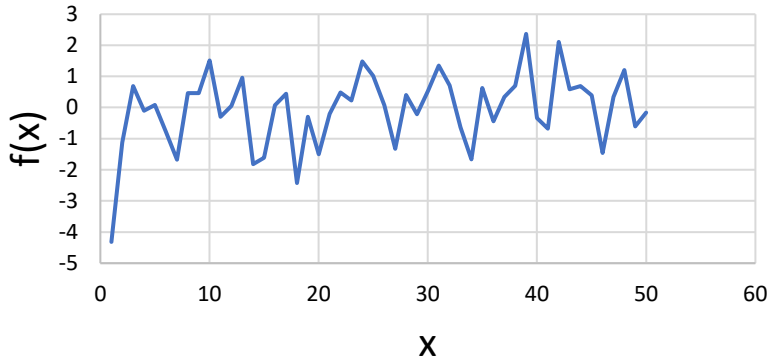


Premissa: os componente da mistura têm distribuições gaussianas.

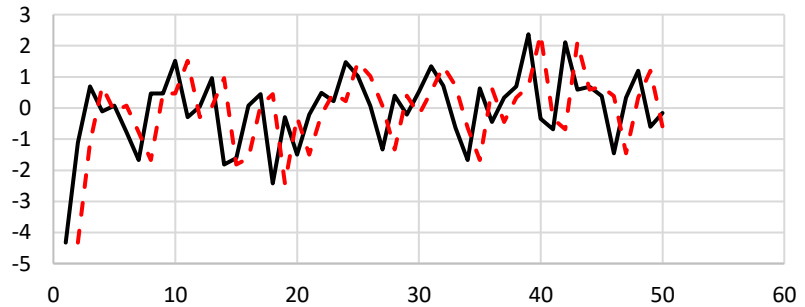
# OUTROS PARÂMETROS PADRONIZADOS

# Conceito de auto correlação

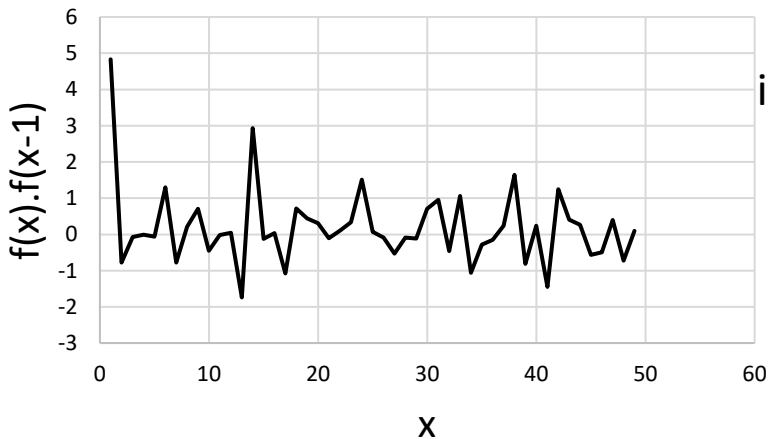
Função original (perfil)



$f(x), f(x-\tau)$  para  $\tau=1$

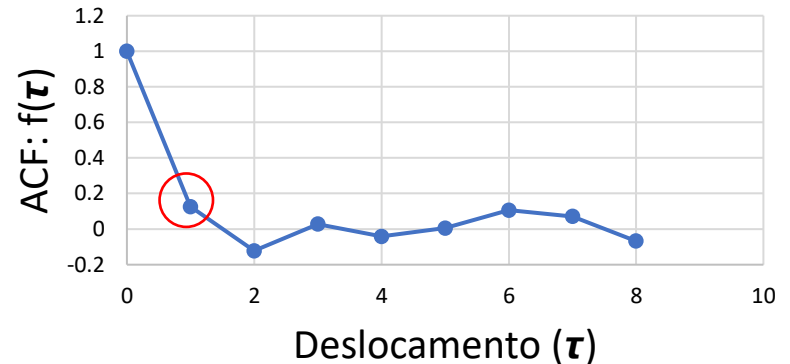


Produto  $f(x) \cdot f(x-1)$



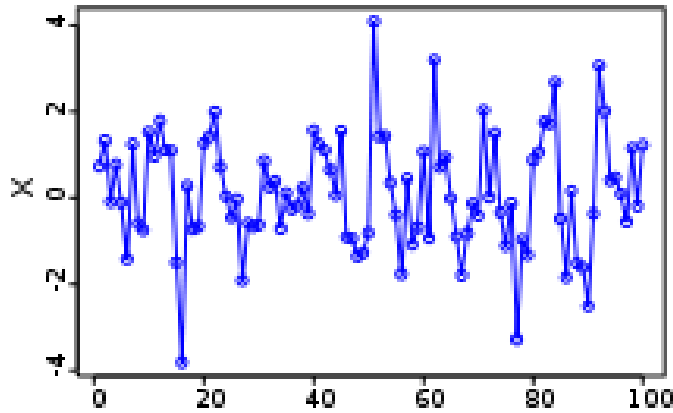
integração

Função de autocorrelação



$$ACF := f(\tau) = \frac{\int z(x) \cdot z(x - \tau) dx}{\int z(x)^2 dx}$$

# Função de auto-correlação

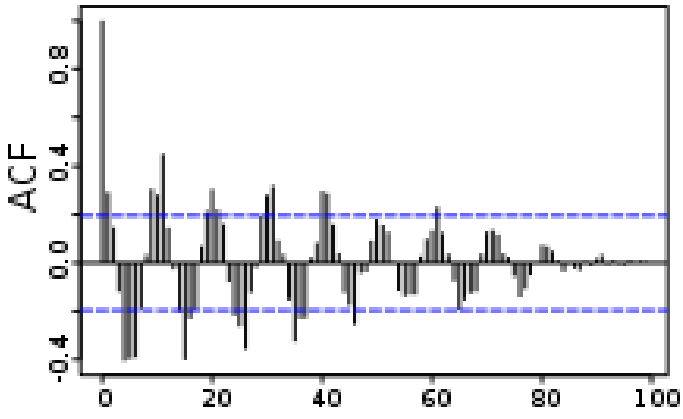


- ACF: o quanto uma função difere dela mesma de um ponto para outro.
- Valor = 1 na origem ( $\tau = 0$ )
- Para funções aleatórias:

$$\lim_{\tau_x, \tau_y \rightarrow \infty} ACF = 0$$

- Permite identificar conteúdos periódicos (exemplo ao lado).
- Em 3D:

$$ACF: f(\tau_x, \tau_y) = \frac{\iint z(x, y) \cdot z(x - \tau_x, y - \tau_y) dx dy}{\iint z(x, y)^2 dx dy}$$



©wik

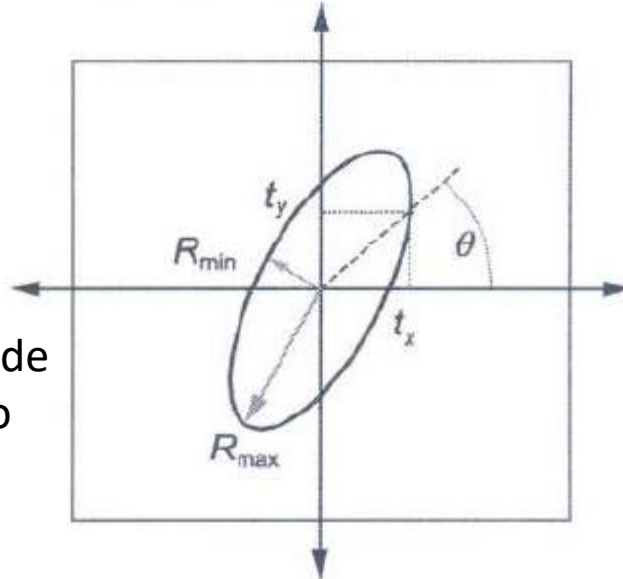
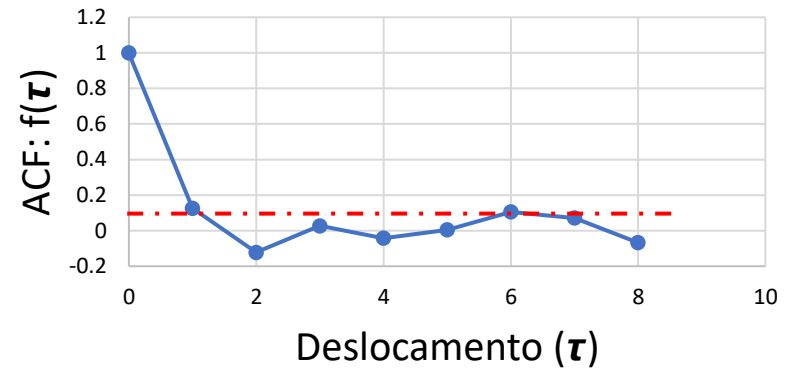
# Comprimento de autocorrelação $S_{al}$

## Relação de aspecto da textura $S_{tr}$



ACF da superfície

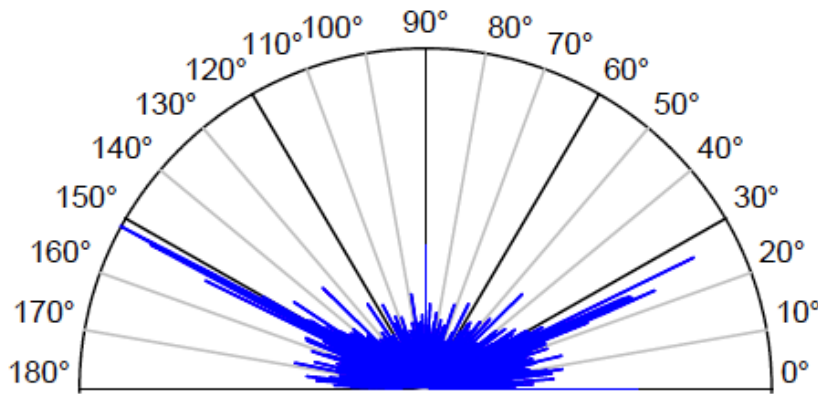
Função de autocorrelação



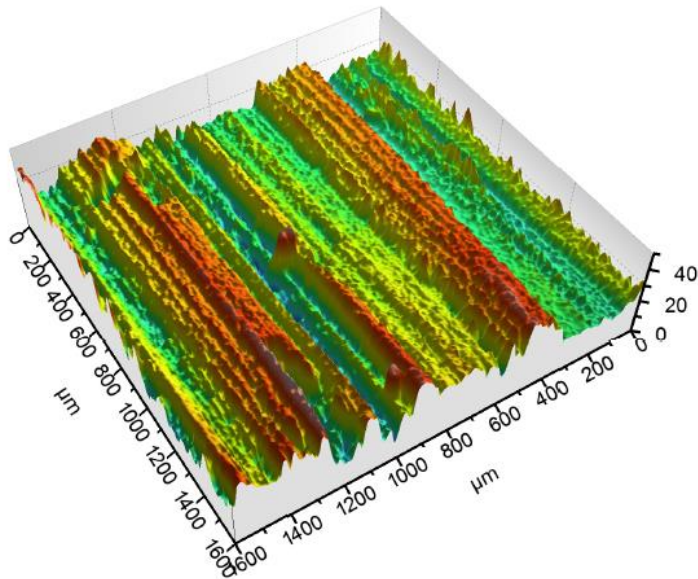
Comprimento de autocorrelação em diferentes direções

- $S_{al} = R_{min}$ : distância, ao longo da direção de queda mais rápida, para ter  $ACF < \text{default}$  (0,1 por ex.)
- $S_{tr} = R_{max}/R_{min}$ : expressa a relação entre a maior e a menor distância para ter  $ACF < \text{default}$  (0,1 por ex.).
- $S_{tr}$  não tem equivalente em 2D.

# Direcionalidade da textura



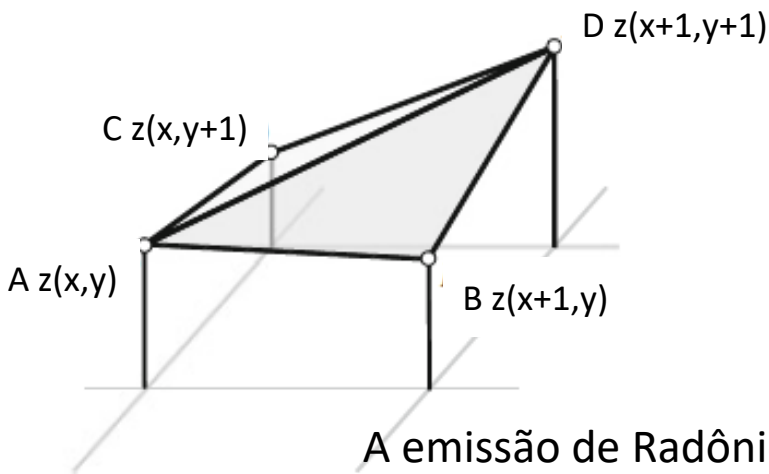
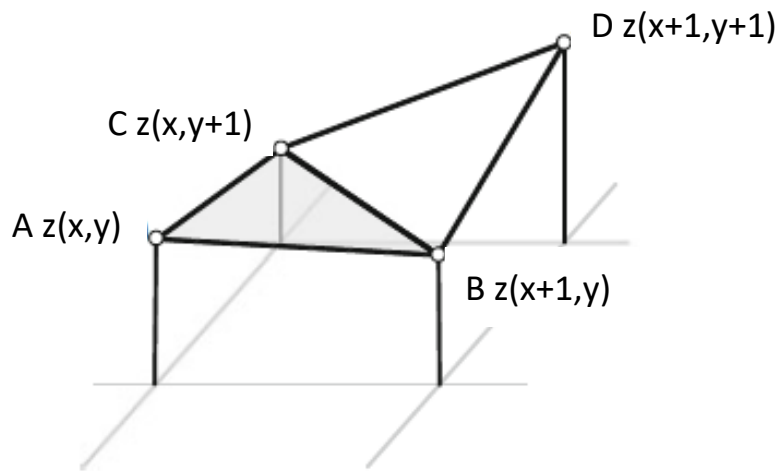
- O perfilômetro fornece as principais direções da textura (no exemplo 151° e 26°).



- Recurso importante para obter perfis perpendiculares a ondulações.



# Relação área desenvolvida/área aparente $S_{dr}$



Para 4 pontos adjacentes é possível considerar duas diagonais, BC e AD.

$$S_1 = \triangle ABC + \triangle BCD$$

$$S_2 = \triangle ABD + \triangle ACD$$

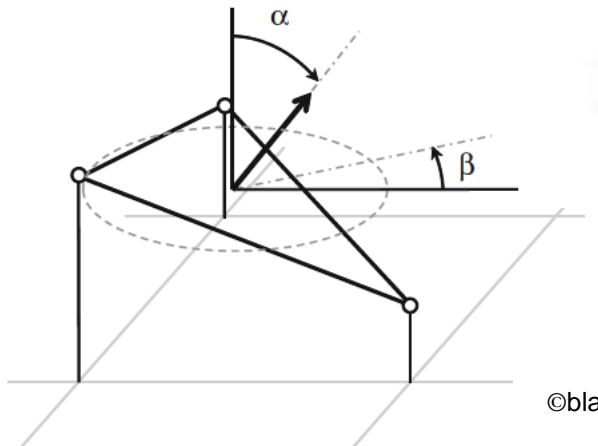
$$S_{dr} = \left( \frac{\frac{1}{2}(S_1 + S_2)}{\text{área projetada}} - 1 \right) \cdot 100\%$$

A média de  $S_1$  e  $S_2$  excede a área projetada num certo percentual que é o valor de  $S_{dr}$ .

A emissão de Radônio (cancerígeno) por granitos é proporcional ao valor de  $S_{dr}$ .



# Gradiente médio quadrático $S_{dq}$



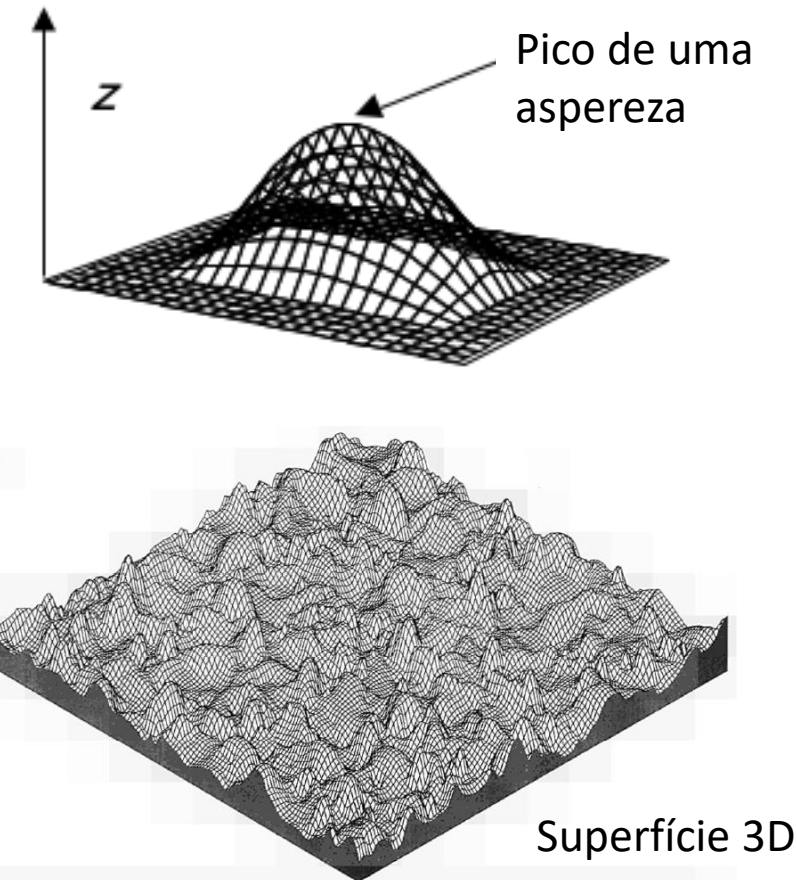
$$S_{dq} = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A \left[ \left( \frac{\partial z(x,y)}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial z(x,y)}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy}$$

- Gradientes segundo os eixos x e y calculados para cada ponto da superfície:  $\partial z/\partial x$  e  $\partial z/\partial y$ ; o valor médio quadrático deles calculado para toda a área A.
- $S_{dq}$  é associado aos ângulos  $\alpha$ , com a normal à superfície global e  $\beta$  de sua projeção horizontal com uma direção de referência.
- $S_{dq}$  é importante na avaliação de superfícies de vedação.

$$\alpha = \arctg \sqrt{\left( \frac{\partial z}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial z}{\partial y} \right)^2}$$

$$\beta = \arctg \left[ \frac{\left( \frac{\partial z}{\partial x} \right)^2}{\left( \frac{\partial z}{\partial y} \right)^2} \right]$$

# Densidade e curvatura de picos (2D $\rightarrow$ 3D)

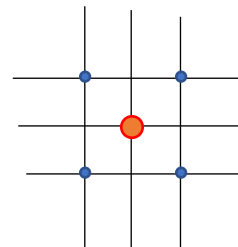


Hipóteses: **equivocadas**

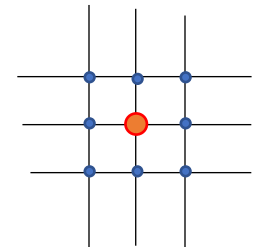
- Picos em 3D têm mesmas alturas e curvaturas que os picos dos perfis.
- A densidade de picos por unidade de área é o quadrado da densidade de picos por unidade de comprimento do perfil.
- O plano médio estabelecido pela média das alturas de picos do perfil é o mesmo da superfície 3D.

Questão controversa:

- Definição de pico ( $z >$  vizinhos)



ou



# Picos: densidade e curvatura de picos

Densidade de picos ( $S_{pd}$ ):

- Indica o número de picos por unidade de área; unidade [ $1/\text{mm}^2$ ]
- Difere do parâmetro antigo ( $R_{pc}$ ) pela existência de critérios para definir o que seja um pico significativo.

Curvatura dos picos ( $S_{pc}$ ):

- $S_{pc}$  é a média aritmética da curvatura dos picos significativos.
- Valor baixo de  $S_{pc}$  significa raio de curvatura elevado, i.e., pico achatado com boas propriedades de contato.

$S_{pd}$  e  $S_{pc}$  são importantes no estudo do contato entre superfícies

# ABORDAGEM TOPOLÓGICA

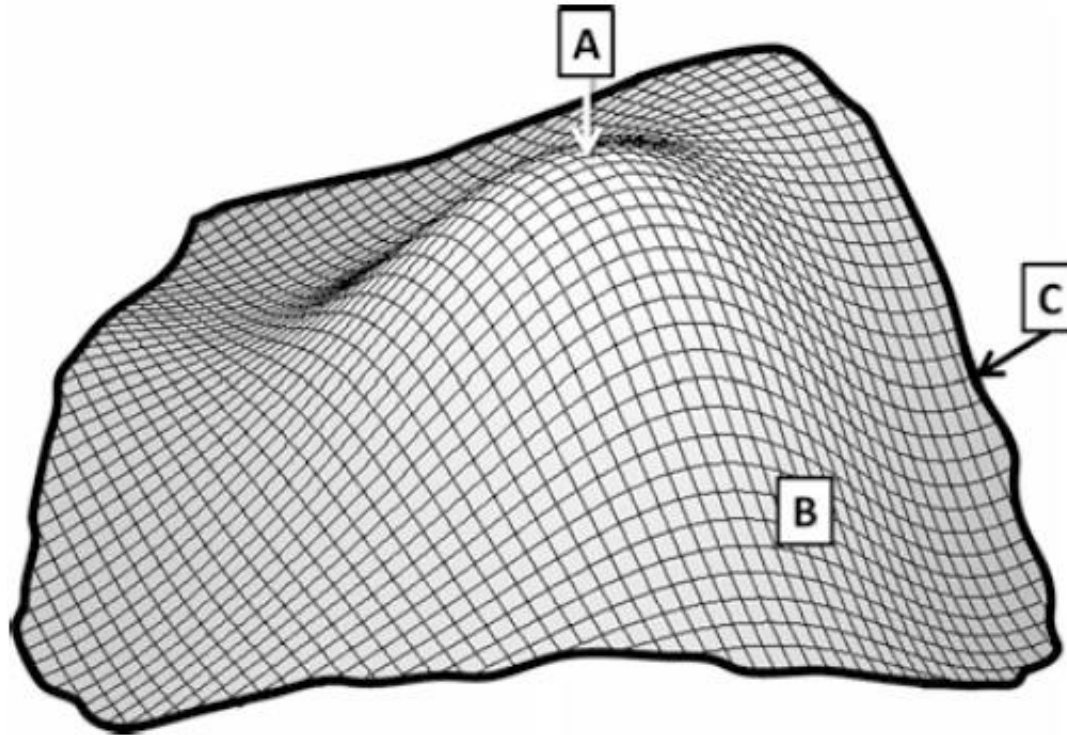
# Aspectos principais

- Desenvolvida nos anos 1970 na França (engenheiros da escola "Arts et Métiers - Paris Tech", Peugeot e Renault).
- Método gráfico para caracterização da textura superficial.
- Busca relações entre exigências funcionais e a localização de picos e vales.
- Algoritmos de análise de imagem avançados permitiram passar de 2D para 3D.

# Sequência

- Mapeamento da superfície com identificação de:
  - Curvas de nível
  - Colinas e Picos
  - Bacias e Poços
  - Pontos de sela
  - Divisores de águas
- Segmentação da superfície
  - “Motivo”
  - Poda

# Colina/Pico (Hill/Peak)

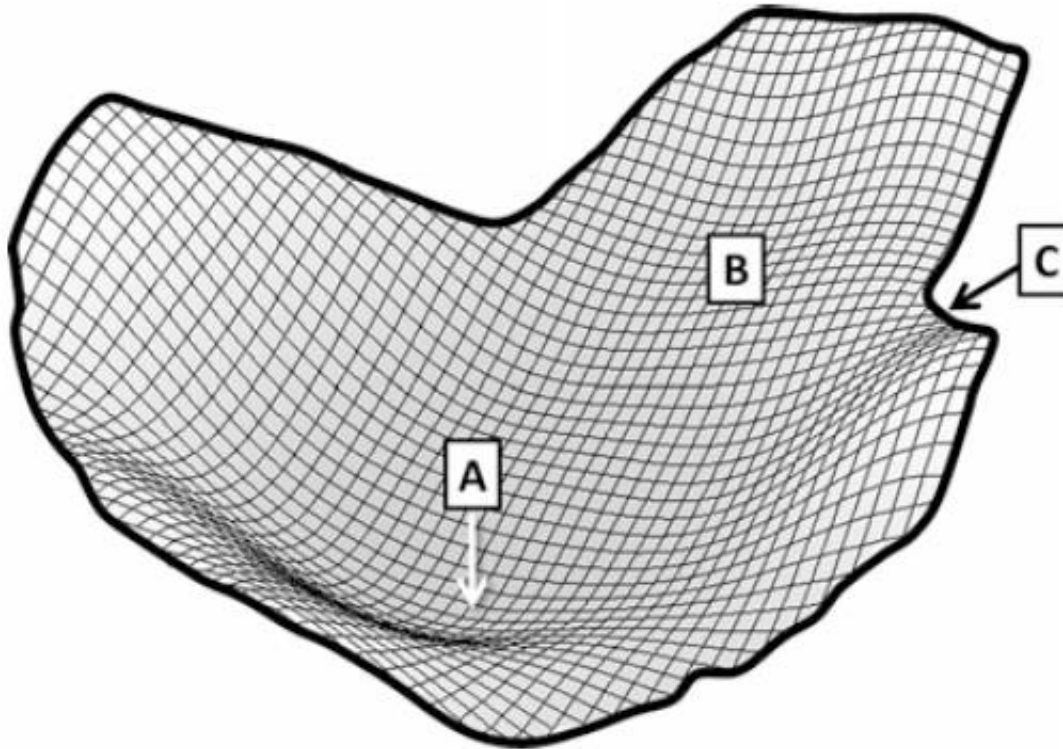


©bla

- B: colina
- A: pico (ponto mais alto)
- C: linha de escoamento



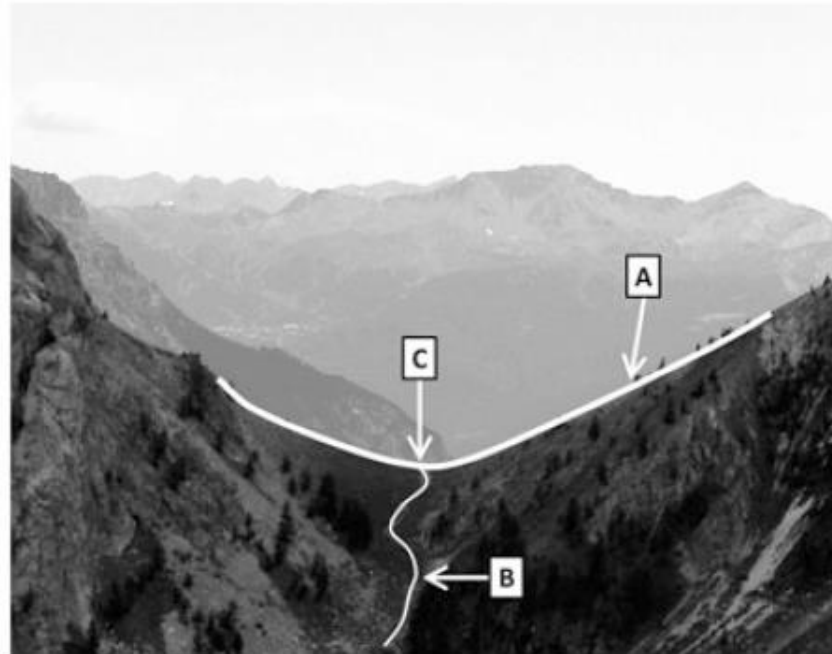
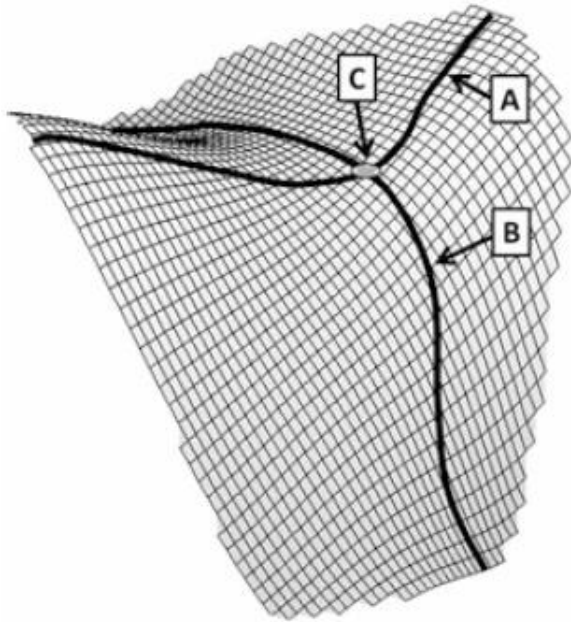
# Bacia/Poço (Dale/Pit)



©bla

- B: bacia
- A: poço (ponto mais baixo)
- C: linha divisora de águas

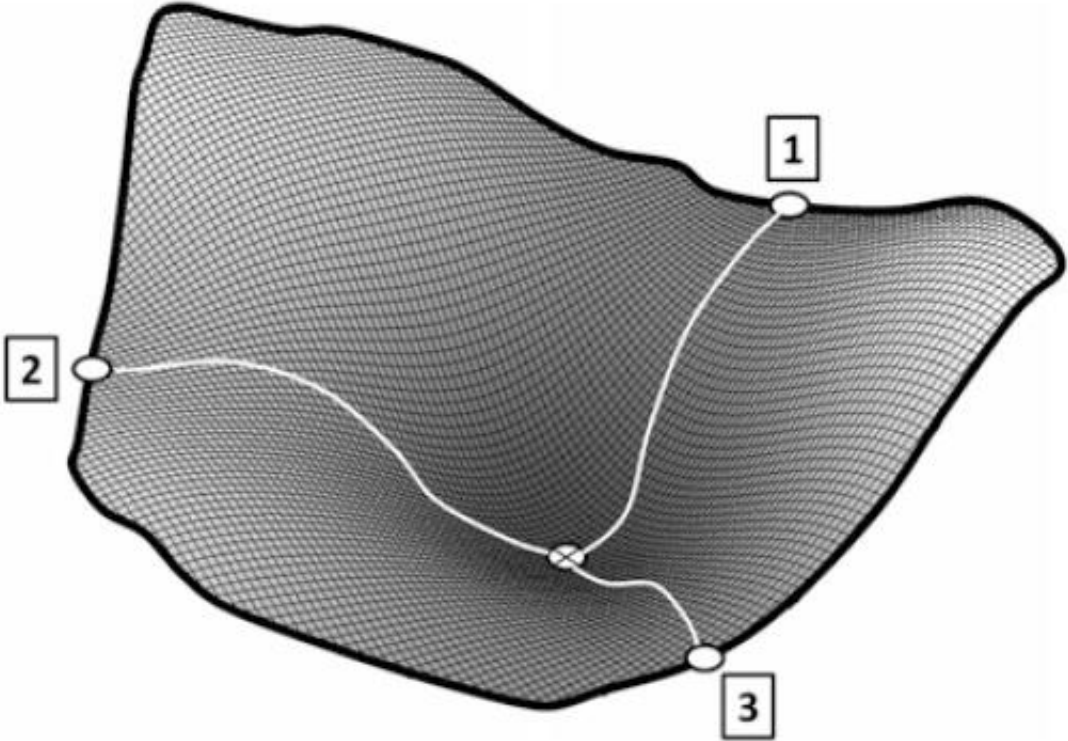
# Ponto de sela (*Saddle Point*)



©bla

- Ocorre na interseção de uma linha divisora de águas e um vale ou linha de escoamento ("course line").
- Pode ser considerado como um ponto de máximo numa direção e de mínimo em outra.

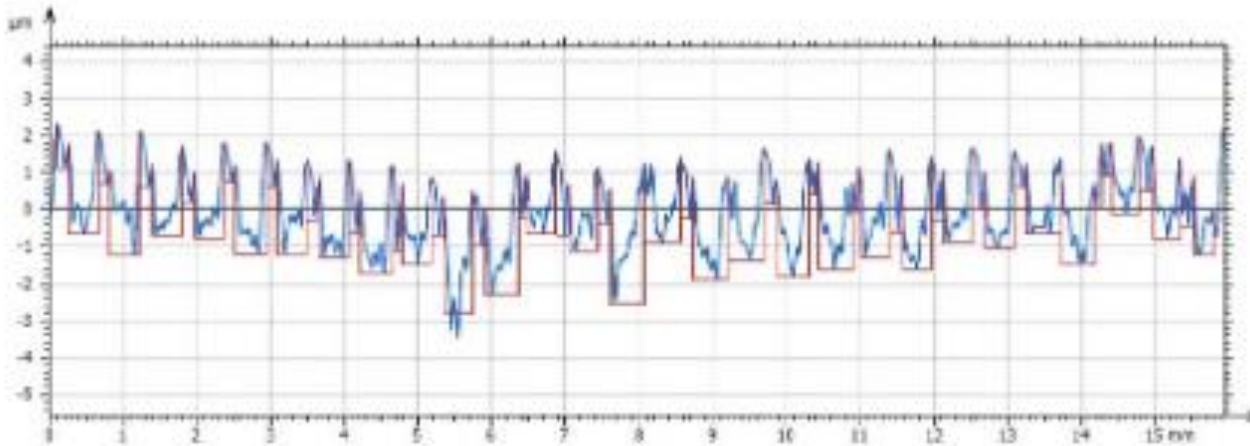
# Três pontos de sela nos divisores de águas



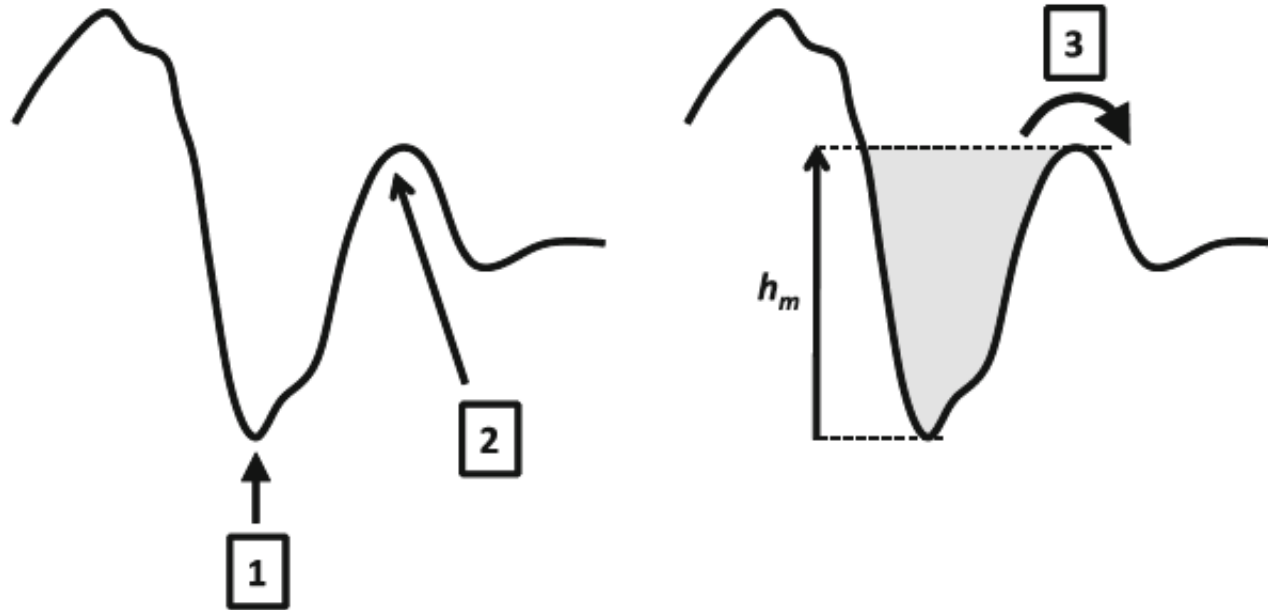
©bla

# Motivo ("motif" na literatura original)

- Num perfil (2D), um motivo é uma sucessão pico-vale-pico.
- Em 3D um motivo é, essencialmente, uma bacia, rodeada por uma linha divisora de águas.
- Conceito na base da operação de poda ("pruning"), que incorpora motivos pequenos e insignificantes aos maiores, segundo regras preestabelecidas.
- O processo é denominado segmentação.



# Altura do motivo

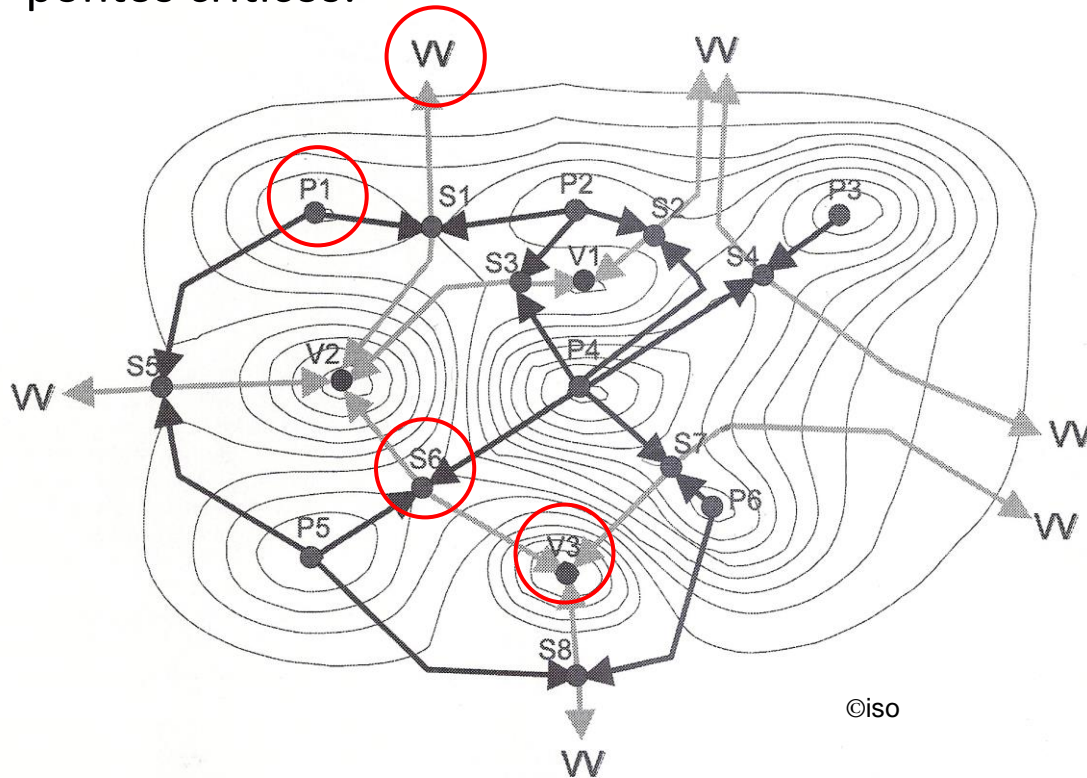


©bla

- Em 3D uma bacia pode ter vários pontos de sela no seu contorno.
- $h_m$  é a distância entre o poço (1) e o ponto de sela mais baixo (2).
- (3) é o ponto em que a bacia transborda quando preenchida virtualmente com água.
- Para uma colina, sua altura será a distância entre o pico e o ponto de sela mais alto do entorno.

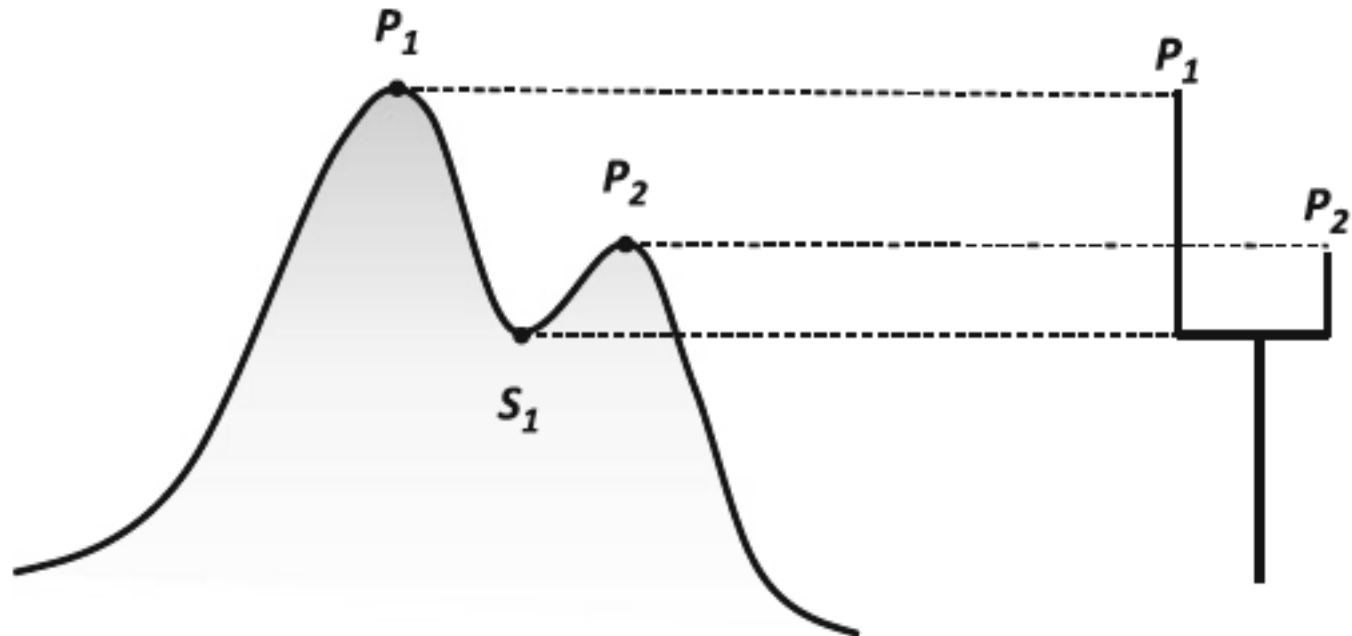
# De volta aos mapas

Mapa da superfície indicando linhas e pontos críticos:



- P: picos
- V: poços (mínimo da bacia)
- S: ponto de sela
- W: poço virtual (fora do mapa)

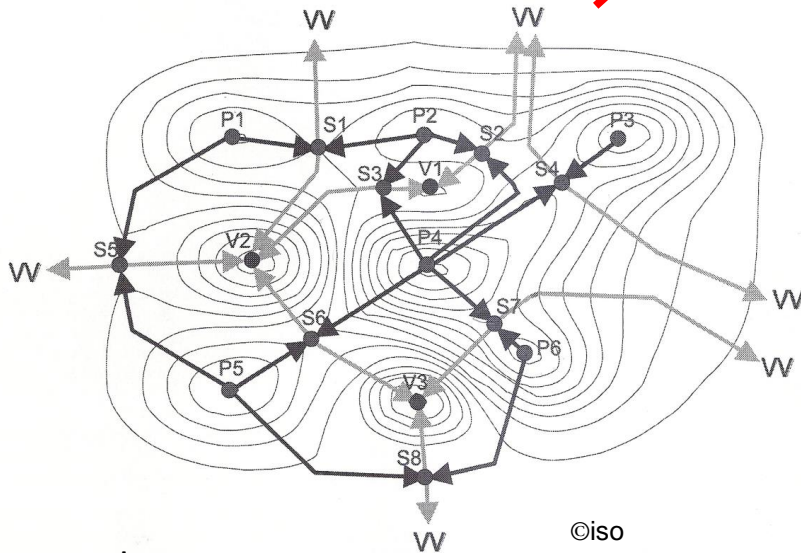
# Perfil com sua representação esquemática



©bla

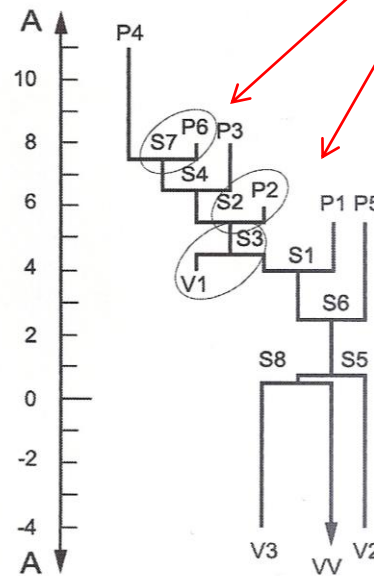
# Árvore de mudanças ("change tree")

Poda do mapa (*Wolf pruning*)

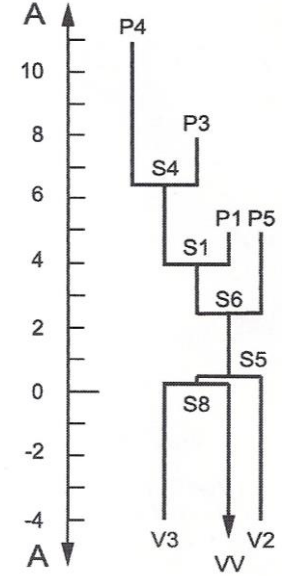


- A – altura
- P – picos
- V – poços
- S – ponto de sela
- WV – poço virtual

acidentes eliminados



Antes da poda



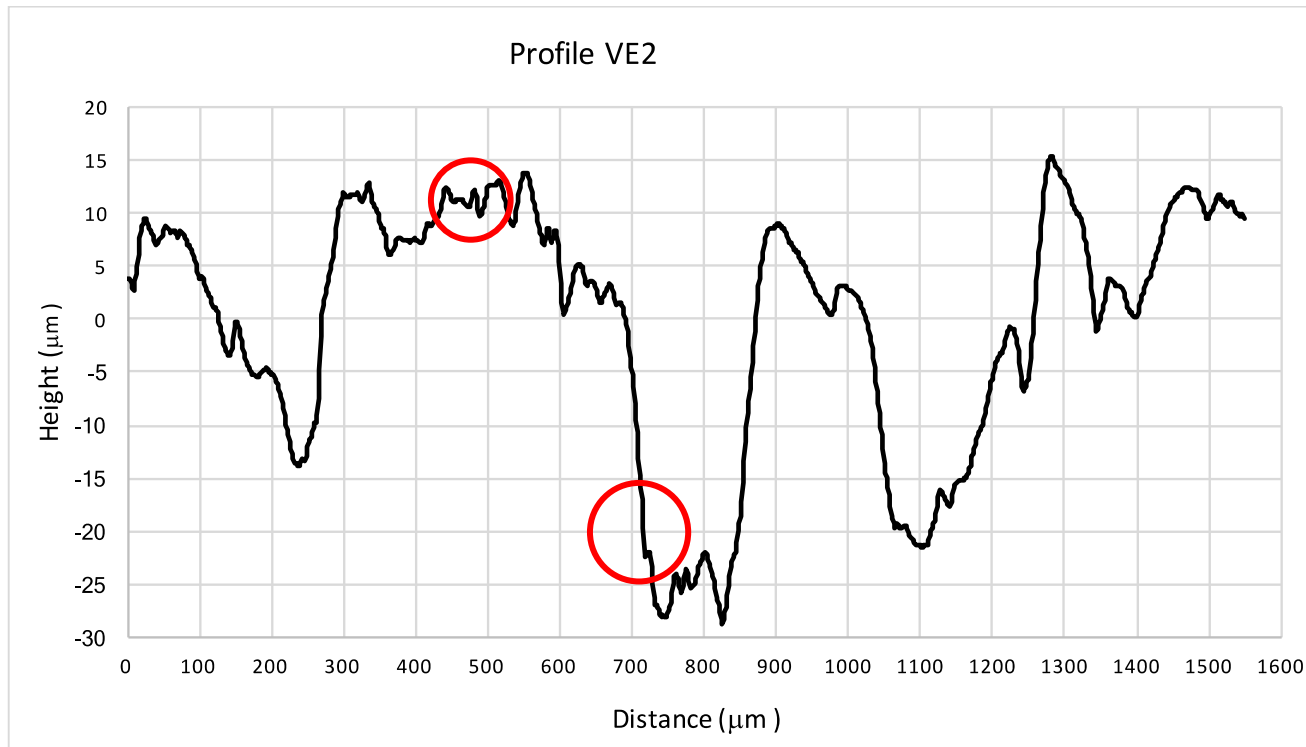
Depois da poda

O acidente é eliminado se sua diferença de altura para outro acidente é inferior à porcentagem de  $S_z$  definida para a poda.



# Critérios para discriminar picos

## Perfil do boleto de trilho esmerilhado

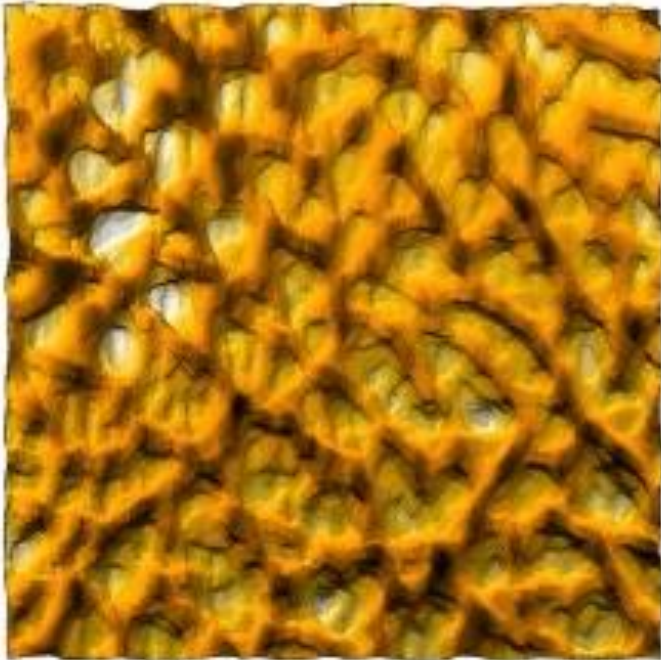


Dois critérios simultâneos:

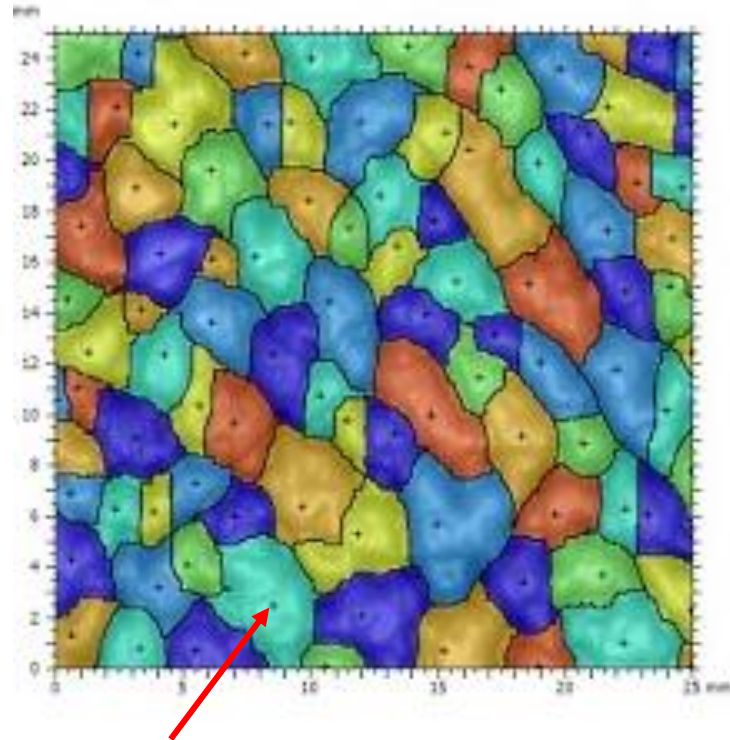
- considerar apenas um, de picos excessivamente próximos
- desconsiderar pico pouco proeminente

# Superfície granulada e sua segmentação

Superfície original



Superfície segmentada



- O símbolo “+” mostra a localização dos picos em cada motivo.
- Cada motivo é representado por uma cor diferente.
- Software: permite contar e quantificar os motivos, classificá-los em abertos e fechados, medir área, profundidade média, volume etc.

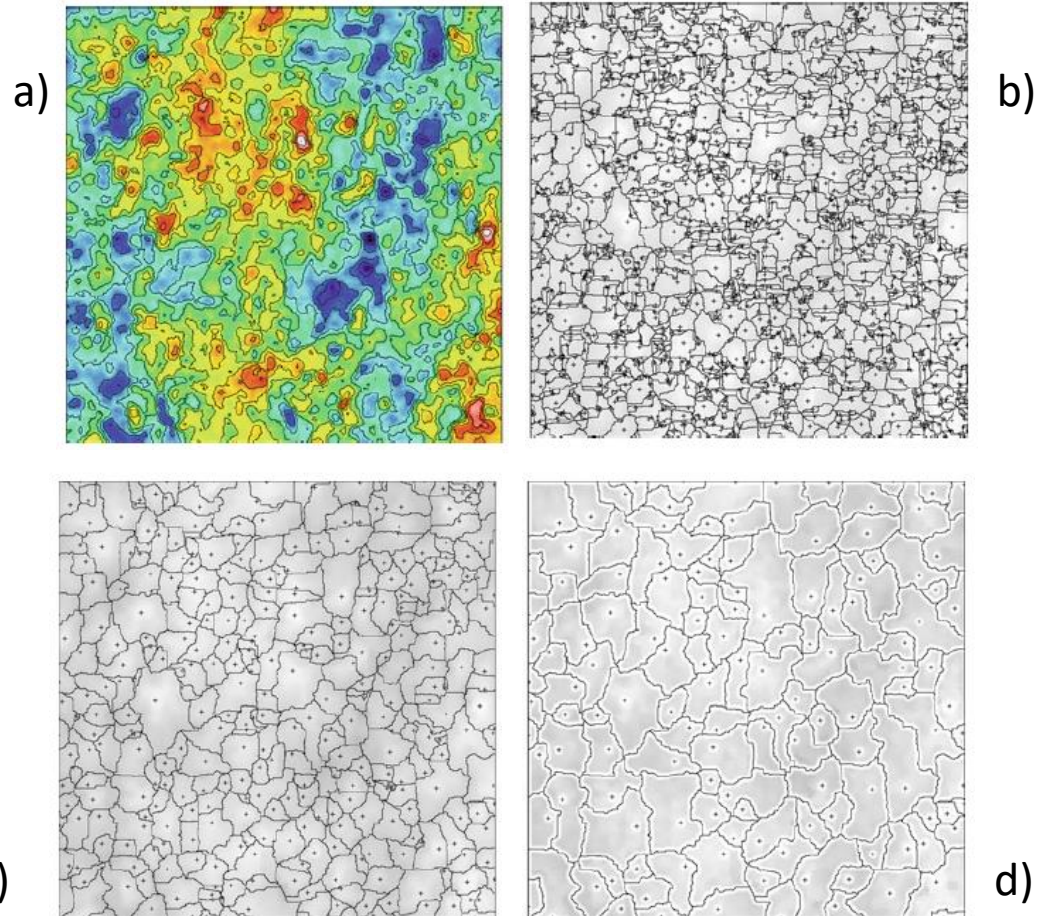
# Segmentação e nível de poda

a) textura da superfície com suas curvas de nível;

b) segmentação sem poda, indicando 1638 colinas;

c) segmentação com 1% de poda, resultando em 344 colinas;

d) segmentação com 5% de poda, mostrando 134 colinas;



©bla

# Parâmetros de aspecto

Parâmetro	ISO 25178-2	Definição	Unidade	Vlr. Gaussiana	Observações
6.8 PARÂMETROS DE ASPECTO					
$S_{pd}$	6.8.1	Densidade média de picos	$1/\text{mm}^2$		Obtido após poda de Wolf (pruning); Indicar %
$S_{pc}$	6.8.2	Curvatura média de picos	$1/\text{mm}^2$		Obtido após poda de Wolf (pruning); Indicar %
$S_{Sp}$	6.8.3.1	Altura média dos picos mais altos	$\mu\text{m}$		Obtido após poda de Wolf (pruning); Indicar %
$S_{Sv}$	6.8.3.2	Altura média dos poços mais profundos	$\mu\text{m}$		Obtido após poda de Wolf (pruning); Indicar %
$S_{10p}$	6.8.3.3	Soma em módulo de $S_{Sp}$ e $S_{Sv}$	$\mu\text{m}$		
$S_{da(c)}$	6.8.4	Área média das bacias na altura $c$	$\text{mm}^2$		Após segmentação da superfície
$S_{ha(c)}$	6.8.5	Área média de colinas	$\text{mm}^2$		Após segmentação da superfície
$S_{dv(c)}$	6.8.6	Volume médio de bacias	$\text{mm}^3$		Após segmentação da superfície
$S_{hv(c)}$	6.8.7	Volume médio de colinas	$\text{mm}^3$		Após segmentação da superfície

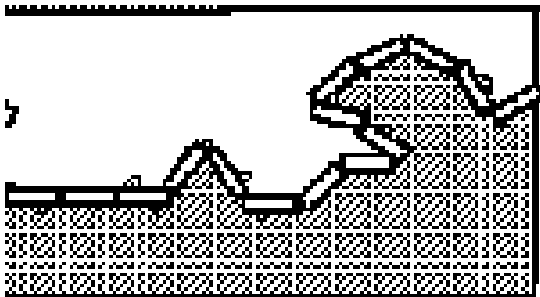
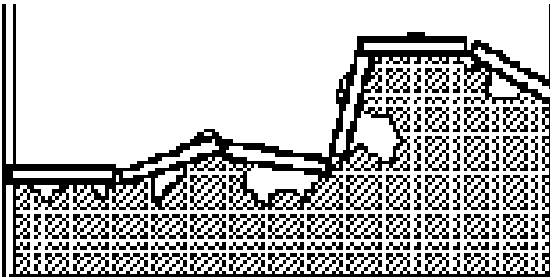
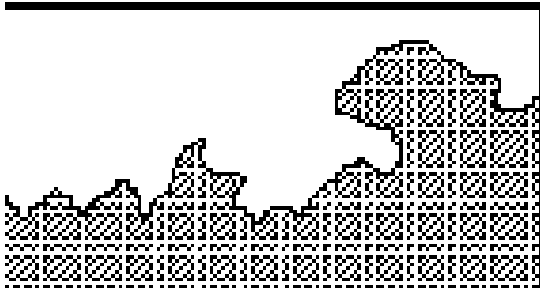
# VARIAÇÃO COM ESCALA

# Campo de visão (FOV) das lentes

Aumento	Campo de visão (mm)	Resolução óptica ( $\mu\text{m}$ )	Tamanho do pixel ( $\mu\text{m}$ )
10x	1,73 x 1,73	1,3	1,70
20x	0,865 x 0,865	1,0	0,85
50x	0,346 x 0,346	0,5	0,34

O valor de alguns parâmetros varia com a escala de medição.

# Mandelbrot – (Science, May 5th, 1967)

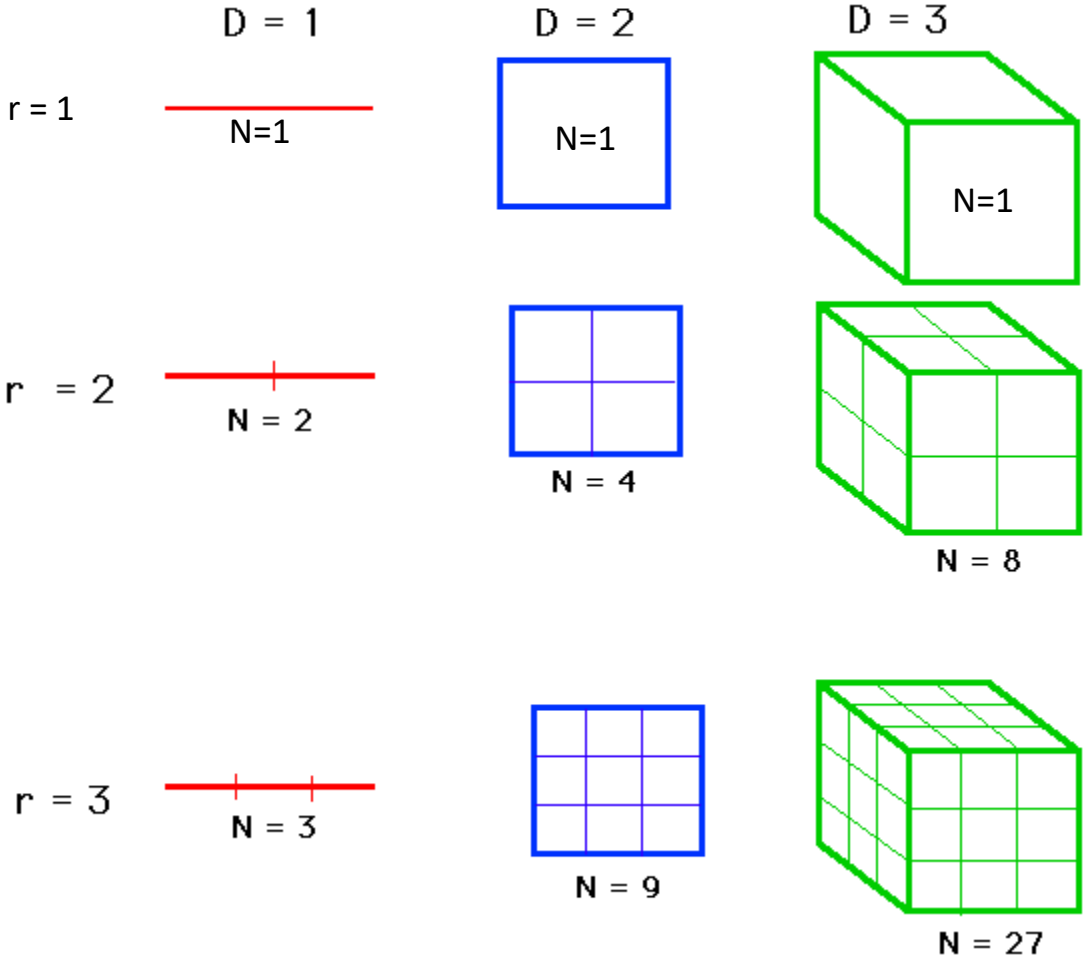


©vdb

- “How long is the coast of Britain?”
- Medição com uma dada régua resultou em 6 unidades.
- Medição com uma régua mais curta, metade da anterior, resultou em 15 unidades.
- Conclusão: o resultado depende do tamanho da régua.

# Dimensão de Hausdorff

r: subdivisão da “régua”; N: resultado da medição; D: dimensão do espaço



$$N = r^D$$

$$D = \frac{\log N}{\log r}$$

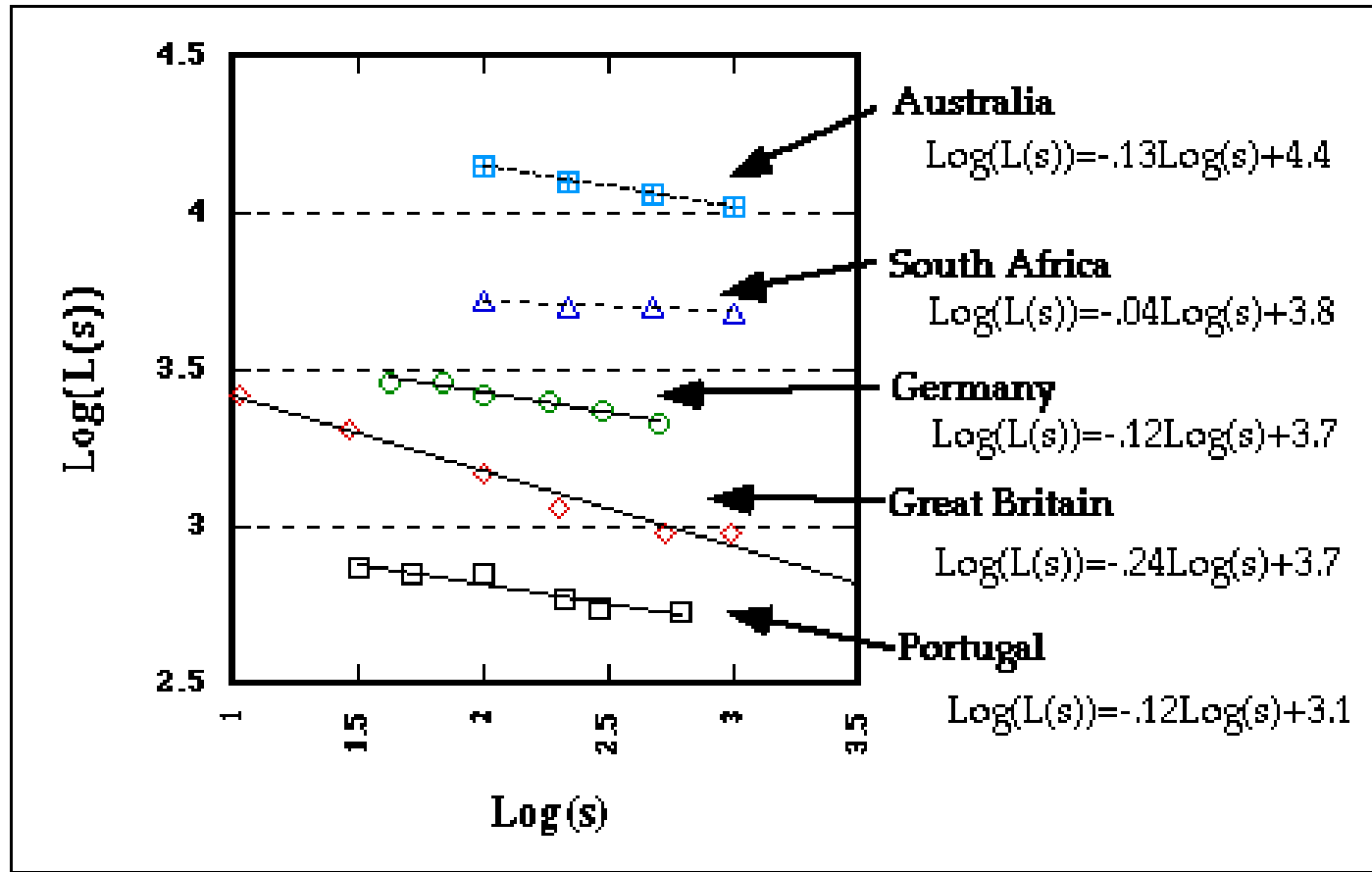


# Fractal

- É uma forma geométrica irregular ou fragmentada que pode ser dividida em partes, cada uma delas sendo, aproximadamente, uma cópia reduzida do todo.
- Divisões sucessivas geram partes que guardam semelhança com as partes anteriores (auto-similaridade).



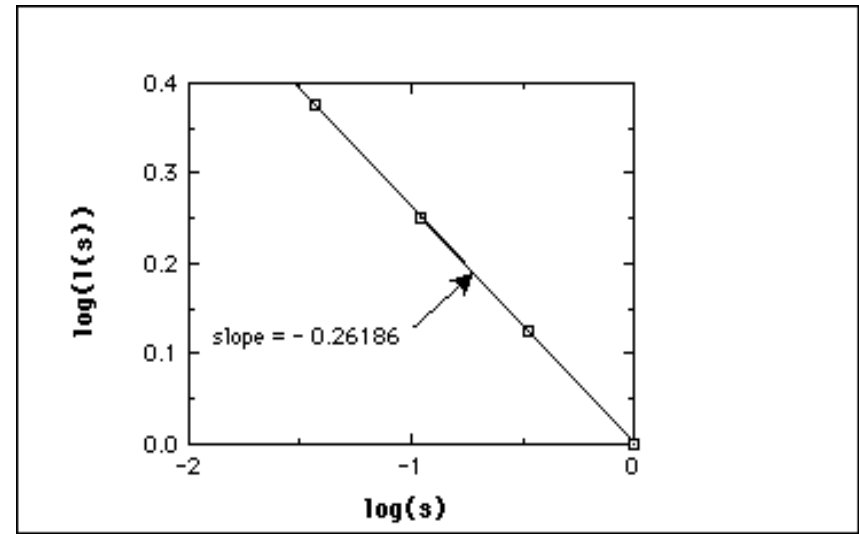
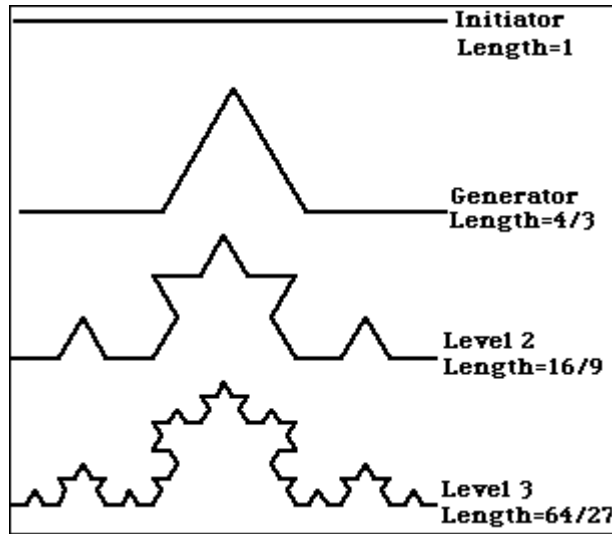
# Extensão costeira



©vdb

$\log[L(s)] = (1-D)\log(s) + b$ ;  $D$  é a dimensão fractal;  
 $(1-D)$  é o coeficiente angular da reta.

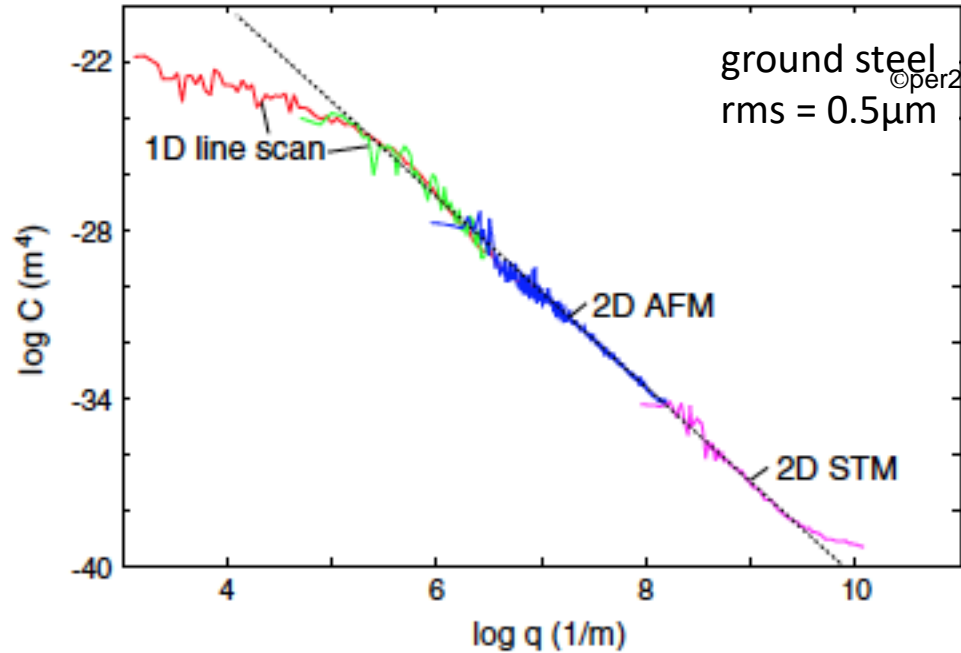
# Curva de Koch



©vdb

$$D = \log(N)/\log(r) = \log(4)/\log(3) = 1.26.$$

# Superfícies reais

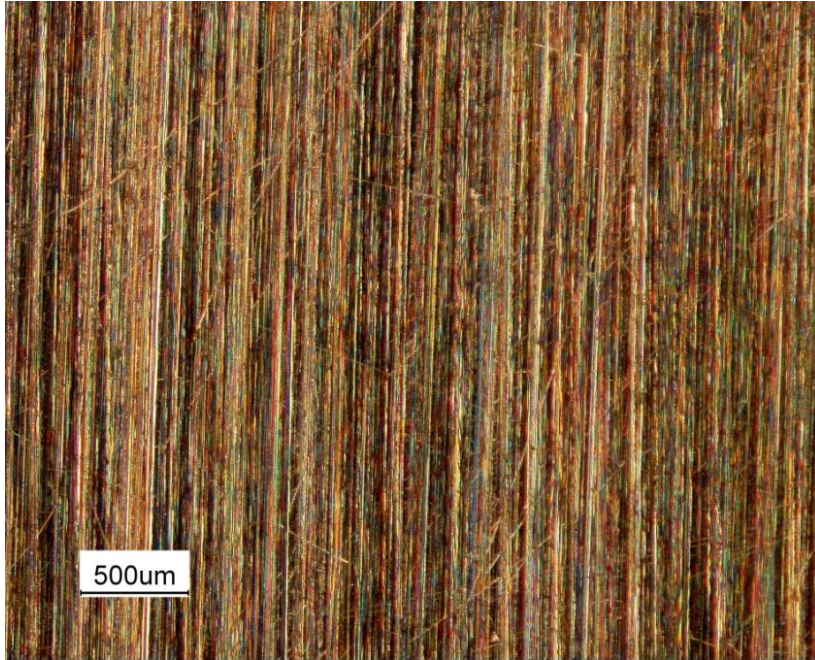


Espectro 2D de uma superfície de aço retificada. A inclinação da linha tracejada corresponde à dimensão fractal  $D = 2,28$

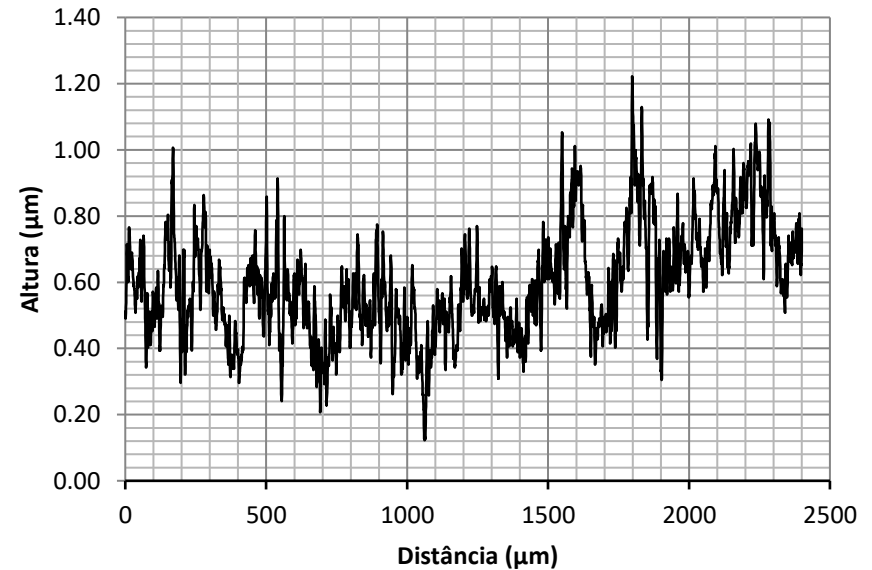
# PERFIL COMO SINAL

## FILTROS

# Registro espacial



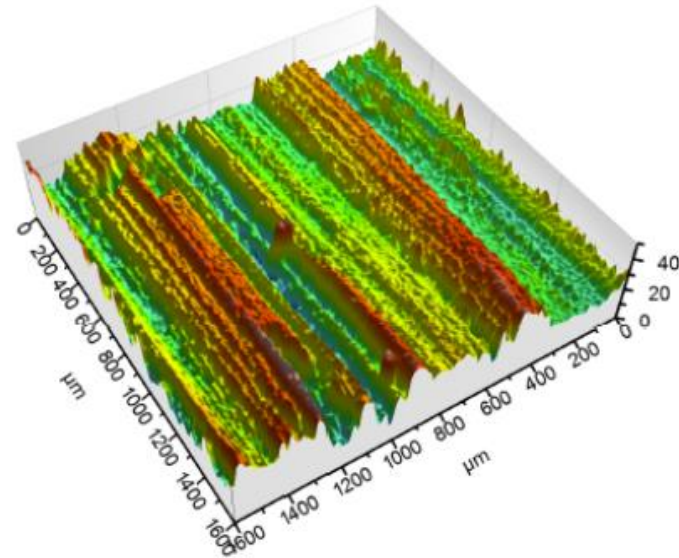
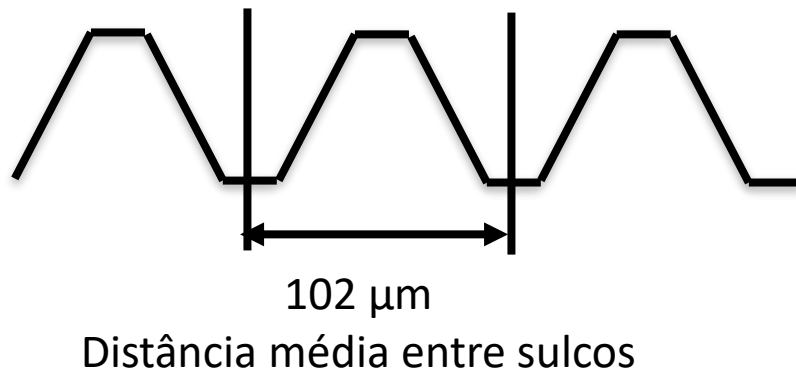
Corpo de prova retificado



O perfil registra as variações de altura da superfície do corpo de prova à medida que o apalpador se desloca ao longo de cerca de 2,5 mm.

# Registro temporal

É possível associar à frequência espacial um sinal temporal.



Frequência espacial: 10 “riscos”/mm

Velocidade do apalpador: 0,1 mm/s

Frequência do sinal:  $\sim 1 \text{ Hz}$

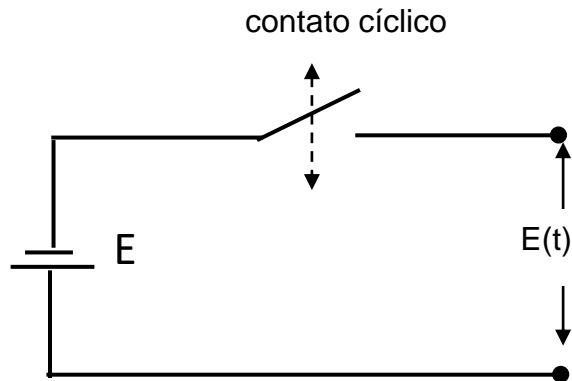
# Sinal de altura amostrado

- O arquivo .txt gerado por um perfilômetro digital tem duas colunas representando as variáveis X e Y(X)
- A variável Y(X) é a altura referida a um nível arbitrário.
- A variável X pode ser associada a tempo (intervalo de amostragem) ou a distância (trecho percorrido pelo apalpador entre duas amostras)
- A associação a tempo permite que se aplique ao sinal todas as técnicas de filtragem desenvolvidas no processamento de sinais (telecomunicações).

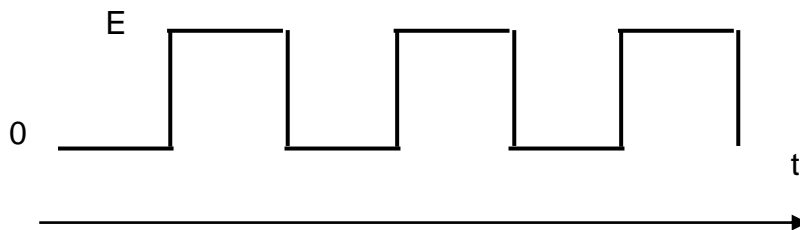


# Componentes de um sinal (análise de Fourier)

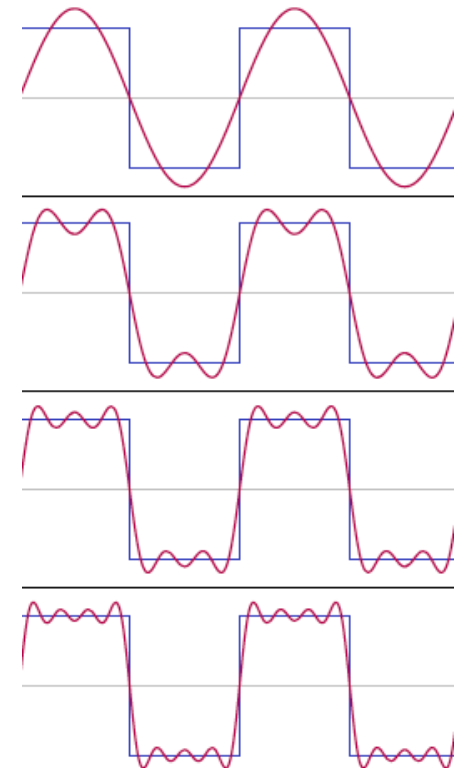
Circuito básico



Onda quadrada



Soma dos primeiros componentes da onda quadrada



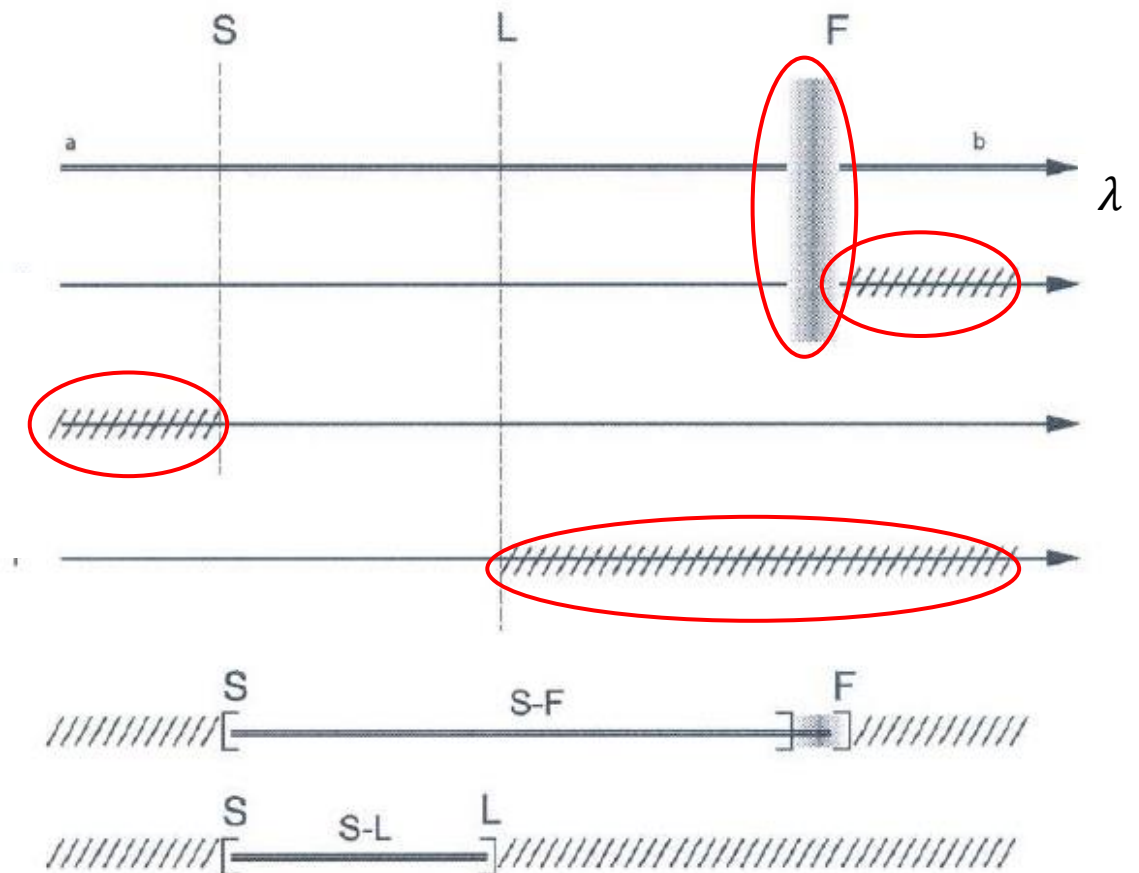
Conclusão: um sinal pode ser considerado como resultado da soma de muitas senoides.

# Separação de componentes

- Superfícies são a soma de “sinais” de pequeno, médio e grande comprimento de onda.
- Os sinais de pequeno comprimento de onda são normalmente associados a ruído e os de grande comprimento de onda à forma da superfície.
- Os comprimentos de onda intermediários representam a soma de ondulação e rugosidade.
- A determinação de parâmetros de rugosidade e de ondulação exige a separação dos respectivos componentes.
- A separação é obtida com o uso de filtros.
- O resultado não é mais o perfil primário e sim o perfil de rugosidade ou o perfil de ondulação.

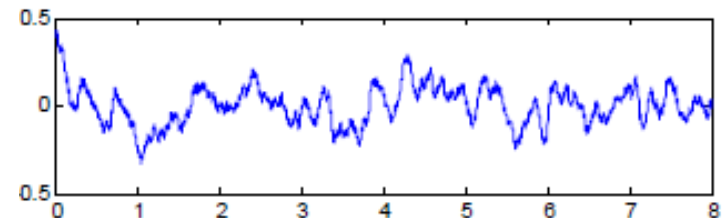
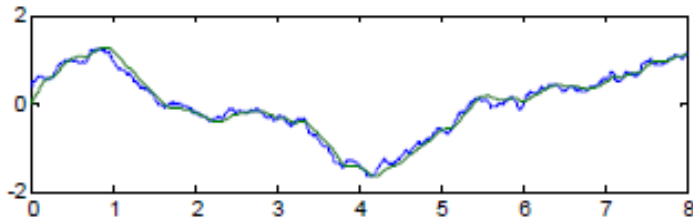
# Separação de componentes (ISO 25178-2)

- Filtro-S: remove componentes de pequena escala da superfície, resultando na superfície primária; usualmente é default dos equipamentos.
- Operação-F: remove a forma da superfície primária.
- Filtro-L: remove componentes de grande escala da superfície primária.
- O operador F nem sempre é um filtro no conceito estrito.



$\lambda$  Comprimento de onda  
a  $\lambda$  pequeno  
b  $\lambda$  grande

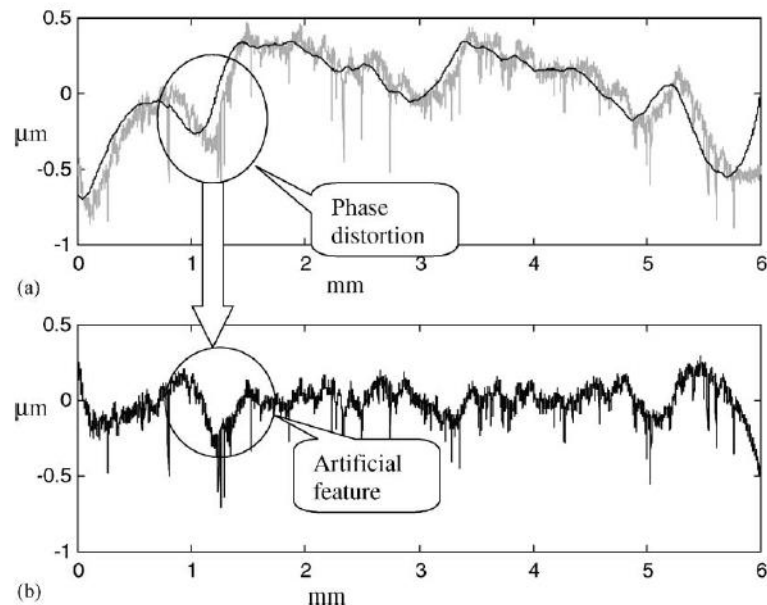
# Filtro linear



- A escala horizontal dos gráficos indica que o filtro deixou passar componentes de maior frequência (menor comprimento de onda): registro com número maior de “ciclos”.
- Filtro linear: seu efeito sobre a entrada não depende da amplitude desta (saída proporcional à entrada).

# Comportamento do filtro

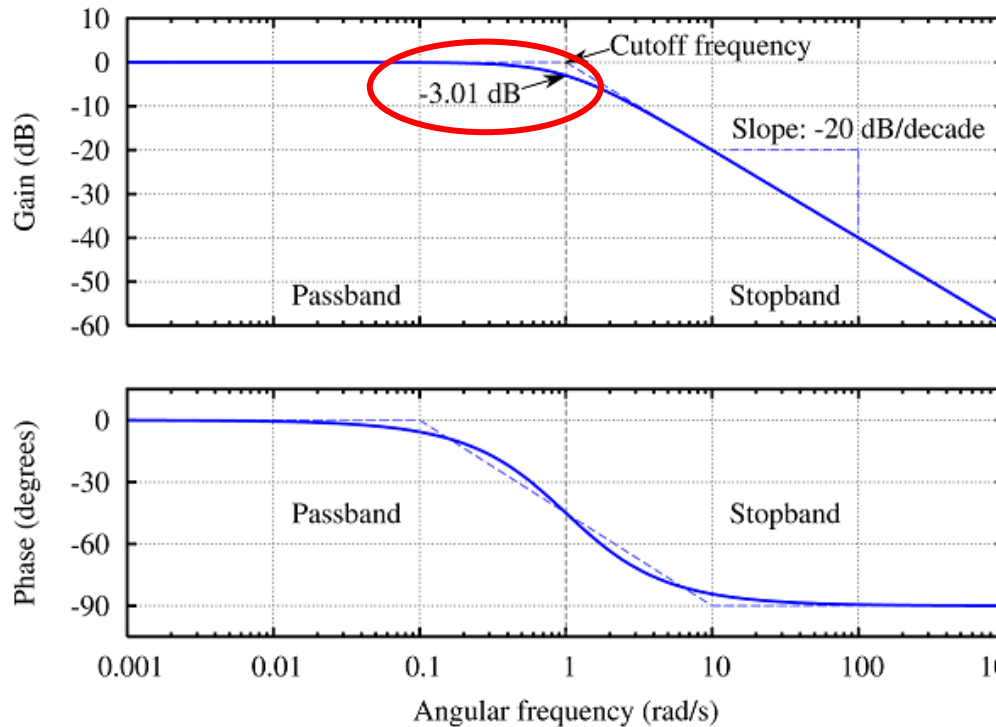
- O filtro é caracterizado pelo que produz em termos de atenuação e fase sobre cada frequência “f” do sinal de entrada.
- Atenuação (A):
  - relação entre amplitude de saída (S) e de entrada (E), usualmente expressa em decibéis (dB).
  - $A(\text{dB}) = 10 * \log_{10} S(\omega )/E(\omega )$ ;  $S(\omega )$  e  $E(\omega )$  amplitudes p/ a frequência “f” ( $\omega = 2\pi f$ ).
  - frequência de corte: atenuação de 50%  $A(f_c)=10*\log \frac{1}{2} = -3 \text{ dB}$ , *cut-off frequency*.
- Fase ( $\phi$ ):
  - indica quanto o filtro desloca a senoide de saída em relação à de entrada (distorção de fase);
  - problema importante nos filtros analógicos (RC por ex.).



- a) perfil e linha média gerada pelo filtro 2RC
- b) perfil de rugosidade

# Diagrama de Bode

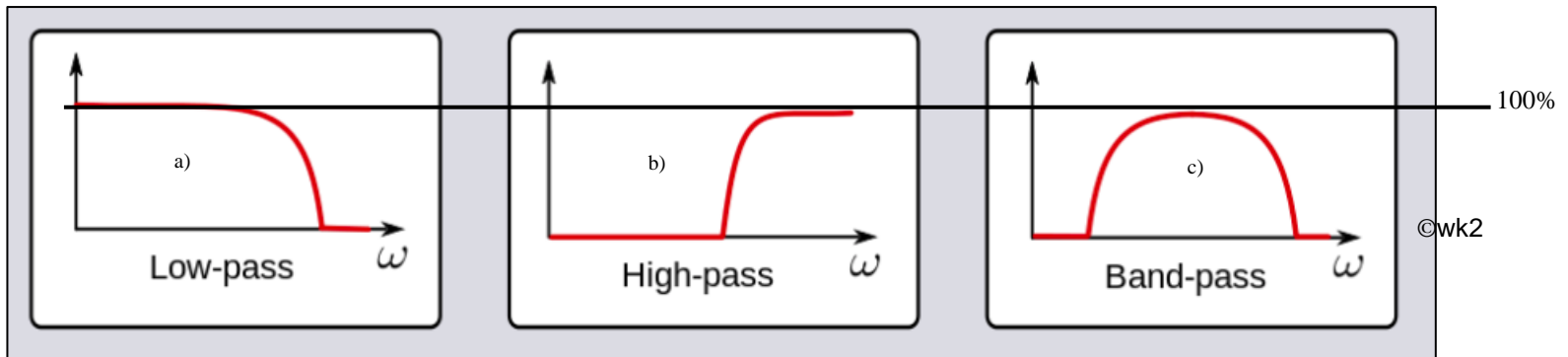
Amplitude



Fase

Na frequência de corte (cutoff) a atenuação é de 50% (-3,01 dB)

# Tipos de filtro

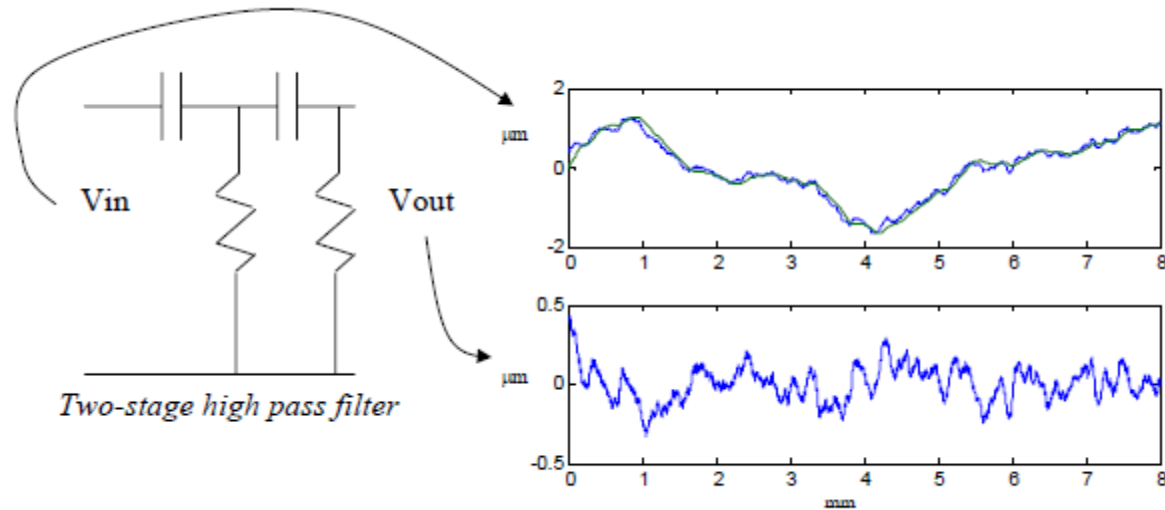


Filtro passa baixas

Filtro passa altas

Filtro passa faixa

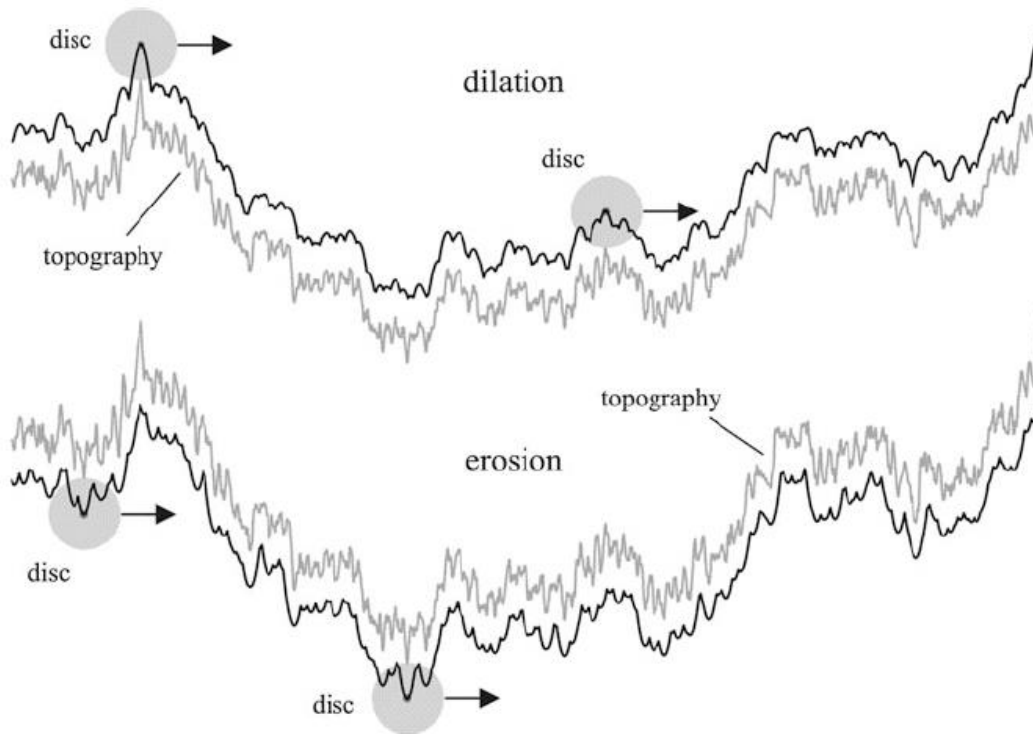
# Filtro 2RC



- Os filtros analógicos praticamente deixaram de existir, sendo substituídos por filtros digitais. ©jay
- Filtros atuais: Gaussiano, Gaussiano robusto, morfológico



# Filtro morfológico

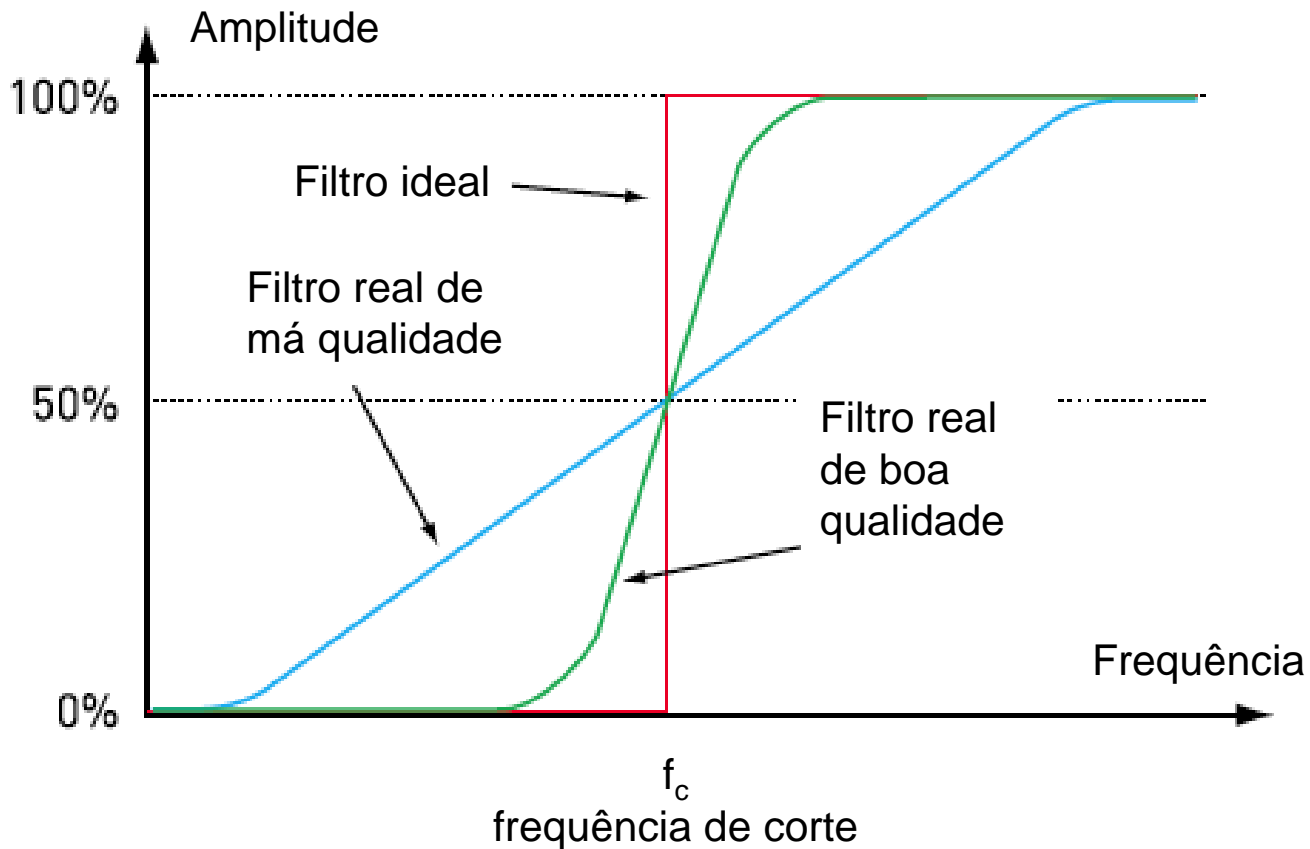


- O elemento estruturante é um disco.
- O diâmetro do disco “define” o cut-off.
- A operação pode ser feita conceitualmente sobre ou sob o perfil / superfície.

# OBSERVAÇÕES

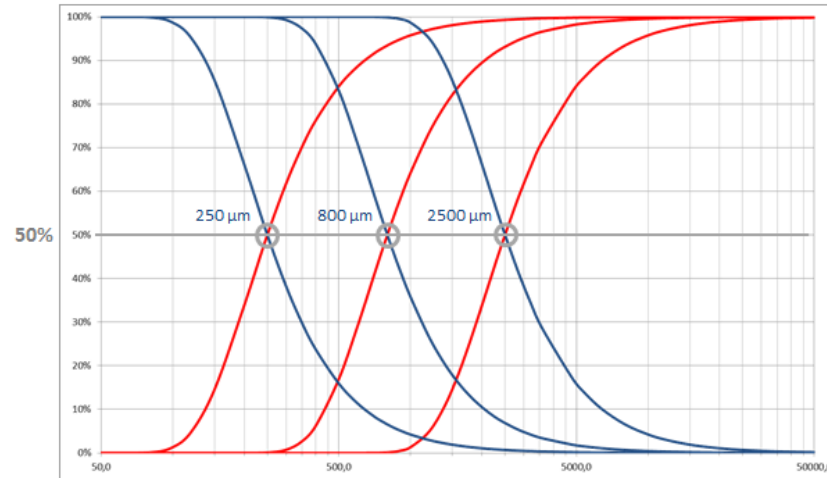
- Processamento de sinais: “cut-off” e “bandwidth” são usados sempre associados a frequências; frequência de corte e largura da faixa (ou banda) de frequências que “passam” pelo filtro.
- Metrologia de superfícies: atenção do tribologista dirigida para os comprimentos de onda espaciais; o termo "cutoff" adotado para designar o comprimento de onda  $\lambda_c$  (e não a frequência  $f_c$ ) para atenuação de 50%.
- Em Tribologia é corrente o uso de “cutoff” para indicar o comprimento de onda da “separação” rugosidade/ondulação.
- Normas de metrologia de superfícies retiveram o uso feito em processamento de sinais, para designar as faixas de passagem, sempre referidas a frequências; o “passa baixas” mencionado na norma (V. ISO 3274 - item 3.4.12), por exemplo, refere-se às **frequências baixas**, significando que o filtro deixa passar os comprimentos de onda longos.
- Atenção para o uso ora de comprimento de onda, ora de frequência, possível fonte de mal-entendidos.

# Atenuação do filtro: teórica x real



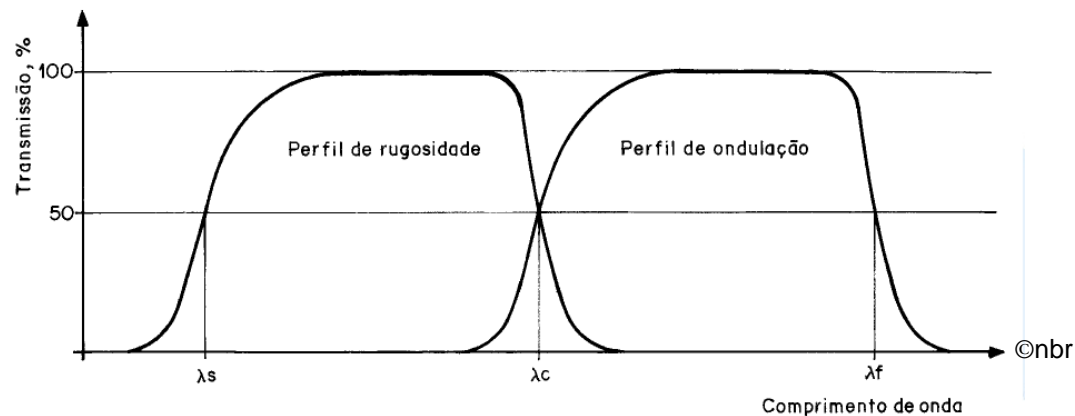
# Resultado da filtragem

Transmission



Filtros reais  $p/$   
diversos  $\lambda_c$

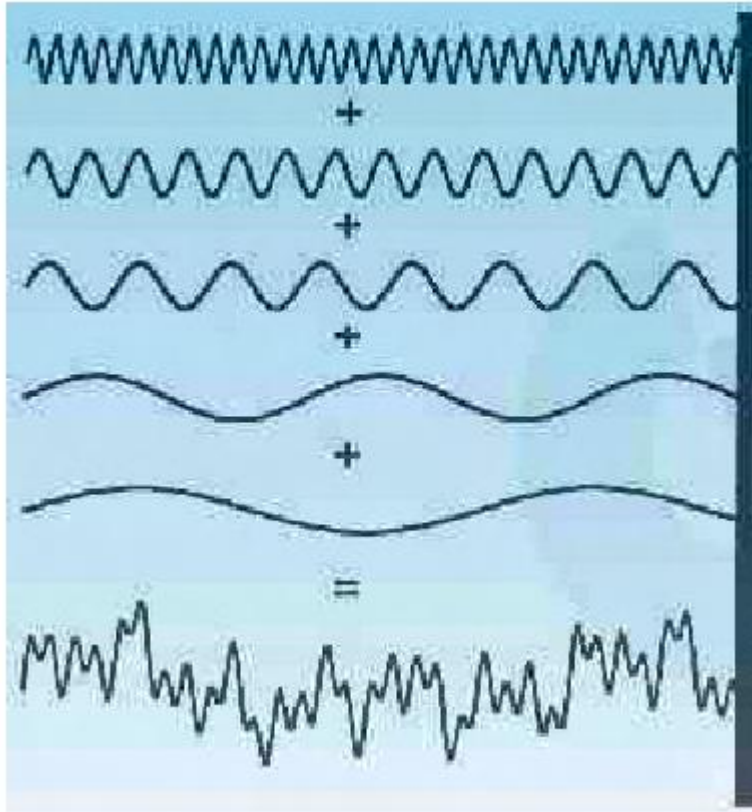
©bl2



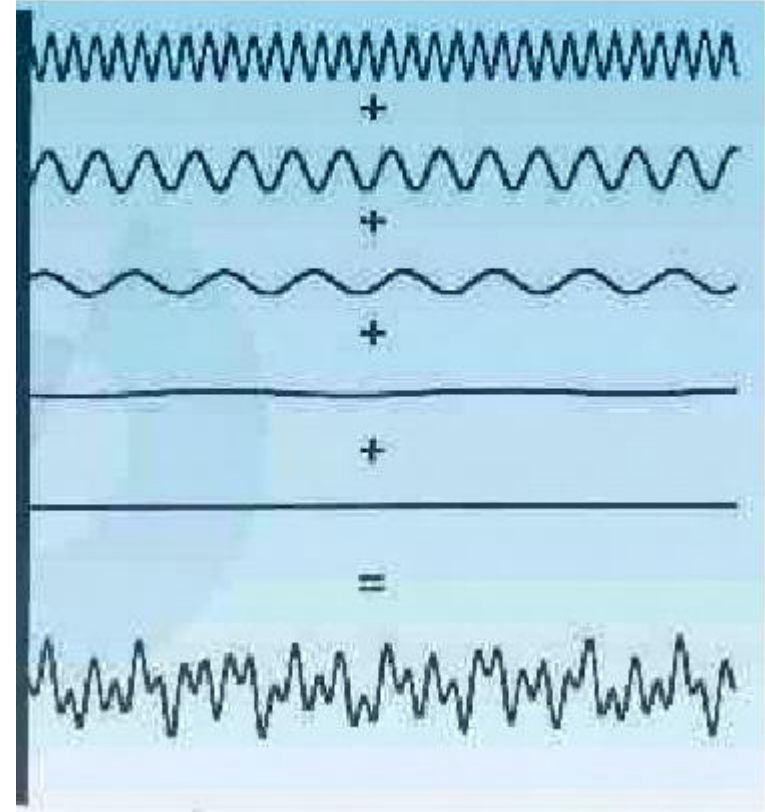
Características de transmissão dos perfis de rugosidade e de ondulação NBR ISO 4287 [87]

# Efeito do filtro

Soma de componentes



Eliminação de componentes



©4sh

# Escolha de $\lambda_c$

Selection of cutoff $\lambda_c$				
DIN EN ISO 4288, ASME B46.1				
Periodic profiles	Nonperiodic profiles		Cutoff	Sampl./ Eval. length
$R_{sm}$ (mm)	$R_z$ ( $\mu m$ )	$R_a$ ( $\mu m$ )	$\lambda_c$ (mm)	$l_r / l_n$ (mm)
over .013 up to .04	up to .1	up to .02	.08	.08 / .4
over .04 up to .13	over .1 up to .5	over .02 up to .1	.25	.25 / 1.25
over .13 up to .4	over .5 up to 10	over .1 up to 2	.8	.8 / 4
over .4 up to 1.3	over 10 up to 50	over 2 up to 10	2.5	2.5 / 12.5
over 1.3 up to 4	over 50 up to 200	over 10 up to 80	8	8 / 40

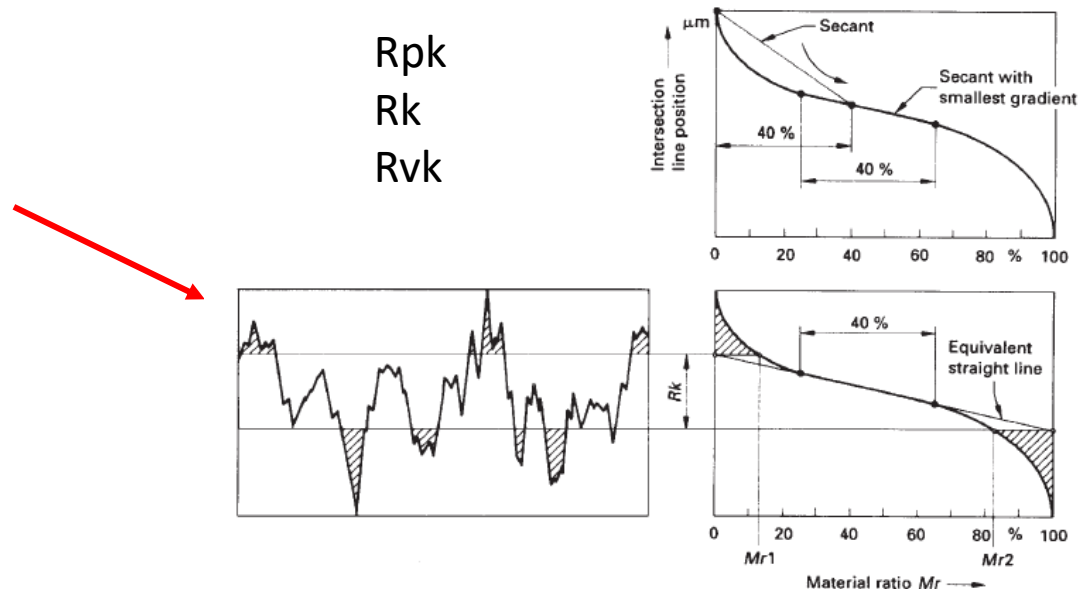
- O  $\lambda_c$  de um filtro de perfil determina quais comprimentos de onda pertencem à rugosidade e quais à ondulação.
- A escolha de  $\lambda_c$  é coberta por norma.
- O processo é iterativo, já que, para a maioria dos casos, no início não se conhece o valor dos parâmetros.
- De início é preciso estimar um parâmetro de altura –  $R_a$  ou  $R_z$  – ou de espaçamento entre elementos do perfil,  $R_{sm}$ .
- Feita a escolha, usar o  $\lambda_c$  da tabela e obter  $R_a$  ou  $R_z$ . Repetir, se necessário, até que o resultado fique dentro do indicado na tabela.

©mar



# Perfil de rugosidade: papel do filtro

- A família “k” de parâmetros é obtida a partir de um perfil de rugosidade filtrado.
- Procedimento para obter esse perfil: Normas ISO 13565-1 e ISO 21920-2.
- Método de filtração adequado a superfícies com vales profundos abaixo de um platô com acabamento fino.



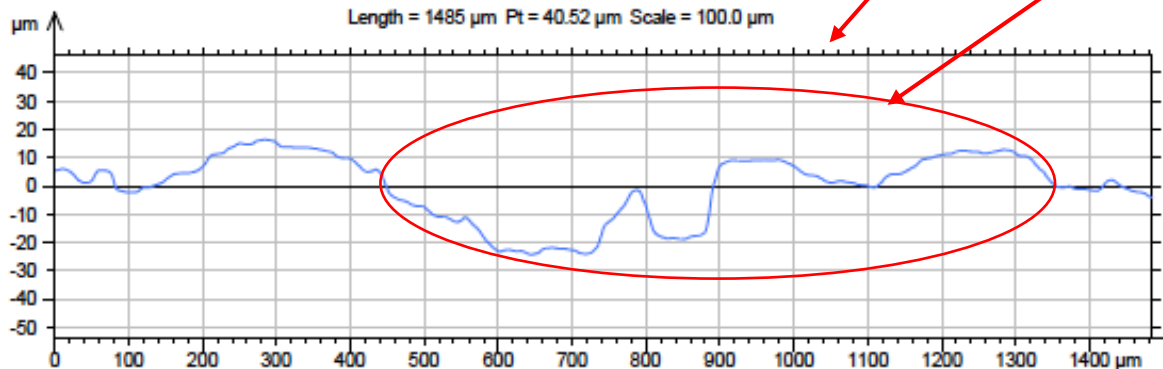
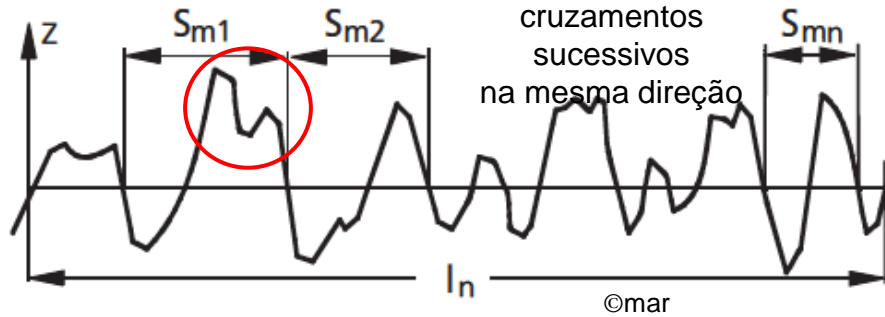
Norma recomenda o uso de filtro sem distorção de fase, com  $\lambda_c = 0,8 \text{ mm}$  e comprimento de amostragem de 4 mm.

# Quando sair da norma: distância média entre sulcos/picos

$R_{sm}$ ,  $R_{\Delta q}$

DIN EN ISO 4287, ASME B46.1

Mean width of profile elements  $R_{sm}$  is the arithmetic mean value of the widths of profile elements of the roughness

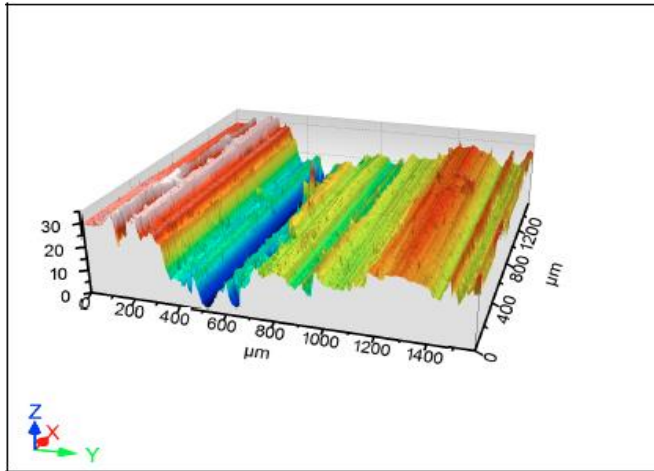


- Referência da Norma: distância média entre elementos do perfil.
- Perfil real de esmerilhamento
- A norma ignora “acidentes” importantes da superfície.

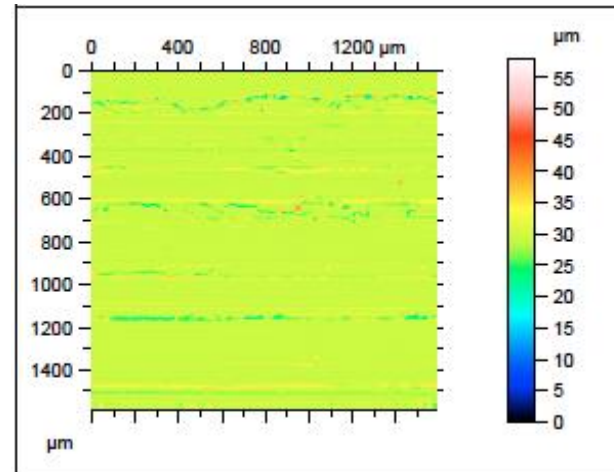


# Esmerilhamento de trilho

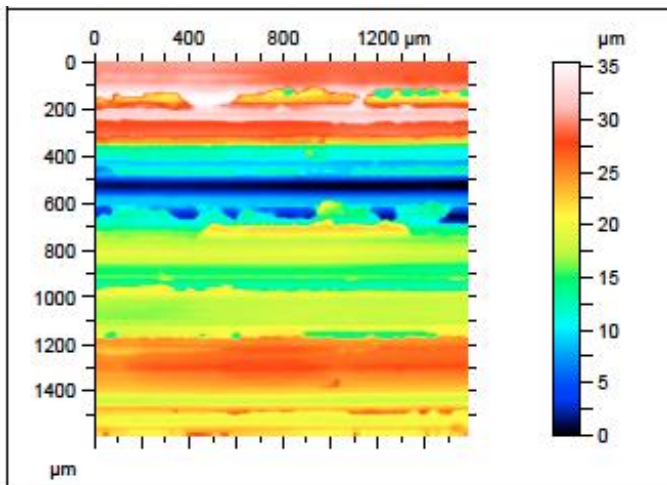
## Visão 3D da superfície



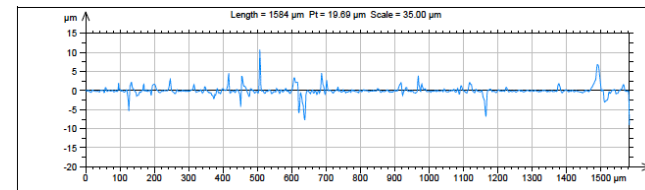
## Mapa de rugosidade



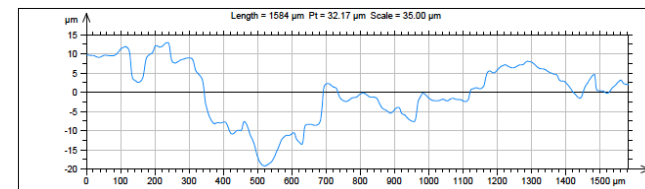
## Mapa de ondulação



## Perfil de rugosidade

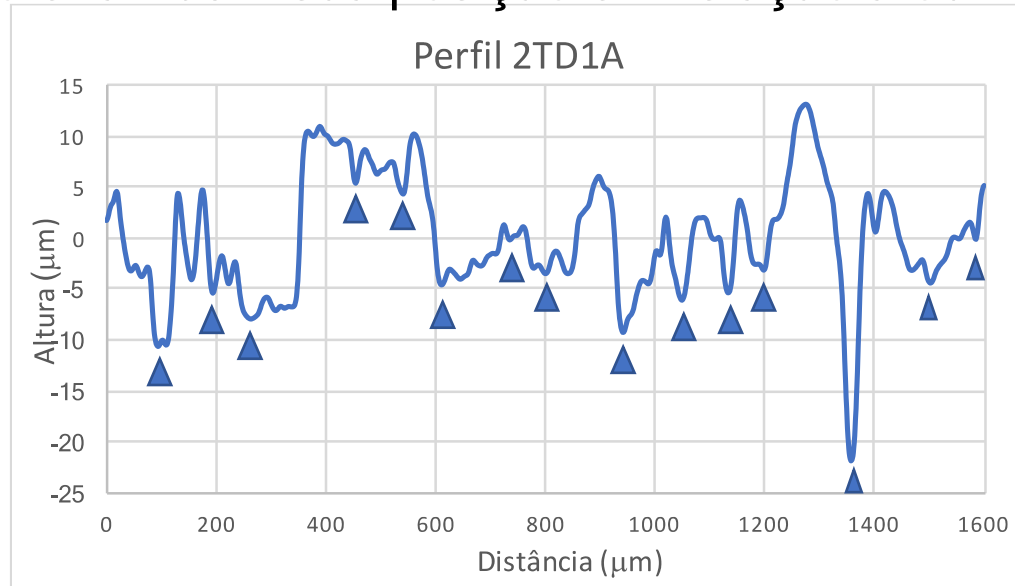


## Perfil de ondulação



# Perfil médio de ondulação do trilho

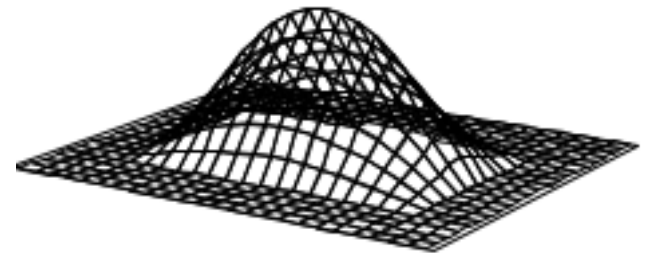
- Os vales do perfil correspondem a picos no trilho (medição feita sobre réplica, que inverte as alturas).
- Usada a função *findpeaks* do Matlab para identificar os picos.
- Só foram considerados picos que atendessem a dois critérios:
  - distância mínima de 50  $\mu\text{m}$  para picos vizinhos;
  - proeminência mínima de 1  $\mu\text{m}$ .
- No Matlab a proeminência é definida de forma precisa; leva em conta a altura do pico e também sua posição em relação a outros picos.



# Comparação de parâmetros 2D e 3D

- Só podem ser comparados parâmetros com equivalência direta, como  $S_q$  e  $R_q$ .  $S_{tr}$  (relação de aspecto da textura), por exemplo não tem parâmetro de perfil equivalente.
- Os parâmetros que caracterizam extremos  $S_p$ ,  $S_v$  e  $S_z$  tendem a apresentar valores mais altos; vales e picos de perfis quase sempre passam pelo flanco da colina.
- Parâmetros 2D e 3D apresentam normalmente uma correlação, mas não são comparáveis diretamente.
- Parâmetros 2D usualmente baseiam-se em contato, enquanto que os 3D utilizam abordagens sem contato; essa diferença pode conduzir a diferenças entre os valores medidos.

Norma ISO 25178-3



# Limitações na medição

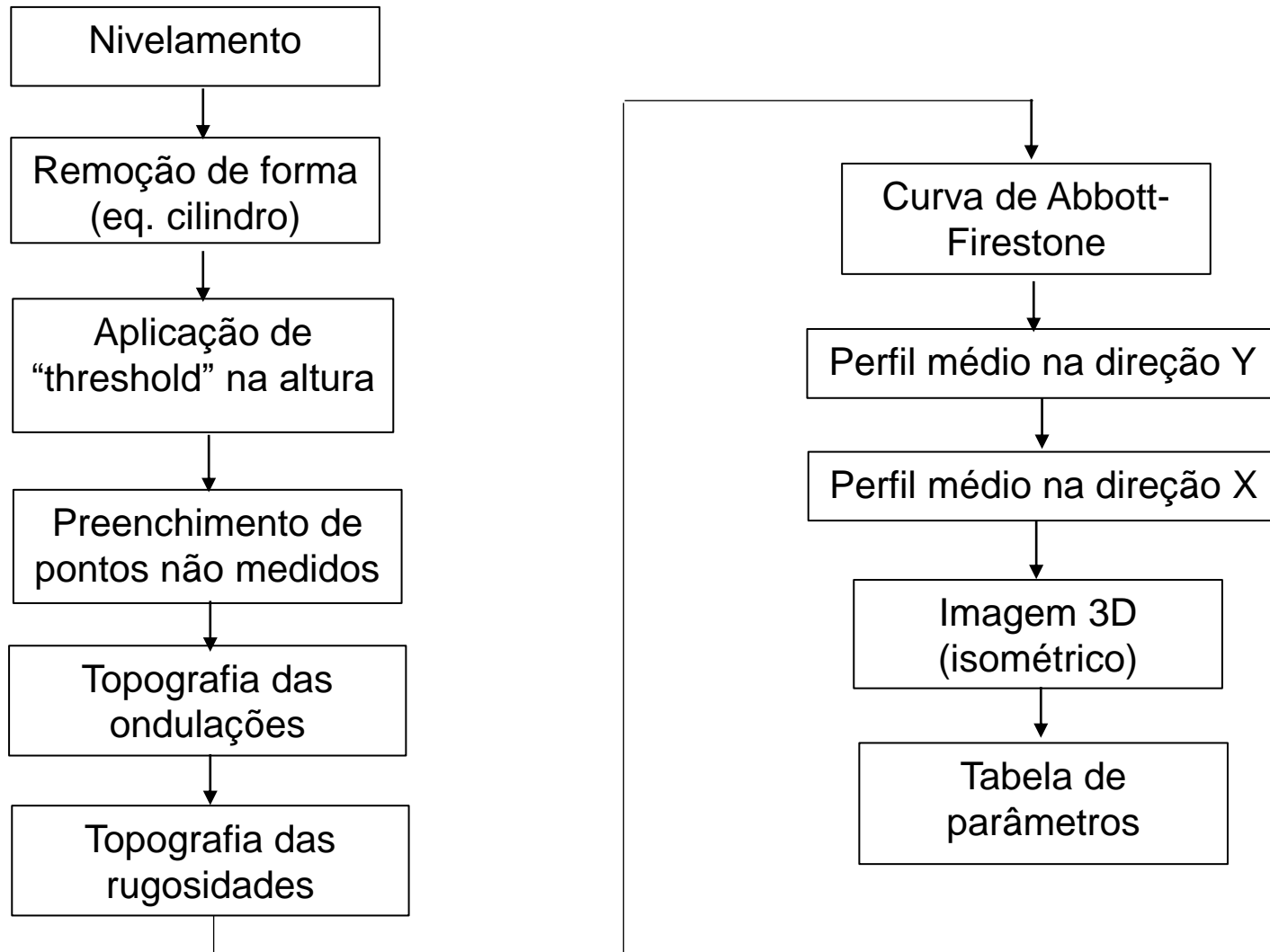
- A frequência mais elevada que se pode extrair depende da taxa de amostragem, isto é do tamanho dos pixels.
- Se  $f_c$  é a frequência significativa mais elevada na composição de um sinal, então será possível recompor esse sinal a partir de valores extraídos por amostragem, desde que os intervalos de amostragem sejam inferiores a  $1/(2 f_c)$ . Teorema de Shannon/Nyquist
- A frequência mais baixa que se pode identificar depende do tamanho da área amostrada.

# REGISTRO DE MEDIÇÃO

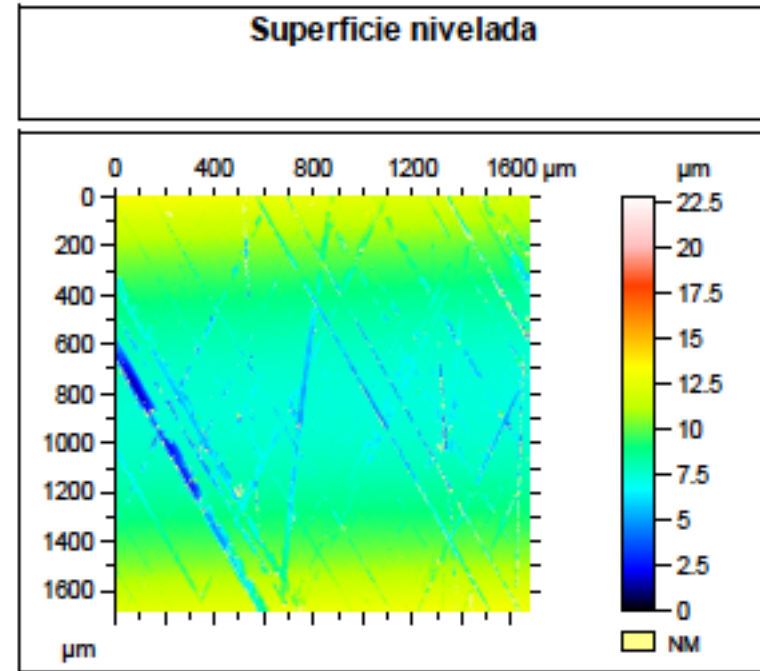
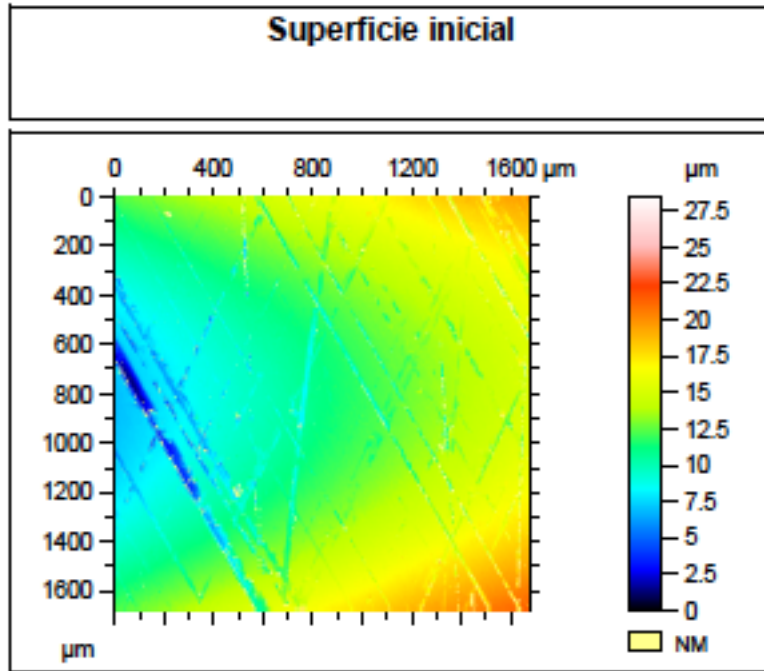
Perfilômetro óptico

Camisa de cilindro (motor Diesel)

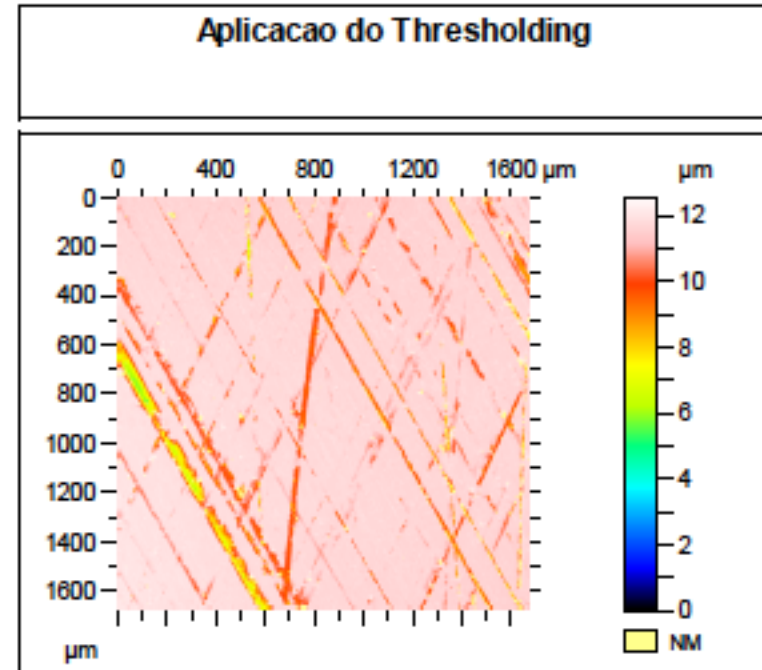
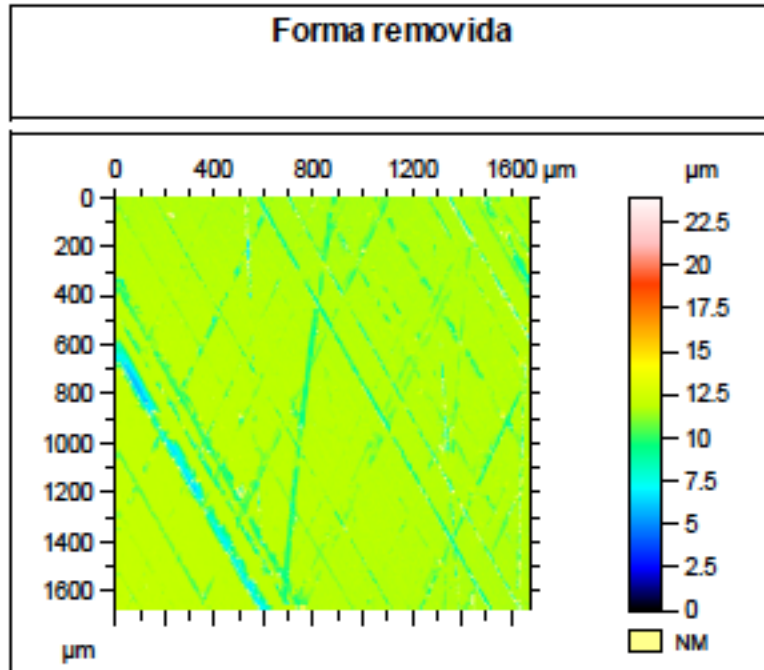
# Programa de medição para a camisa



# Original => Nivelamento

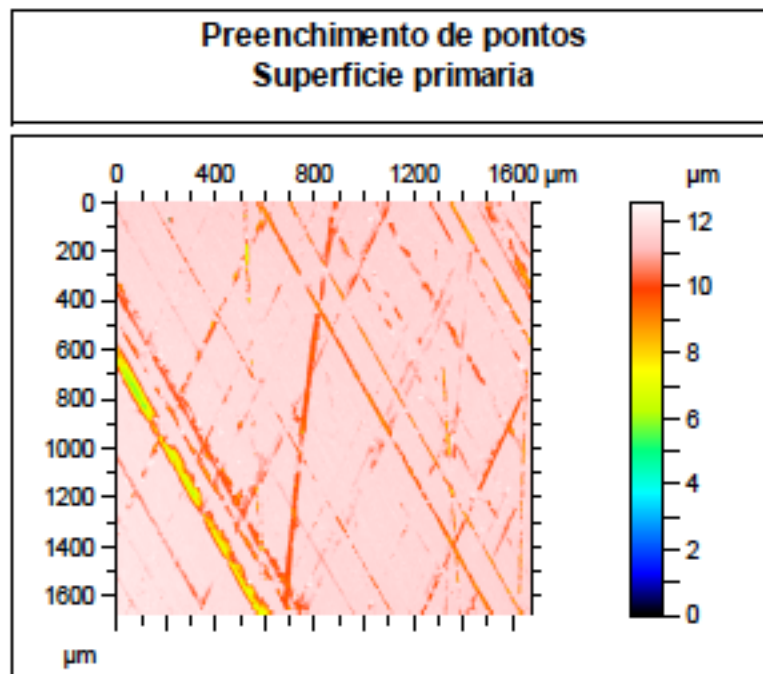


# Remoção de forma => Tresholding

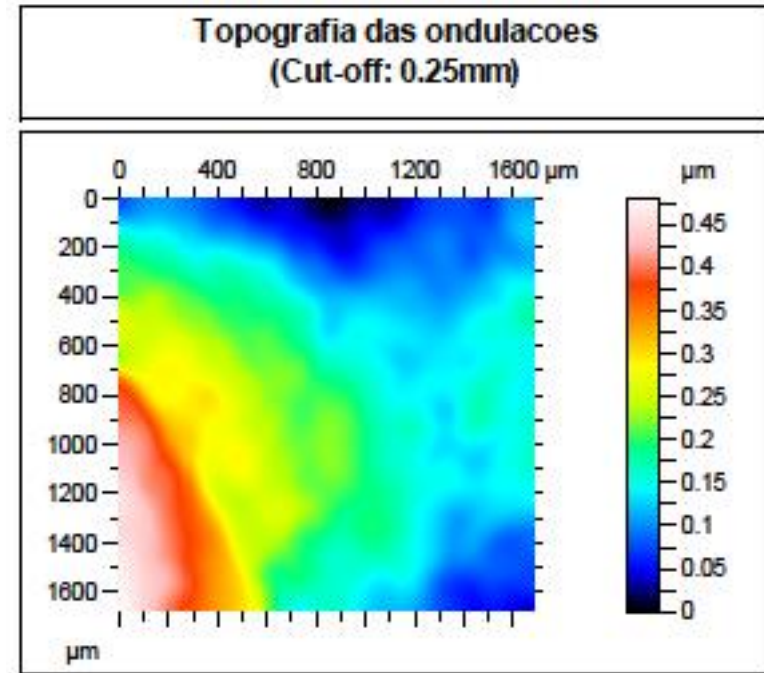
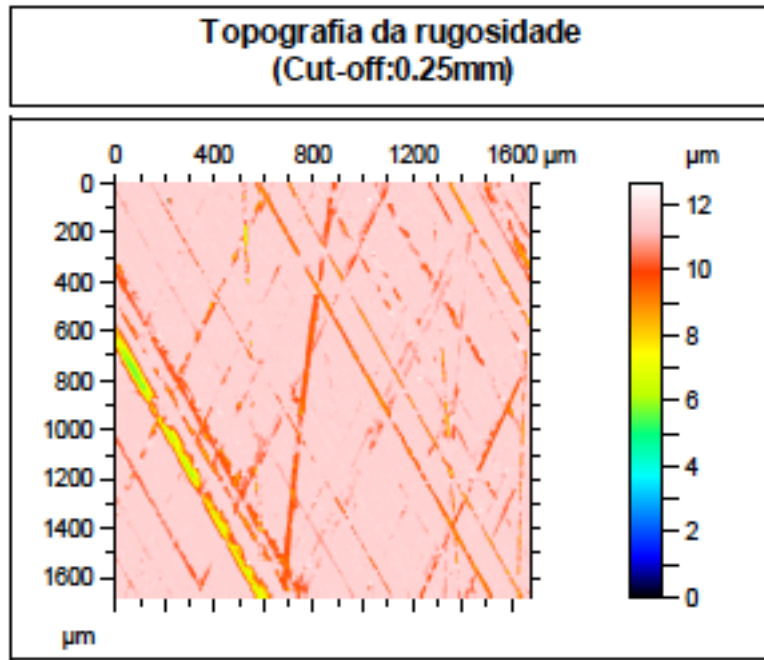




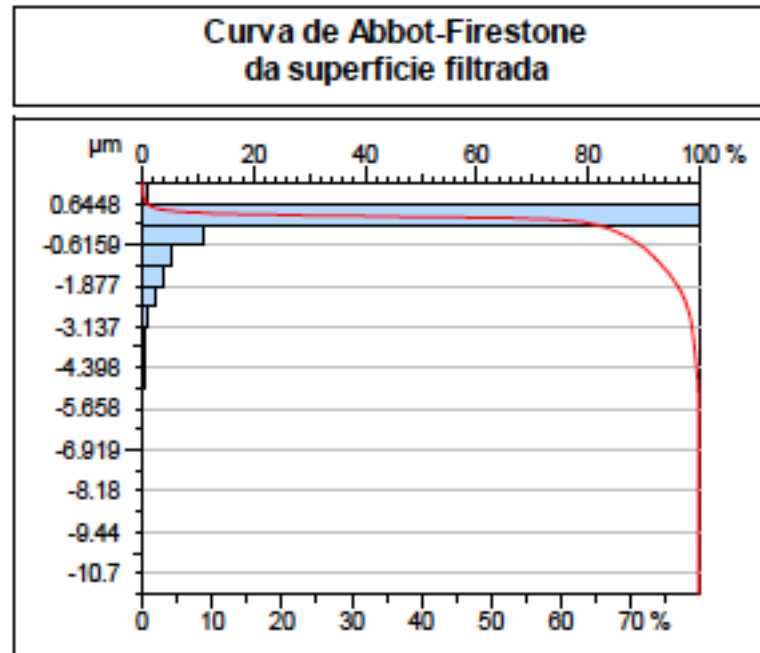
# Preenchimento de pontos não medidos



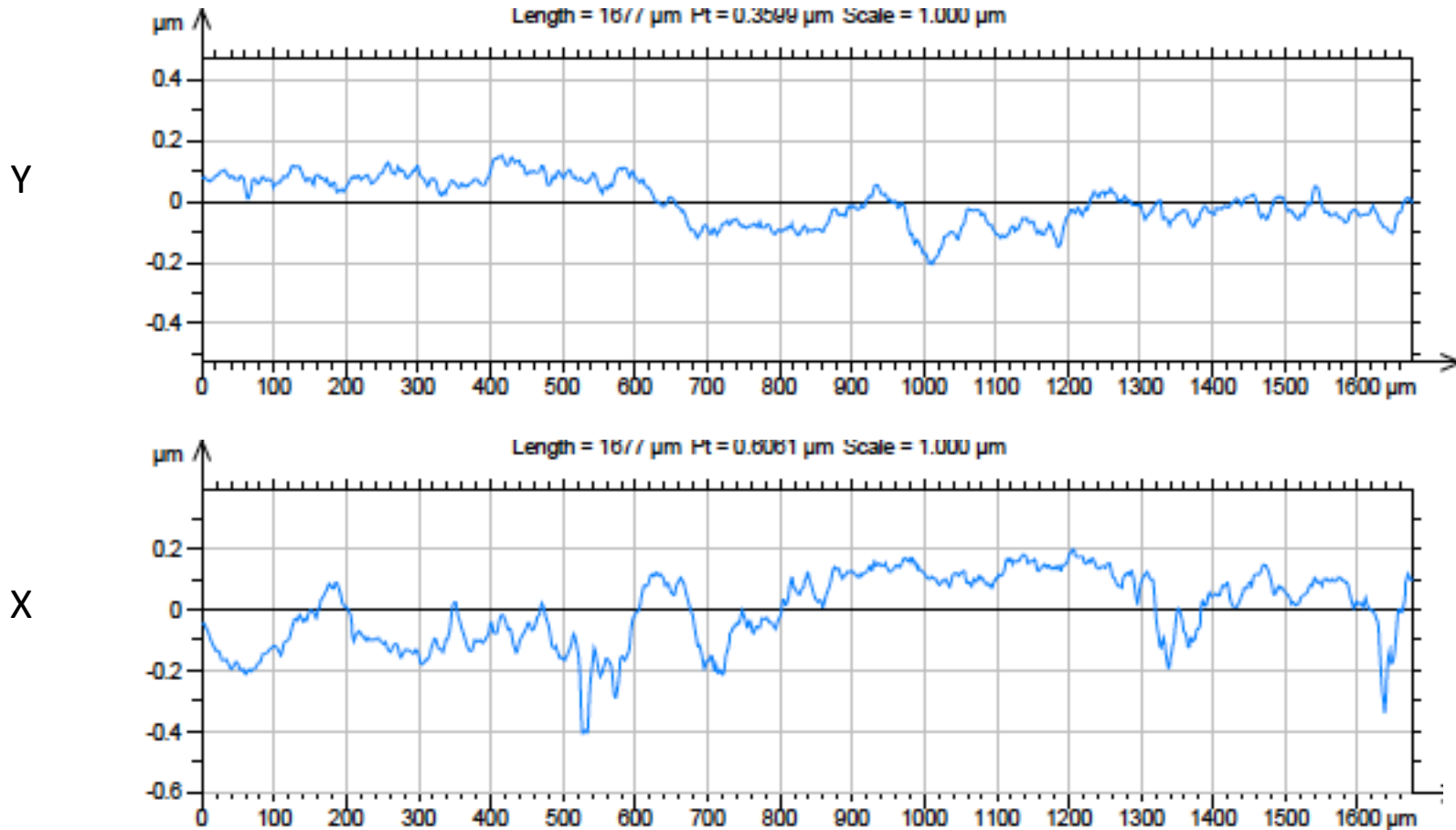
# Superfícies de rugosidade e de ondulação



# Curva de Abbott-Firestone



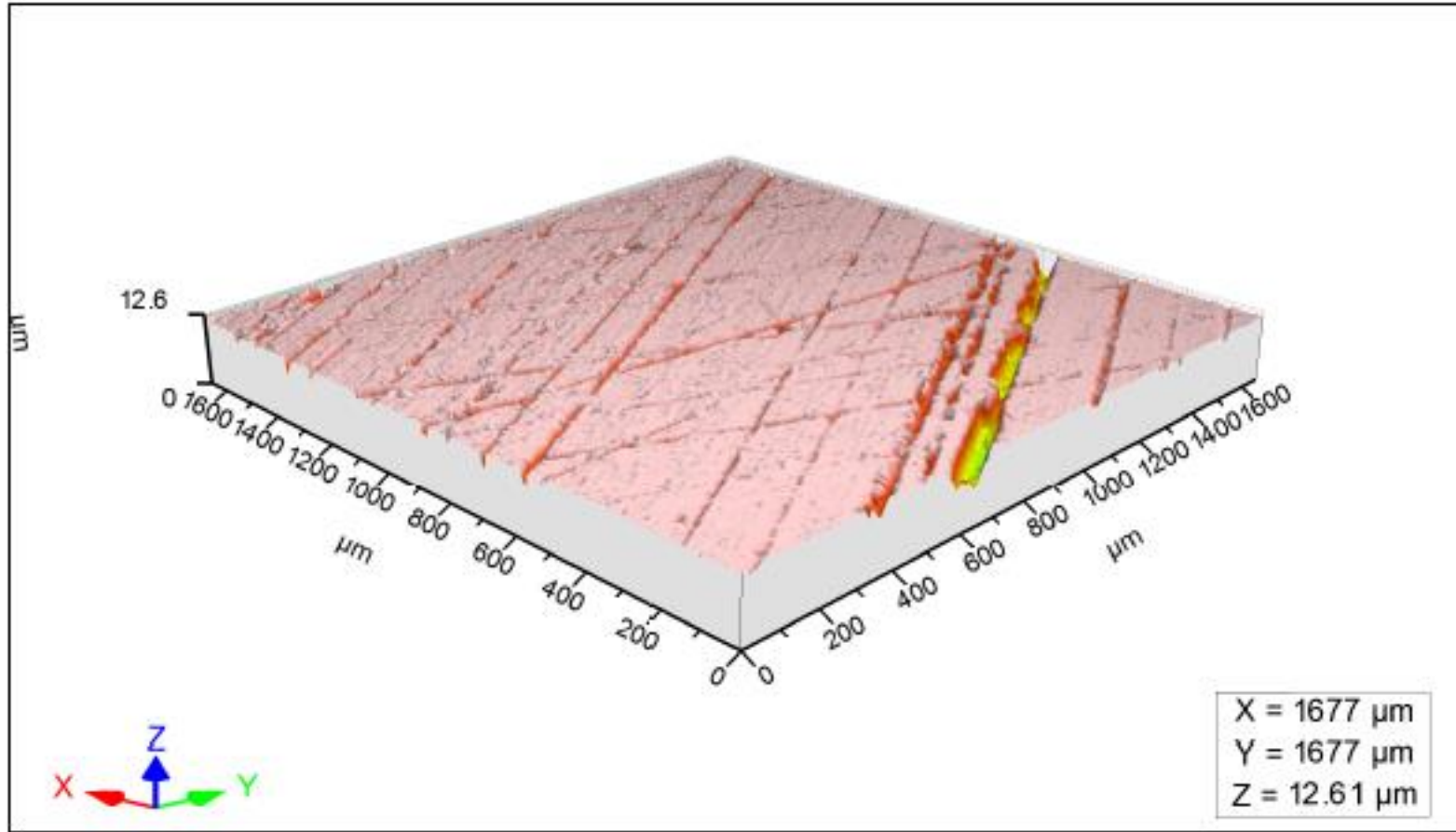
# Perfis médios nas direções X e Y



Os perfis médios não são representativos da superfície

# Isométrico da superfície filtrada

Visualização tridimensional da amostra filtrada

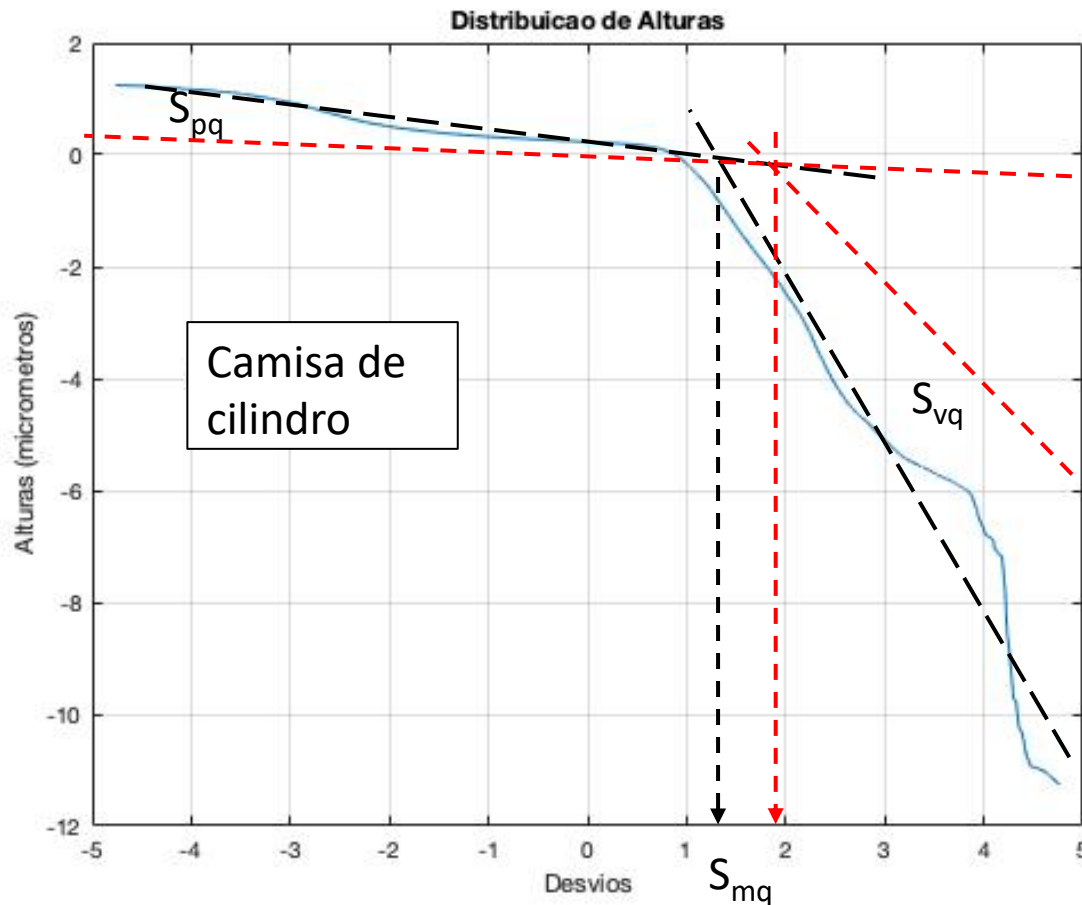


# Tabela de parâmetros

ISO 25178				
<b>Height Parameters</b>				
<b>Sa</b>	0.4323	$\mu\text{m}$		Arithmetic mean height
<b>Sq</b>	0.7450	$\mu\text{m}$		Root mean square height
<b>Ssk</b>	-3.603			Skewness
<b>Sku</b>	18.55			Kurtosis
<b>Sp</b>	1.275	$\mu\text{m}$		Maximum peak height
<b>Sv</b>	11.33	$\mu\text{m}$		Maximum pit height
<b>Sz</b>	12.61	$\mu\text{m}$		Maximum height
<b>Functional Parameters</b>				
<b>Smr</b>	34.30	%	$c = 1 \mu\text{m}$ under the highest peak	Areal material ratio
<b>Smc</b>	0.3677	$\mu\text{m}$	$p = 10\%$	Inverse areal material ratio
<b>Sxp</b>	2.590	$\mu\text{m}$	$p = 50\%, q = 07.5\%$	Extreme peak height
<b>Spatial Parameters</b>				
<b>Sal</b>	24.10	$\mu\text{m}$	$s = 0.2$	Auto-correlation length
<b>Str</b>	0.02706		$s = 0.2$	Texture-aspect ratio
<b>Std</b>	119.5	°	Reference Angle = 0°	Texture direction
<b>Hybrid Parameters</b>				
<b>Sdq</b>	0.1694			Root mean square gradient
<b>Sdr</b>	1.369	%		Developed Interfacial area ratio
<b>Functional Parameters (Volume)</b>				
<b>Vm</b>	0.01005	$\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$	$p = 10\%$	Material volume
<b>Vv</b>	0.3778	$\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$	$p = 10\%$	Void volume
<b>Vmp</b>	0.01005	$\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$	$p = 10\%$	Peak material volume
<b>Vmc</b>	0.1677	$\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$	$p = 10\%, q = 80\%$	Core material volume
<b>Vvc</b>	0.1524	$\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$	$p = 10\%, q = 80\%$	Core void volume
<b>Vvv</b>	0.2254	$\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$	$p = 80\%$	Pit void volume

Feature Parameters				
<b>Spd</b>	0.0002372	$1/\mu\text{m}^2$	pruning = 5%	Density of peaks
<b>Spc</b>	0.3633	$1/\mu\text{m}$	pruning = 5%	Arithmetic mean peak curvature
<b>S10z</b>	7.601	$\mu\text{m}$	pruning = 5%	Ten point height
<b>S5p</b>	1.909	$\mu\text{m}$	pruning = 5%	Five point peak height
<b>S5v</b>	5.692	$\mu\text{m}$	pruning = 5%	Five point pit height
<b>Sda</b>	2238	$\mu\text{m}^2$	pruning = 5%	Mean daie area
<b>Sha</b>	3756	$\mu\text{m}^2$	pruning = 5%	Mean hill area
<b>Sdv</b>	98.89	$\mu\text{m}^3$	pruning = 5%	Mean daie volume
<b>Shv</b>	100.5	$\mu\text{m}^3$	pruning = 5%	Mean hill volume
<b>Functional Parameters (Stratified surfaces)</b>				
<b>Sk</b>	0.2143	$\mu\text{m}$	not filtered, End-effects managed	Core roughness depth
<b>Spk</b>	0.2109	$\mu\text{m}$	not filtered, End-effects managed	Reduced summit height
<b>Svk</b>	2.044	$\mu\text{m}$	not filtered, End-effects managed	Reduced valley depth
<b>Smr1</b>	11.81	%	not filtered, End-effects managed	Upper bearing area
<b>Smr2</b>	75.46	%	not filtered, End-effects managed	Lower bearing area
<b>Spq</b>	0.06088		Robust Gaussian Filter, 0.008 mm, End-effects managed	Plateau root mean square roughness
<b>Svq</b>	1.934		Robust Gaussian Filter, 0.008 mm, End-effects managed	Valley root mean square roughness
<b>Smq</b>	97.29		Robust Gaussian Filter, 0.008 mm, End-effects managed	Material ratio at plateau-to-valley transition
<b>EUR 15178N</b>				
<b>Hybrid Parameters</b>				
<b>Sdq</b>	0.1694			Root mean square slope
<b>Sds</b>	0.02019	$1/\mu\text{m}^2$		density of summits
<b>Ssc</b>	0.08934	$1/\mu\text{m}$		Arithmetic mean summit curvature
<b>Sdr</b>	1.369	%		Developed Interfacial area
<b>Sfd</b>	2.609			Fractal dimension of the surface

# Resultado do CCI vs determinação gráfica



Resultados do CCI em vermelho  
(média de 5 pts):

$$S_{pq} = 0,06 \pm 0,02 \text{ (}\mu\text{m)}$$

$$S_{vq} = 1,8 \pm 0,06 \text{ (}\mu\text{m)}$$

$$S_{mq} = 97 \pm 1 \% \text{ (}S=1,9\text{)}$$

Coefficientes de variação:

$$S_{pq} : 30 \%$$

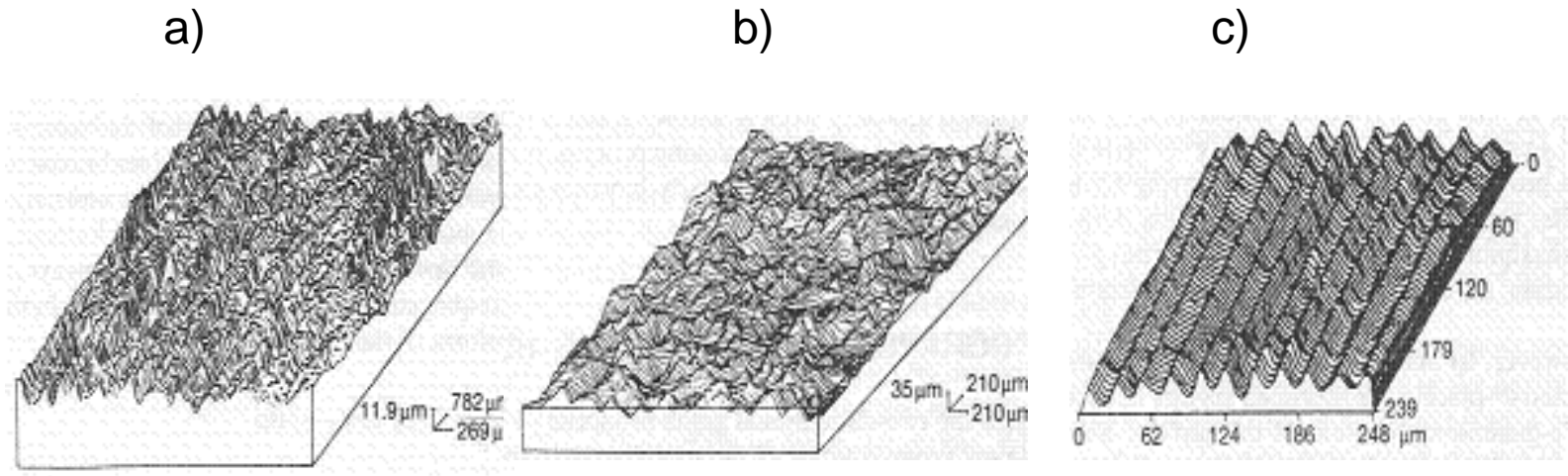
$$S_{vq} : 35 \%$$

$$S_{mq} : 1 \%$$

# TOPOGRAFIA X PROCESSO/USO



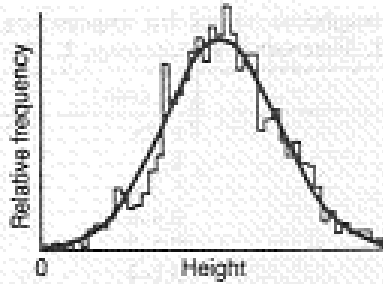
# Topografia x processo



©hut

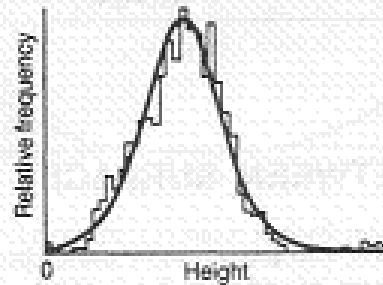
- a) aço + retificação com rebolo
- b) aço + jato de granalha
- c) superfície torneada

# Distribuições de alturas



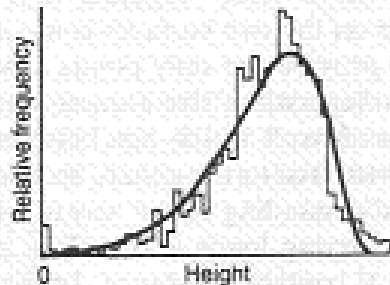
(a)

Aço doce – retífica *centerless*



(b)

Aço doce – torneado

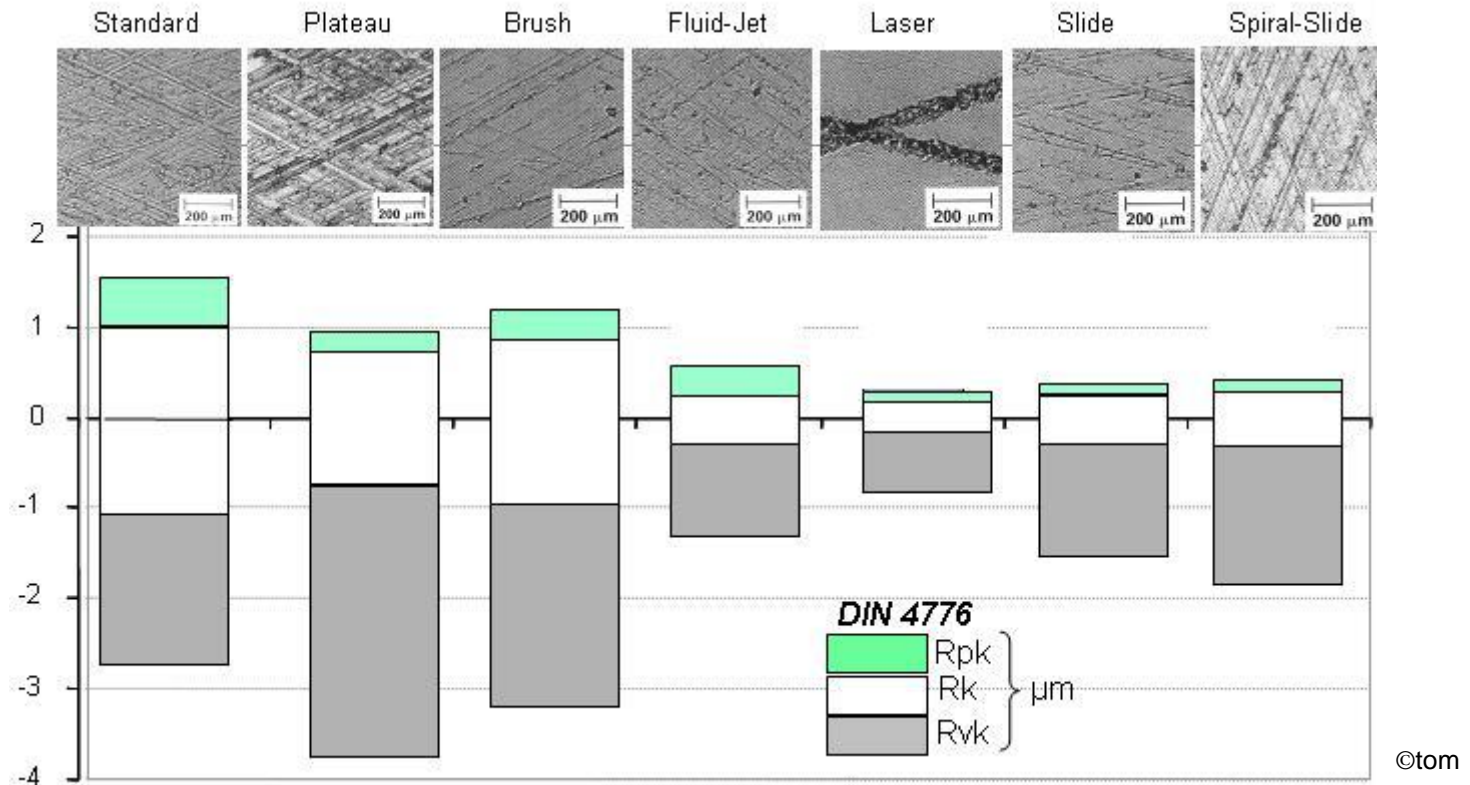


(c)

Ferro fundido – torneado

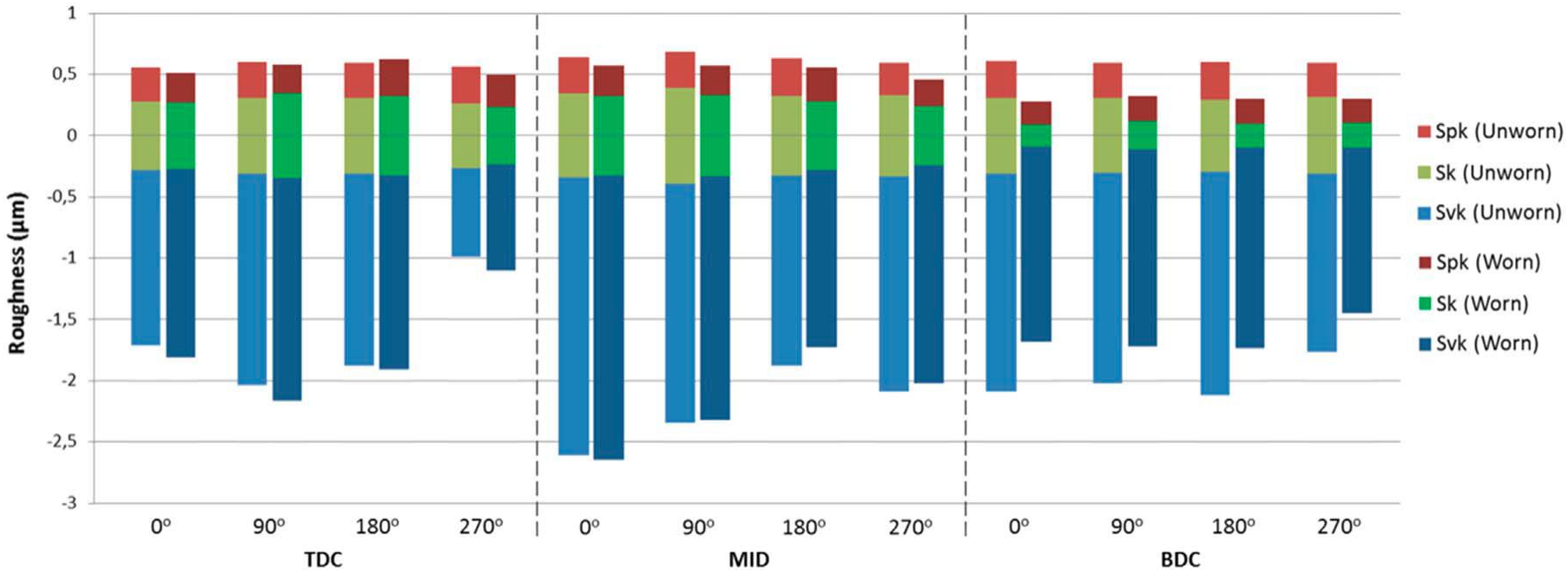
©hut

# Acabamento de cilindros- diversos processos



$R_{pk}$  está associado aos picos; material que desgasta mais rápido  
 $R_k$  corresponde ao material que dá sustentação no contato (núcleo)  
 $R_{vk}$  pode ser associado ao volume de “reserva” de óleo

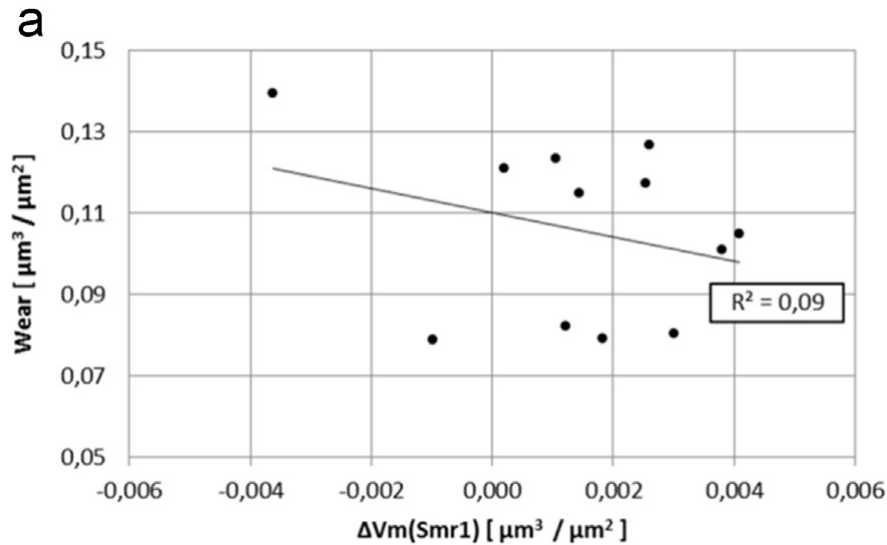
# Desgaste de motores



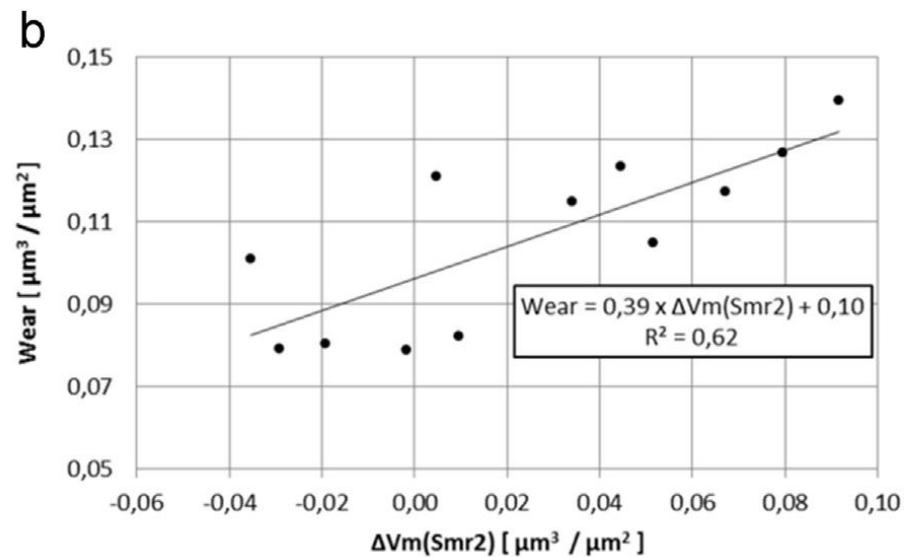
©rob

Parâmetros da família  $S_k$  antes e após teste de bancada

# Correlação parâmetro x desgaste



a) Gráfico de desgaste x variação do volume de picos



b) Gráfico de desgaste x variação da soma dos volumes de picos e núcleo.

A correlação entre desgaste e redução da altura (volume) dos picos foi praticamente inexistente, mostrando a necessidade de olhar o desgaste não apenas dos picos, mas também na região mais central do relevo (núcleo).

# Desafios

## Caracterização de superfícies “free form”



Casco de navio coberto de craca.

Infestação de mexilhão dourado em hidrelétricas.



# OBRIGADO



FIM





# Apêndice – Parâmetros principais

Parâmetro	Item da Norma	Definição	Unidade	Valor p/ Gaussiana	Observações
<b>4.1 PARÂMETROS DE ALTURA</b>					
$S_a$	4.1.7	Média aritmética das alturas em módulo	$\mu\text{m}$	$1,25 S_q$	
$S_q$	4.1.1	Altura média quadrática (RMS)	$\mu\text{m}$		Base p/ relações entre parâmetros
$S_p$	4.1.4	Maior altura de pico	$\mu\text{m}$		
$S_v$	4.1.5	Maior profundidade de poço	$\mu\text{m}$		
$S_z$	4.1.6	Maior diferença de altura	$\mu\text{m}$		$= S_p + S_v$ (antigo $R_t$ )
$S_{sk}$	4.1.2	Assimetria da distribuição		zero	
$S_{ku}$	4.1.3	Curtose da distribuição		3	
<b>4.2 PARÂMETROS ESPACIAIS</b>					
$S_{al}$	4.2.1	Comprimento de auto-correlação	$\mu\text{m}$		Distância para o decaimento de ACF atingir 0,2
$S_{tr}$	4.2.2	Relação de forma da textura			Relação entre maior e menor distâncias para a ACF atingir 0,2
<b>4.3 PARÂMETROS HÍBRIDOS</b>					
$S_{dq}$	4.3.1	Valor médio quadrático do gradiente da superfície			V. Norma, ângulos da normal à superfície
$S_{dr}$	4.3.2	Relação área desenvolvida/área aparente menos 1 x 100	%		Área desenvolvida obtida por triangulação de cada conjunto de quatro pontos. Ver [Stout]
<b>4.4 PARÂMETROS FUNCIONAIS E RELACIONADOS</b>					
$S_k$	4.4.4.2	Altura do núcleo	$\mu\text{m}$	$2,5 S_q$	Distância entre o nível mais alto e o mais baixo da “parte central” da superf. V. Fig. 5 da Norma
$S_{pk}$	4.4.4.3	“Altura reduzida dos picos”	$\mu\text{m}$	$1,73 S_q$	2 x Altura média dos picos acima do núcleo

# Apêndice – Parâmetros principais

Parâmetro	Item da Norma	Definição	Unidade	Valor p/ Gaussiana	Observações
<b>4.4 PARÂMETROS FUNCIONAIS E RELACIONADOS (continuação)</b>					
$S_{vk}$	4.4.4.4	“Altura reduzida de bacias”	$\mu\text{m}$	$1,73 S_q$	2 x Profundidade média das bacias abaixo do núcleo
$S_{mr1}$	4.4.4.5	Relação entre área de material e área total na altura da separação entre núcleo e cumes	%	10,5 %	Ver Fig. 5 da Norma.
$S_{mr2}$	4.4.4.6	Relação entre área de material e área total na altura da separação entre núcleo e bacias	%	89,5 %	Ver Fig. 5 da Norma.
$S_{vq}$	4.4.4.8	Desvio padrão da distribuição de alturas na região de bacias	$\mu\text{m}$		Voltado para brunimento de camisas.
$S_{pq}$	4.4.4.9	Desvio padrão da distribuição de alturas na região de platô	$\mu\text{m}$		Voltado para brunimento de camisas.
$S_{mq}$	4.4.4.10	Relação entre área de material e área total na transição platô/bacias	%		Ver Figs. 6 e 7 da Norma
$V_{m(p)}$	4.4.6	Volume de material por unidade de área desde 0% até uma probabilidade p (ou um dado $S_{mr}$ )	$\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$		Ver [Blateyron]. Unidade: ver $V_{V(p)}$
$V_{mp}$	4.4.6.1	Volume de material dos cumes acima de $S_{mr} = 10\%$	$\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$		Unidade: ver $V_{V(p)}$
$V_{mc}$	4.4.6.2	Volume de material do núcleo entre $S_{mr1} = 10\%$ e $S_{mr2} = 80\%$	$\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$	$0,72 S_q$	Unidade: ver $V_{V(p)}$
$V_{V(p)}$	4.4.5	Volume de vazios por unidade de área desde uma probabilidade “p” (ou um dado mr) até 100%	$\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$		Ver [Blateyron]. Unidades CCI (norma recomenda ml/m <sup>2</sup> )
$V_{vv}$	4.4.5.1	Volume de vazios nas bacias além de $S_{mr2} = 80\%$	$\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$		Default: $S_{mr2} = 80\%$ . Unidade: ver $V_{V(p)}$
$V_{vc}$	4.4.5.2	Volume de vazios do núcleo com $S_{mr1} = 10\%$ e $S_{mr2} = 80\%$	$\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$	$0,92 S_q$	Unidade: ver $V_{V(p)}$

# Apêndice – Parâmetros principais

Parâmetro	Item da Norma	Definição	Unidade	Valor p/ Gaussiana	Observações
<b>6.8 PARÂMETROS DE ASPECTO</b>					
$S_{pd}$	6.8.1	Densidade média de picos	1/ mm <sup>2</sup>		Obtido após “Wolf pruning” de 5 %
$S_{pc}$	6.8.2	Curvatura média de picos	1/ mm		Obtido após “Wolf pruning” de 5 %
$S_{5p}$	6.8.3.1	Altura média dos 5 picos mais altos	μm		Obtido após “Wolf pruning” de 5 %
$S_{5v}$	6.8.3.2	Altura média dos 5 poços mais profundos	μm		Obtido após “Wolf pruning” de 5 %
$S_{10p}$	6.8.3.3	Soma de $S_{5p}$ e $S_{5v}$	μm		
$S_{da(c)}$	6.8.4	Área média das bacias na altura c	mm <sup>2</sup>		Após segmentação da superfície
$S_{ha(c)}$	6.8.5	Área média de colinas na altura c	mm <sup>2</sup>		Após segmentação da superfície
$S_{dv(c)}$	6.8.6	Volume médio de bacias na altura c	mm <sup>3</sup>		Após segmentação da superfície
$S_{hv(c)}$	6.8.7	Volume médio de colinas na altura c	mm <sup>3</sup>		Após segmentação da superfície

# Créditos/Referências

**4sh:** [dc144.4shared.com/doc/B-XI8/AGT/preview.html/](http://dc144.4shared.com/doc/B-XI8/AGT/preview.html/)

**acn:** <https://www.centralnacionalunimed.com.br/documents/20182/559998/acne-337x337.jpg/095170a6-5e42-4608-87b5-208b389e4d55?t=149400499530>

**bl2:** Blateyron, F., *Good practices for the use of areal filters*, 3<sup>rd</sup> Seminar on Surface Metrology of the Americas (SSMA), Albuquerque, USA, maio 2014.

**bla:** Blateyron, F., in *Characterization of Areal Surface Texture*, R. Leach editor, Springer, 2013.

**bmp:** <http://www.all4humor.com/images/files/Bumpy%20Road.jpg>

**cel:** <https://www.formularium.com.br/inform/wpcontent/uploads/2018/11/bundas.png>

**cst:** <http://bestcars.uol.com.br/bc/wp-content/uploads/2016/03/Estrada-de-terra.jpg>

**drx:** University <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjvlyRod3jAhVzGLkGHca5Cr0QFjABegQIABAC&url=http%3A%2F%2Fmem.drexel.edu%2Fzhou%2Flinkclick.aspx%3Ffileticket%3D9IYI81DIR%252Bc%253D%26tabid%3D68&usg=AOvVaw1f6MFKI4Hfe-2-DfbMdOpm>

**fra:** Franco, L.A. e Sinatora, A., 3D surface parameters (ISO 25178-2): Actual meaning of  $S_{pk}$  and its relationship to  $V_{mp}$ , *Precision Engineering* 40 (2015)

# Créditos/Referências

**gio:** Schultz M.P. (2007), “Effects of coating roughness and biofouling on ship resistance and powering”, Biofouling, Volume 23, pages 331–341, apud Giorgiutti, Y. et al, (1), Impact of Fouling on Vessel’s Energy Efficiency 25º Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore, Rio, 2014

**gra:** <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/3b/Granito.jpg/250px-Granito.jpg>

**grf:** Griffith, B., Manufacturing Surface Technology, Penton Press, Londres, 2001

**hop:** JohnsHopkinsUniv. [http://pages.jh.edu/~bmesignals/analysis\\_of\\_frequency\\_space.html](http://pages.jh.edu/~bmesignals/analysis_of_frequency_space.html)

**hut:** Hutchings, I.M., Friction and wear of engineering materials

**jay:** Raja, J., Filtering of surface profiles, Center for precision metrology, UNC Charlotte Center for Precision Metrology

**iso:** International Standards Organisation, Standard 25178-2

**is2:** ISO 13473 - Characterization of pavement texture by use of surface profiles – Part 1: Determination of mean profile depth

**kap:** Kaplonek, W. e Lukianowicz, K., Coherence correlation interferometry in Surface Topography Measurements, Koszalin University of Technology, Polônia

**mal:** Malburg, M.C. e Raja, J., Characterization of Surface Texture generated by Plateau Honing Process, Annals of the CIRP, Vol. 42, 1/1993

# Créditos/Referências

**mar:** Perthometer, Surface texture parameters, Mahr GMBH, New standards DIN EN ISO ASME

**mo:** [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/d/d9/Moody\\_EN.svg/1200px-Moody\\_EN.svg.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/d/d9/Moody_EN.svg/1200px-Moody_EN.svg.png)

**nbr:** NBR ISO 4287 Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade

**mvl:** Leite, M.V., Lubrificação, PME 2582, Poli, Mecânica, USP

**nzl:** [http://blogs.agu.org/landslideblog/files/2010/11/10\\_10-Canterbury-22.jpg](http://blogs.agu.org/landslideblog/files/2010/11/10_10-Canterbury-22.jpg)

**pia:** PIARC (Permanent International Association of Road Congresses) Road Dictionary, [www.piarc.org](http://www.piarc.org), acesso em 27/03/2021

**pav:** <http://4.bp.blogspot.com/3vBOnwnLsbg/UJ77WKuJmHI/AAAAAAAAAG44/H90-1H1gqS0/s1600/pavimento+003.jpg>

**per:** Persson, B.N.J. et al, On the nature of surface roughness with applications to contact mechanics, sealing, rubber friction, and adhesion, J. Phys. Condens. Matter 17 (2005)

# Créditos/Referências

**pr2:** Persson, B.N.J., On the fractal dimension of rough surfaces, Trib. Letters 54, 2014 p.99

**ril:** <http://railmeasurement.com/wp-content/uploads/2015/04/corrugation-track2.jpg>

**spt:** <https://youtu.be/OmYfi6JaYgw>

**sto:** Development of methods for the characterisation of Roughness in three dimensions, Sout, K. J., editor, 2004, Penton Press, UK

**sta:** Staeves, J., Beurteilung der Topographie von Blechen im Hindblick auf die Reibung bei der Umformung, Tech. Univ. Darmstadt.

**thl:** Taylor Hobson, Surface Finish Metodology, powerpoint, 2003.

**tom:** Tomanik, E, Modelling of the asperity contact area on actual 3D surfaces, SAE 2005 World Congress 65, 66, 37, 68

**vdb:** <http://www.vanderbilt.edu/AnS/psychology/cogsci/chaos/workshop/Fractals.html>

**wik:** Wikipedia

**wk2:** wikipedia - File:Bandform template.svg]

**zah:** Zahouani, H. e El Mansouri, M. ., in Characterization of Areal Surface Texture, R. Leach editor, Springer, 2013.

# Gráfico de probabilidades da Normal (1)

Roteiro para execução com Excel:

1. Ponto de partida: duas colunas, a 1ª. de Ordem, numerada de 1 a N (N é o número total de dados) e a 2ª. (Y) com o conjunto de N dados.

Ordem (i)	Y
1	50,45692
2	48,54561
3	47,61195
4	54,30579
5	53,69651
.	.
.	.
.	.
95	46,65978
96	46,56745
97	54,44931
98	58,23770
99	47,33967
100	48,63370

Valores de Y gerados por algoritmo do Excel ao qual foram passadas as instruções:

- Distribuição Normal  $N(50,5)$
- $N = 100$



# Gráfico de probabilidades da Normal (2)

Roteiro para execução com Excel:

2. Obter uma 3ª. coluna com os intervalos (i) de probabilidade acumulada, dividindo cada célula da primeira coluna por N: de  $1/N$  até  $N/N=1$ .

Ordem (i)	Y	Intervalo i/N
1	50,45692	0,01
2	48,54561	0,02
3	47,61195	0,03
4	54,30579	0,04
5	53,69651	0,05
.	.	.
.	.	.
.	.	.
95	46,65978	0,95
96	46,56745	0,96
97	54,44931	0,97
98	58,23770	0,98
99	47,33967	0,99
100	48,63370	1

# Gráfico de probabilidades da Normal (3)

Roteiro para execução com Excel:

3. Obter uma 4ª. coluna (Z), aplicando a função INV.NORMP.N(i) a cada célula da 3ª. coluna.

Ordem (i)	Y	Intervalo i/N	Z
1	50,45692	0,01	-2,32635
2	48,54561	0,02	-2,05375
3	47,61195	0,03	-1,88079
4	54,30579	0,04	-1,75069
5	53,69651	0,05	-1,64485
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
95	46,65978	0,95	1,6449
96	46,56745	0,96	1,7507
97	54,44931	0,97	1,8808
98	58,23770	0,98	2,0537
99	47,33967	0,99	2,3263
100	48,63370	1	-

# Gráfico de probabilidades da Normal (4)

Roteiro para execução com Excel:

4. Copiar numa 5ª. coluna os dados e ordená-los do menor para o maior.

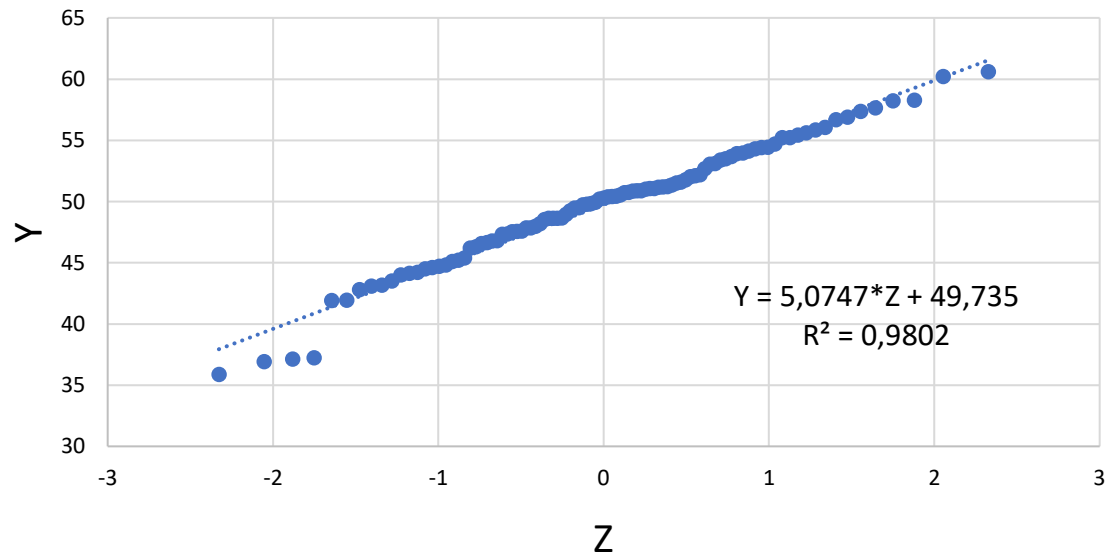
Ordem (i)	Y	Intervalo i/N	Z	Y ordenado
1	50,45692	0,01	-2,32635	35,88901
2	48,54561	0,02	-2,05375	36,92110
3	47,61195	0,03	-1,88079	37,15266
4	54,30579	0,04	-1,75069	37,25652
5	53,69651	0,05	-1,64485	41,91616
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
95	46,65978	0,95	1,6449	57,6566
96	46,56745	0,96	1,7507	58,2377
97	54,44931	0,97	1,8808	58,3028
98	58,23770	0,98	2,0537	60,2249
99	47,33967	0,99	2,3263	60,6080
100	48,63370	1	-	61,0640

# Gráfico de probabilidades da Normal (5)

Roteiro para execução com Excel:

5. Plotar um gráfico de dispersão, com os dados ordenados da 5ª. coluna contra Z da 4ª. coluna, e obter a linha de tendência.

Verificação de normalidade



	Nominal	Gráfico.	Cálculo
Média	50	49,7350	49,8486
Desvio	5	5,0747	5,0510

# Resultados extraídos

- A equação da linha de tendência tem a forma  $Y=a*Z+b$ .
- O Excel fornece o coeficiente de determinação  $R^2$ .
- Se  $R^2$  é próximo de 1, é razoável considerar a distribuição como próxima de uma Normal.
- Caso a aproximação pela normal seja válida, a equação da linha de tendência fornece o valor da média (termo constante “b”) e do desvio padrão (coeficiente angular “a”) da distribuição.

# Observações

- O roteiro pode ser aplicado com outro aplicativo de planilha, desde que a função INV.NORMP.N seja substituída por outra que forneça o valor de Z correspondente ao intervalo de probabilidade acumulada.
- Quando o número de dados for reduzido, o cálculo do intervalo de probabilidade acumulada deverá utilizar fórmulas mais complexas do que  $i/N$ ; ver, por ex., o verbete Q-Q Plot (gráfico quantil-quantil) na Wiki.En.
- O roteiro apresentado tem suas bases teóricas nas Estatísticas de Ordem, ramo bastante complexo da Estatística.