

# ASPECTOS TRIBOLÓGICOS SUPERFÍCIE

# Definições

- INTEGRIDADE DE SUPERFÍCIE
  - Efeitos internos
- TEXTURA DA SUPERFÍCIE
  - Efeitos externos

# Definições

- INTEGRIDADE DA SUPERFÍCIE
  - Transformações na microestrutura
  - Recristalização e crescimento de grão
  - Zonas afetadas termicamente
  - Deformação plástica
  - Tensões residuais
  - Heterogeneidades

# Definições

- TEXTURA DA SUPERFÍCIE

- Ondulação
- Defeitos
- Rugosidade
- Direção das marcas da ferramenta

- Dobramentos e amassamentos
- Crateras
- Imperfeições
- Tolerâncias

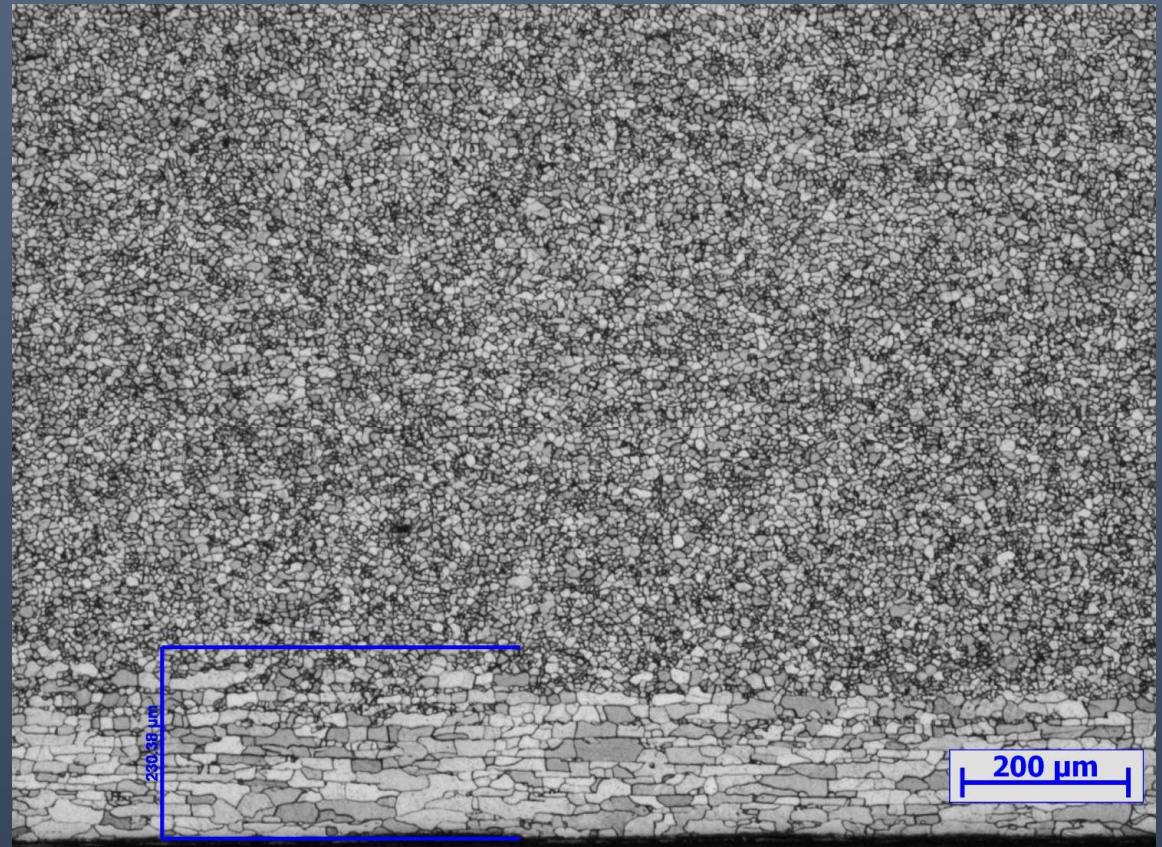
# INTEGRIDADE DA SUPERFÍCIE

- Transformações na superfície
  - Têmpera superficial
  - Precipitação



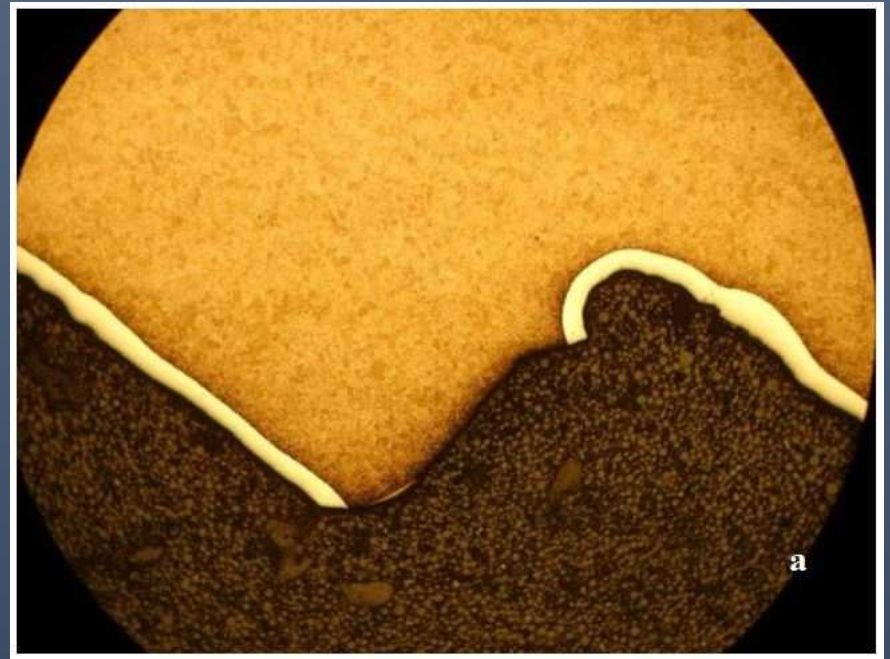
# INTEGRIDADE DA SUPERFÍCIE

- Recristalização e tamanho de grãos
  - Tamanho de grão afeta a qualidade do produto conformado
  - Tem efeitos na rugosidade da peça final



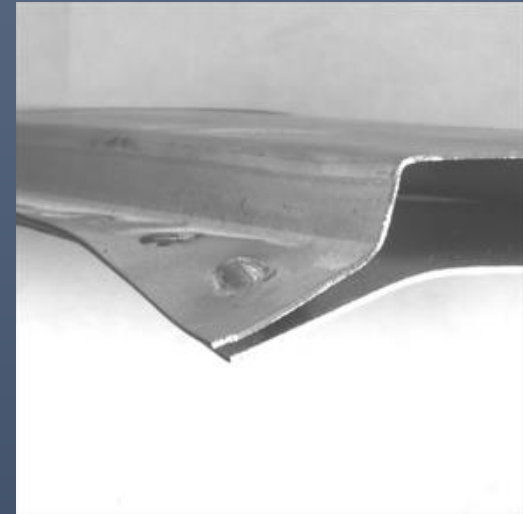
# INTEGRIDADE DA SUPERFÍCIE

- Zonas afetadas termicamente
  - Podem conter alterações químicas (exemplo: sensitização em aço inox) ou regiões transformadas



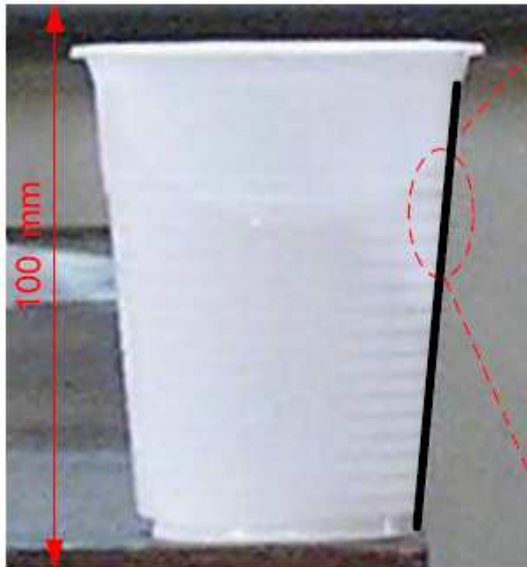
# INTEGRIDADE DA SUPERFÍCIE

- Tensões residuais
  - Normalmente podem causar distorções da peça após a conformação

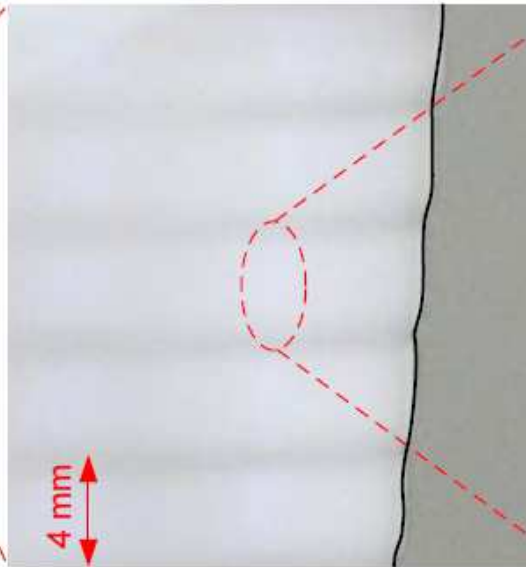


# TEXTURA DA SUPERFÍCIE

- Topografia (ondulações)
- Rugosidade



a) formato de tronco de cone do copo (forma)



b) superfície ondulada do copo (ondulação)



c) características microscópicas da superfície do copo (rugosidade)

# Rugosidade

- Caracterização, normalmente incompleta, do perfil da superfície
- Parâmetros são valores numéricos resultantes de operações matemáticas simples ou integrações
- Sujeitas a erros e imprecisões
- Importância: altera condições de contato entre superfícies, afeta a eficiência da lubrificação

# Rugosidade

- Representação da rugosidade
  - Altura média
  - Pico máximo
  - Vale mínimo
  - Diferença entre extremos

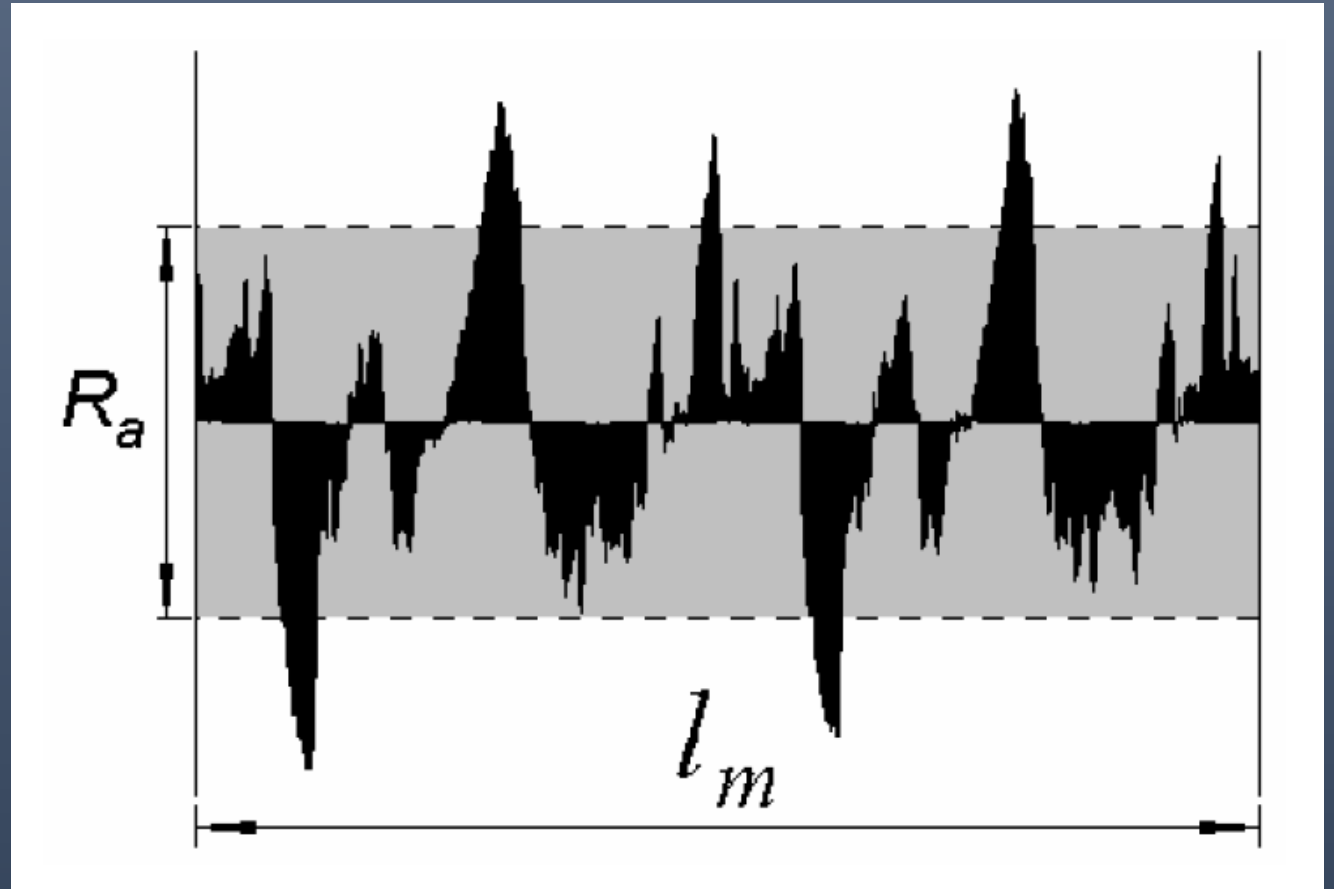
# Rugosidade

- Altura média de picos e vales –  $R_a$ 
  - É a medida mais usada de rugosidade por ser a única que os equipamentos mais antigos faziam.
  - Medida bastante simples
  - Pode ser definida como o desvio médio dos picos e vales em relação a um plano médio de referência

# Rugosidade

- $R_a$

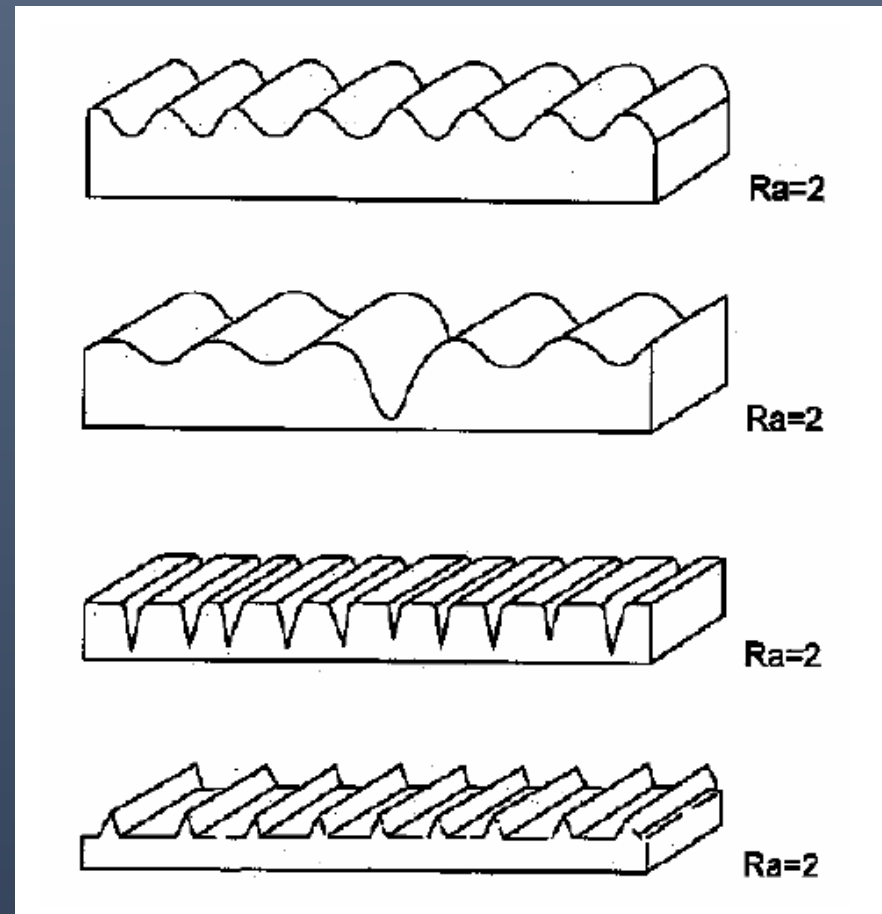
$$R_a = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} |y(x)| dx$$



# Rugosidade

## Rugosidade Ra

- Diferentes superfícies podem ter o mesmo valor de Ra
- Controle de qualidade falho e facilmente “enganável”.

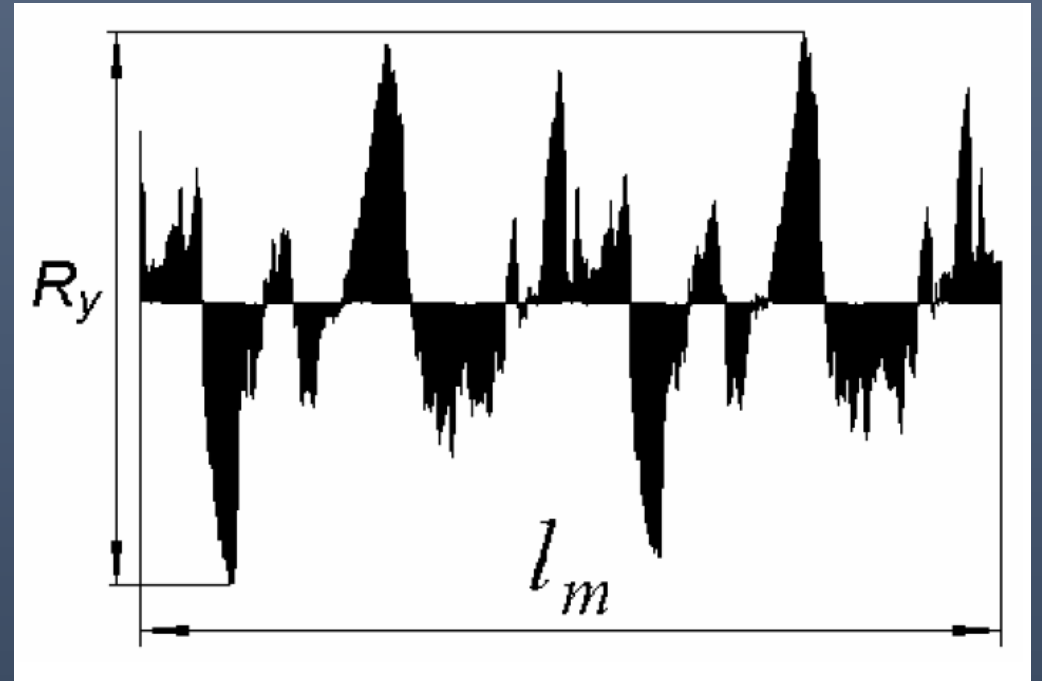


# Rugosidade

- Distância média entre picos ( $S_m$ )
- Número de picos contados dividido pelo comprimento de teste
- Pico é cada ponto máximo local registrado

# Rugosidade

- $R_y$  – distância entre o pico mais alto e o vale mais baixo
- Indica a máxima variação possível de altura na superfície
- Não indica se os picos são adjacentes ou não



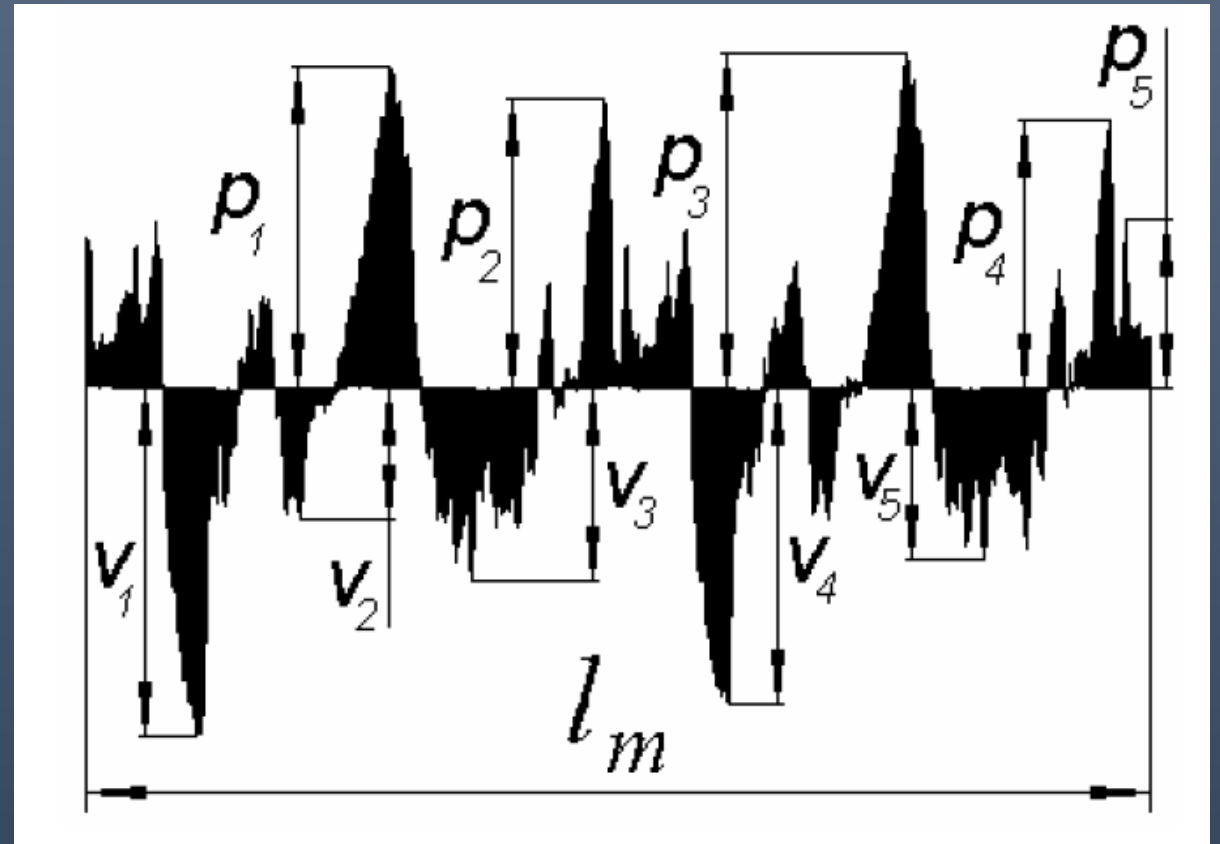
# Rugosidade

- $R_z$  – Distância média entre os 5 picos mais altos e 5 vales mais profundos
- Elimina algumas distorções da medida de  $R_y$
- Valores de  $R_y$  e  $R_z$  próximos indicam um acabamento superficial uniforme; valores muito díspares indicam a provável presença de defeitos.

# Rugosidade

- $R_z$

$$R_z = \frac{1}{5} \left( \sum_{i=1}^5 p_i + \sum_{i=1}^5 v_i \right)$$



# Exercício

- Por que a rugosidade influi nas condições de lubrificação?

# Equipamento de medida de rugosidade

- Mais utilizado é o rugosímetro
- Medida de contato – induz danos na superfície após o ensaio
  - Macroscopicamente ainda pode ser considerado não destrutivo
- Métodos ópticos não induzem deformação
  - Microscópio confocal, MEV, perfilômetro

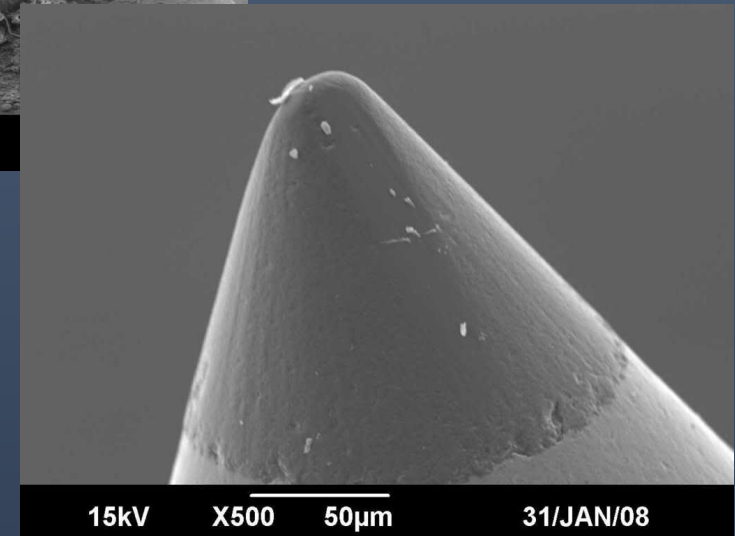
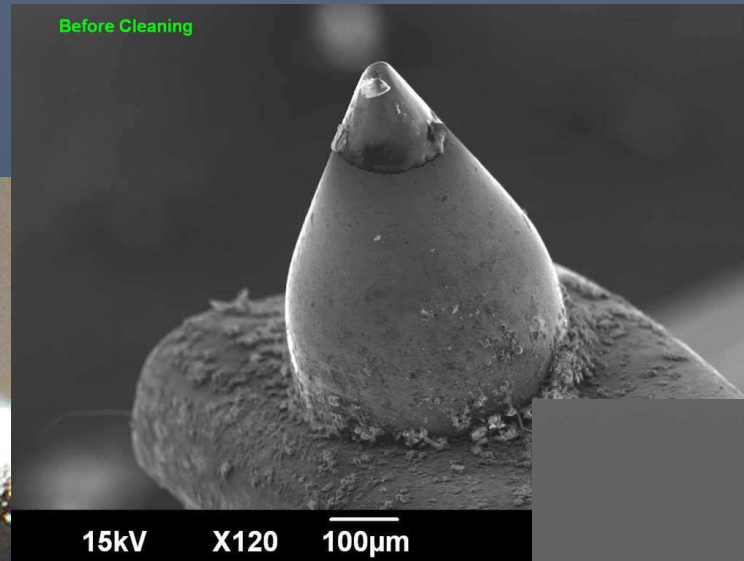
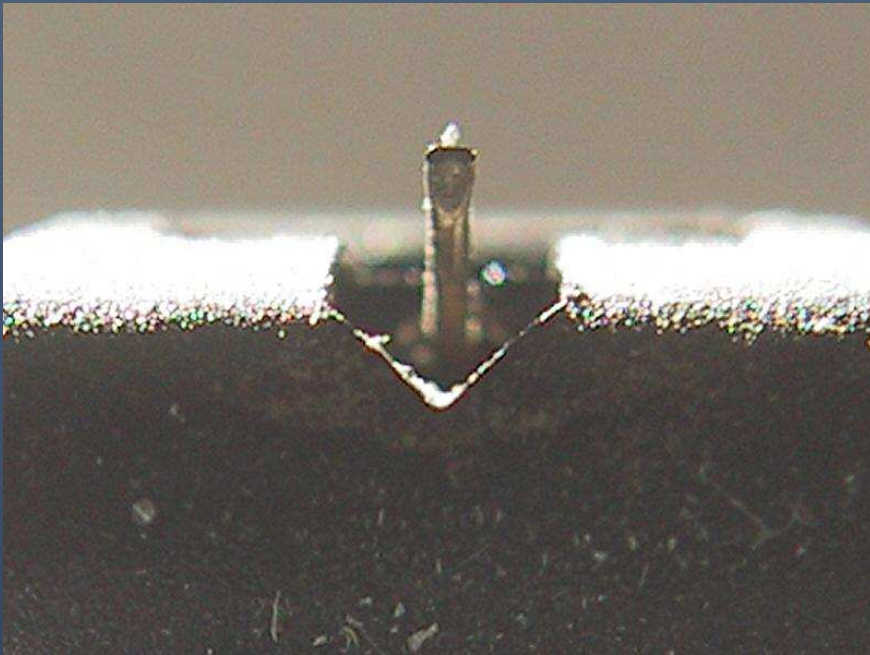
# Equipamento de medida de rugosidade

- Características do rugosímetro
  - Diâmetro do apalpador – determina a profundidade máxima de vales detectáveis
  - Curso – determina a amostragem
  - Carga – influi na deformação plástica causada durante a medida
  - Velocidade determina a possibilidade de um vale ser medido ou não



# Características do rugosímetro

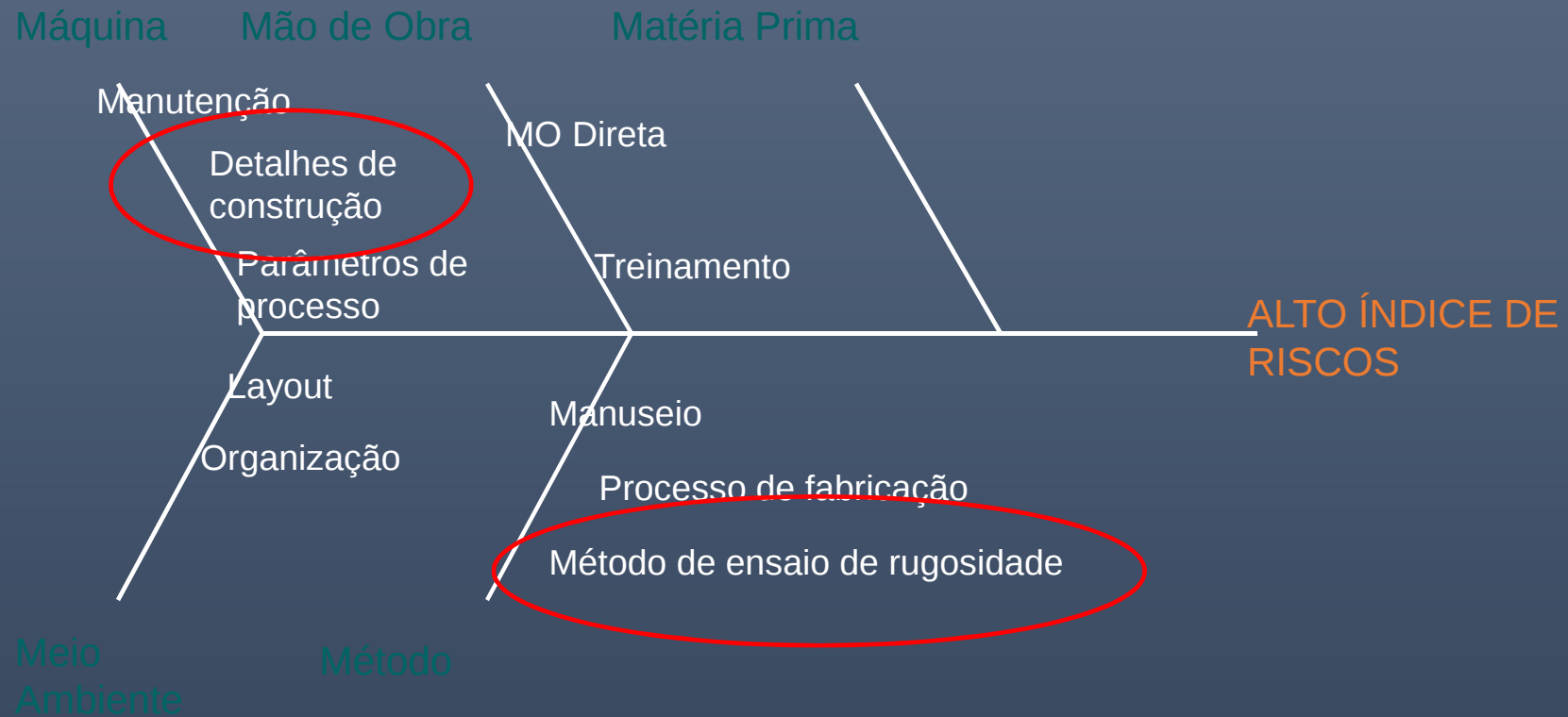
- Apalpador



# Exemplo prático

- Ocorrência de riscos em material tratado termicamente em processo contínuo
- Material temperado e revenido para produção de molas
- Passa por processo de estampagem e corte -> Risco pode ser ponto de nucleação de trincas durante o processamento ou uso

# Diagrama de Causa e Efeito



# *Análise das Causas Raiz:*

## *Máquina*

*1. Por que o material não atende à especificação?*

*Porque a rugosidade total está acima do especificado*

*2. Por que a rugosidade total está acima do especificado?*

*Porque o material apresenta um risco na superfície.*

*3. Por que o material apresenta um risco na superfície?*

*Porque a superfície foi riscada na última etapa do processo de fabricação.*

*4. Por que a superfície foi riscada na última etapa do processo de fabricação?*

*Porque o material é arrastado sobre partes do forno que podem se tornar mais duras durante o processamento.*

*5. Por que o material é arrastado sobre partes do forno que podem se tornar mais duras durante o processamento?*

*Porque o forno foi construído contendo partes que se mostraram suscetíveis ao desenvolvimento de pontos duros.*

*Proposta: Alterar os fornos de têmpera para eliminar as potenciais fontes de riscos no material.*

# *Análise das Causas Raiz:*

## *Método*

*1. Por que foi enviado material com risco?*

*Porque o risco não foi detectado no controle de qualidade.*

*2. Por que o risco não foi detectado no controle de qualidade?*

*Porque o ensaio realizado na Mangels deu um resultado dentro do especificado.*

*3. Por que o ensaio realizado na Mangels deu um resultado dentro do especificado?*

*Porque a leitura do rugosímetro detectou vales menos profundos do que os existentes.*

*4. Por que a leitura do rugosímetro detectou vales menos profundos do que os existentes?*

*Porque os vales profundos foram mascarados na medida de rugosidade.*

*5. Por que os vales profundos foram mascarados na medida de rugosidade?*

*Porque os rugosímetros utilizados nas linhas de produção têm apalpador com diâmetro maior.*

*6. Por que os rugosímetros utilizados nas linhas de produção têm apalpador com diâmetro maior?*

*Porque o mercado utiliza predominantemente esse tipo de apalpador.*

*Proposta: Alterar os procedimentos para garantir que, para os produtos Schaeffler, a rugosidade seja medida com apalpador de diâmetro menor.*

## *Planejamento experimental*

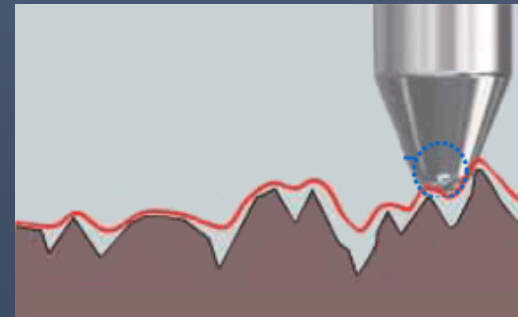
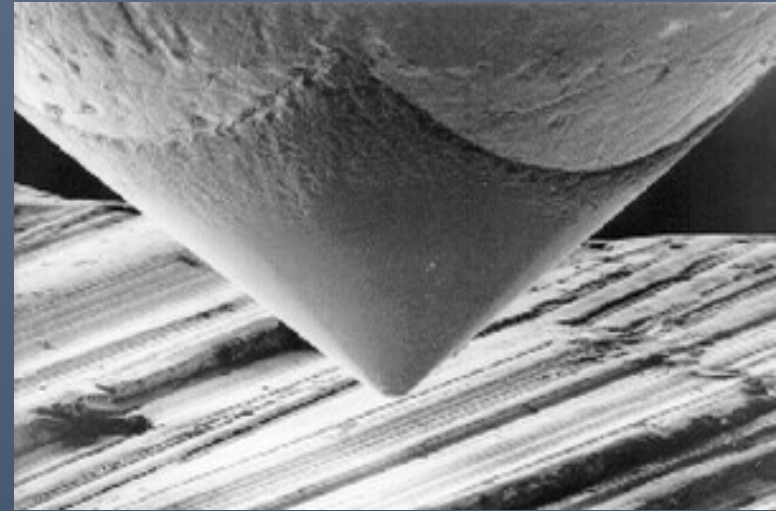
- *Modificação da configuração dos fornos de têmpera para eliminar pontos com maior susceptibilidade à ocorrência de riscos no material – final de abril de 2011.*



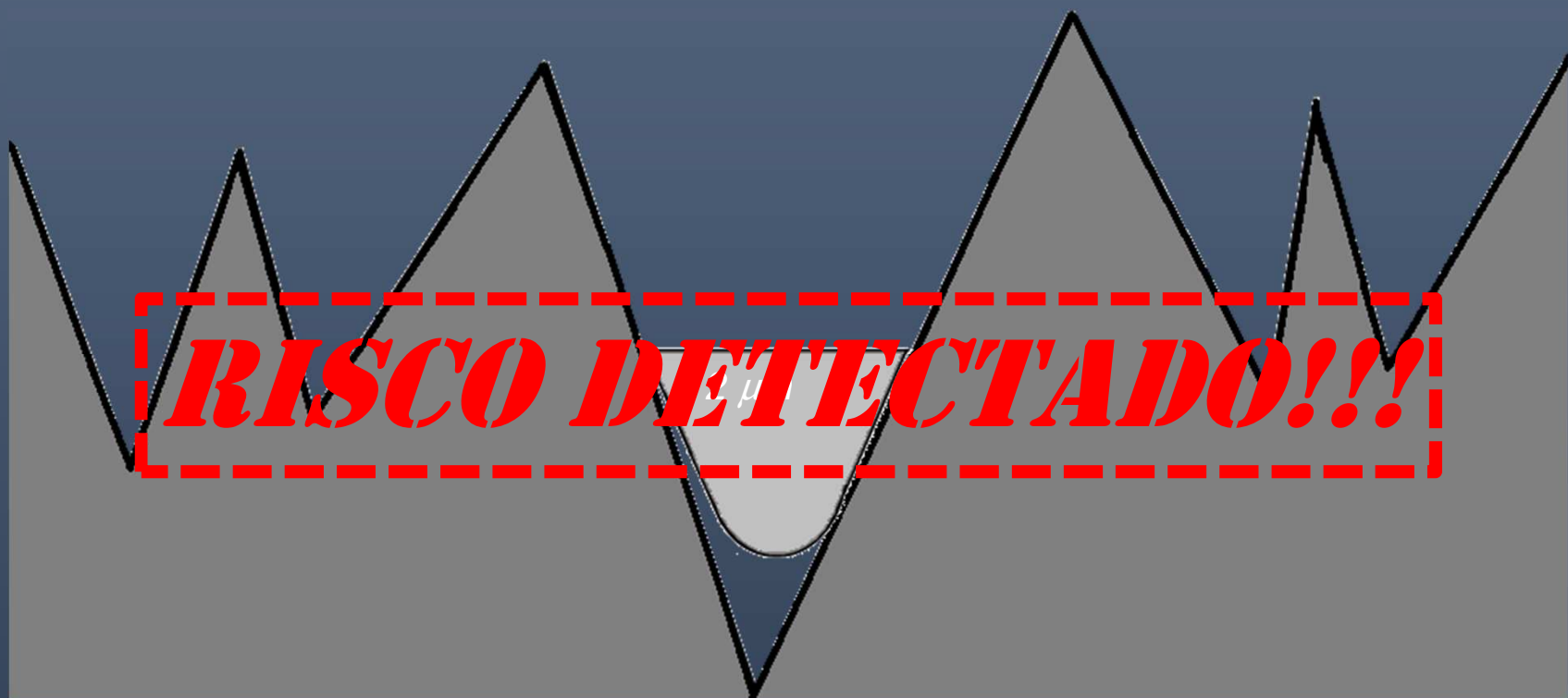
## *Modificação do procedimento de medida de rugosidade para evitar aprovação de material divergente*

- *O raio do apalpador do rugosímetro utilizado pela empresa era maior do que o utilizado pelo cliente.*
- *O apalpador de 5 mm não penetra tanto nos vales quanto o apalpador de 2 mm*

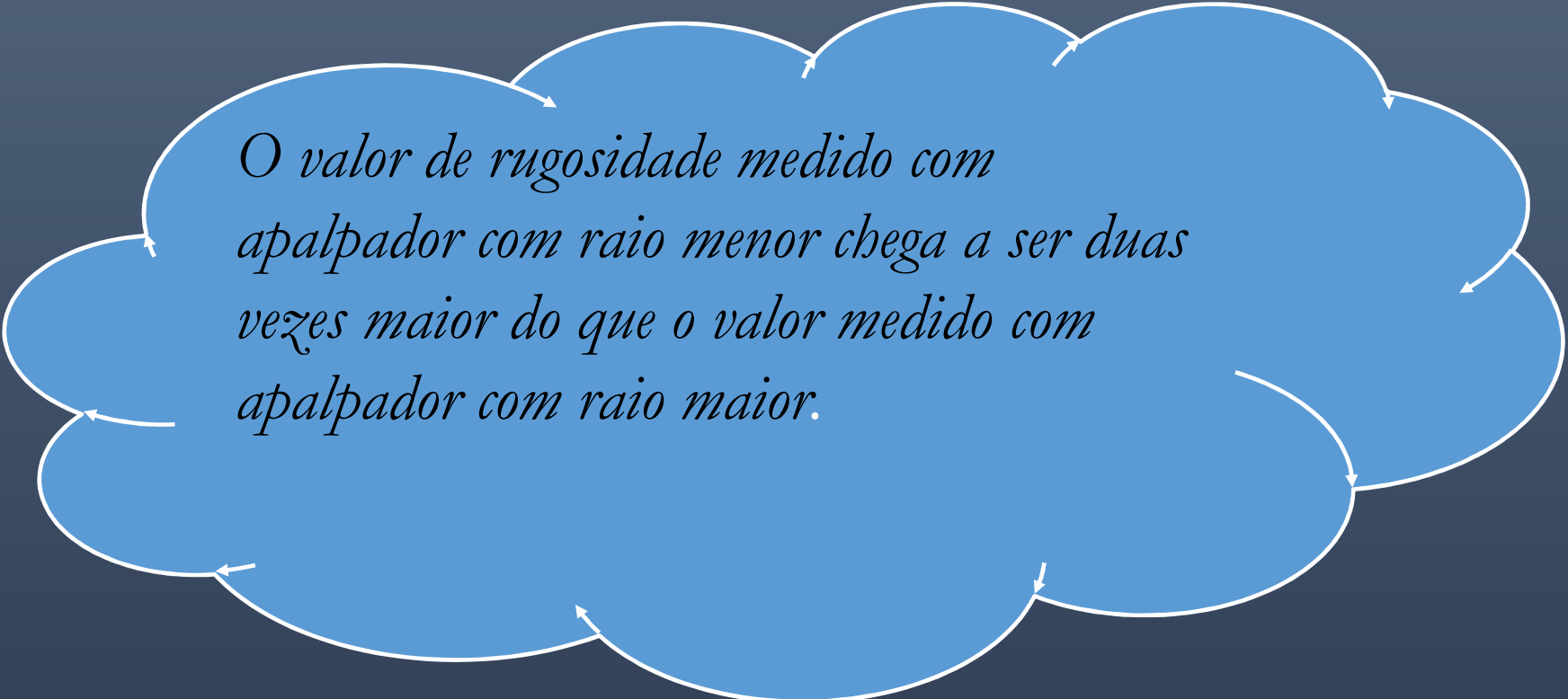
## *Rugosímetro*







- *Na presença de riscos profundos, a medida realizada na fábrica era menor que a realizada no cliente, apesar de ambos aparelhos resultarem em medidas iguais em padrões de calibração (ausência de riscos profundos)*



*O valor de rugosidade medido com apalpador com raio menor chega a ser duas vezes maior do que o valor medido com apalpador com raio maior.*

# Resultado

- Com a troca dos rugosímetros, o índice de material devolvido caiu 70%.