

# AULA 04

Avarias e desgastes em engrenagens  
Processos de Fabricação

## SUMÁRIO

**2.10. Avarias e defeitos nas Engrenagens**

**2.11. Lubrificação das engrenagens**

**2.12. Fundamentos da fabricação de engrenagens**

## 2.10. Avarias e defeitos nas Engrenagens

### 2.10.1 Avarias por ruptura:

- ruptura violenta no pé do dente devida a sobrecargas e a choque.
- ruptura por fadiga no pé do dente - se prematura é devido a defeitos de material ou de fabricação.
- ruptura no canto do dente por distribuição desigual de carga.
- estilhaçamento da cabeça por fragilidade excessiva ou choque.



## 2.10.2 desgaste nos flancos

- craterização (“pitting”) - acontece na região do  $d_p$  e abaixo, associada normalmente a fadiga por compressão
- zona estriada perto do  $d_p$  devida à baixa dureza do material.
- sulcos devidos a lubrificação insuficiente.
- aquecimento devido a lubrificação / refrigeração insuficientes
- desgaste excessivo por defeito de material ou lubrificação
- rebarbas ou deformações plásticas
- “scoring” (riscos radiais). O scoring é causado pela falha do lubrificante que tem sua “película” rompida e causa o contato metálico entre as superfícies e a micro-solda instantânea entre as superfícies. Segue-se o arrancamento de porções da superfície quando os dentes se afastam.

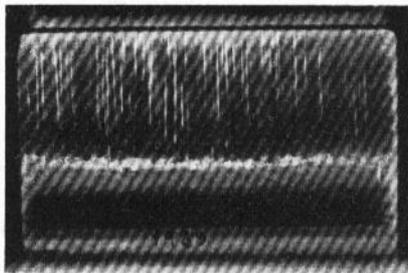


Fig. 21/31. Formación de estrias en la cabeza del diente a consecuencia de la rotura de la película de lubricante

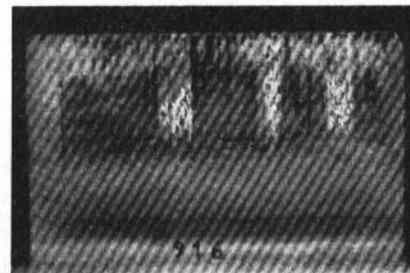


Fig. 21/32. Zonas de corrosión en la cabeza del diente a consecuencia de la rotura de la película de lubricante

## 2.10.2 desgaste nos flancos

As avarias podem ser evitadas por:

- redimensionar engrenagens levando em conta choques, sobrecargas ,etc.
- uso de material adequado.
- uso de lubrificação adequada.
- cuidados na fabricação e montagem.

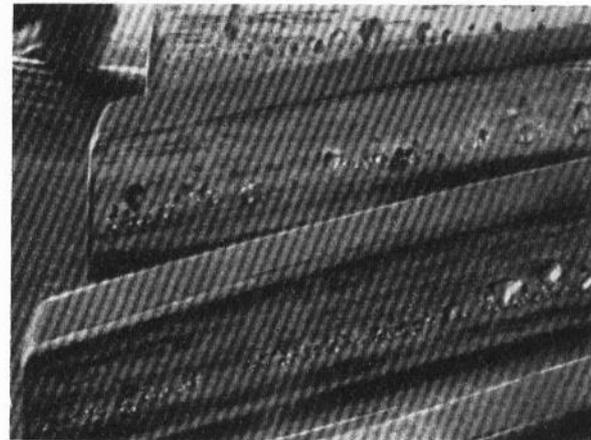
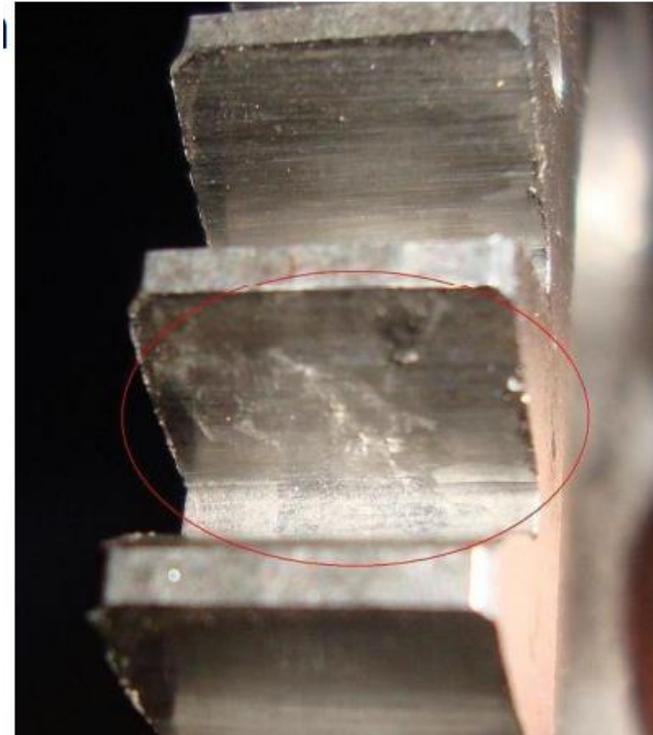
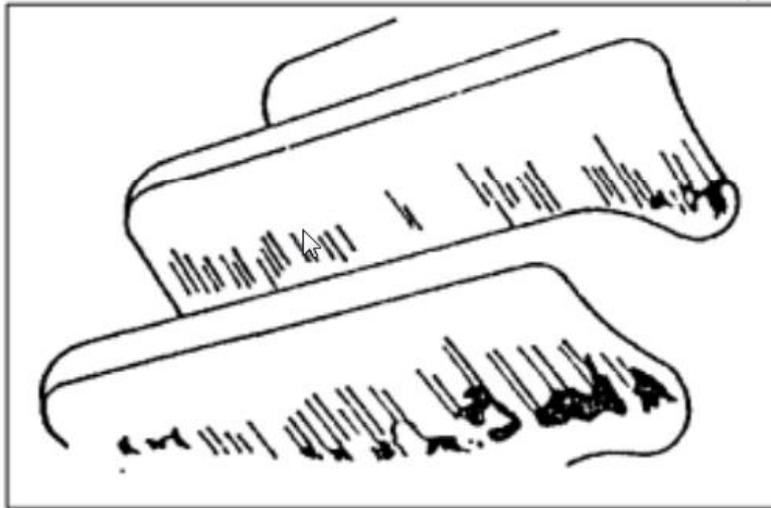
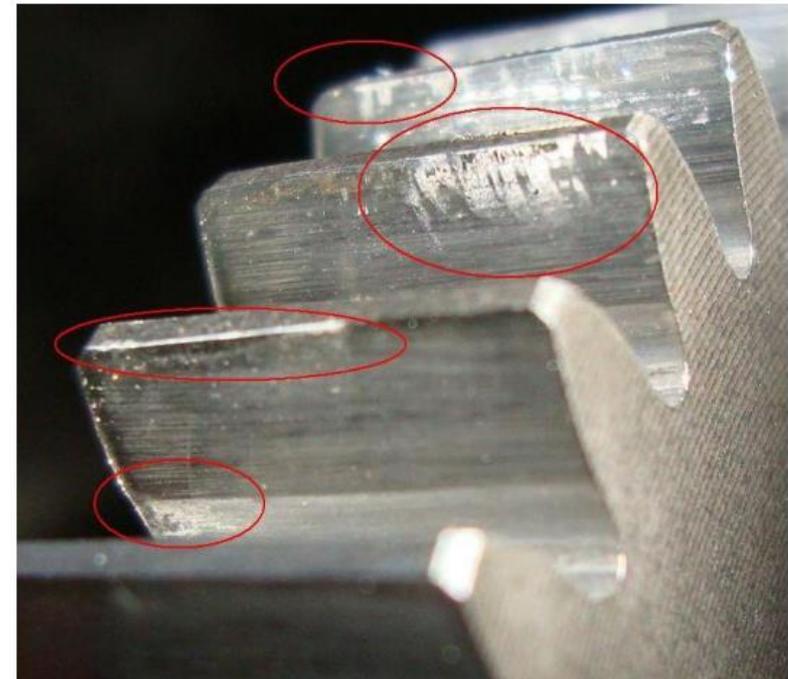
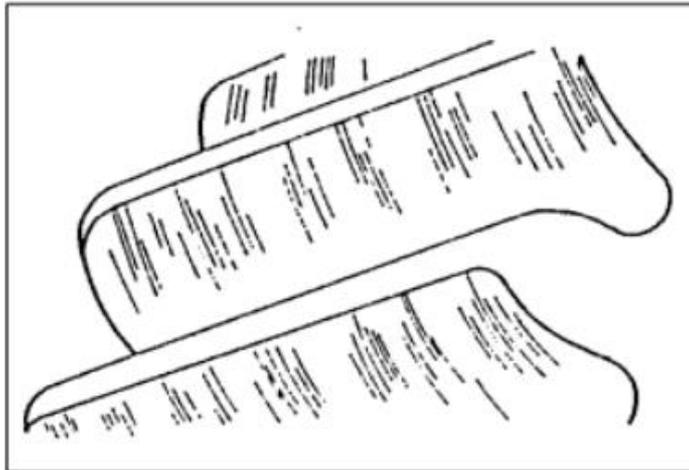


Fig. 21/30. Formación de hoyuelos (pittings) en un engranaje de turbina con dentado oblicuo de acero bonificado

# Desgaste por interferência



## Desgaste abrasivo



### 2.10.3 Ruídos de funcionamento das engrenagens

A análise do sinal do ruído indica duas fontes principais:

- vibração devida ao impacto de engrenamento ( E na figura abaixo) esta freqüência é proporcional à rotação e no. de dentes.
- entre os engrenamentos aparecem freqüências naturais dos dentes e ruídos.

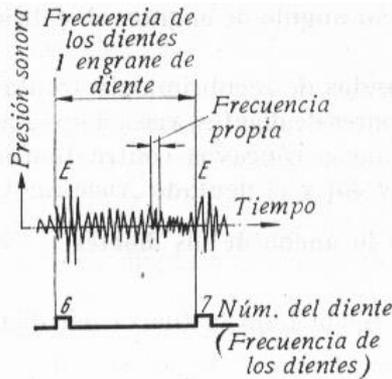


FIG. 21/34

FIG. 21/34. Trazado oscilográfico de la presión sonora (luciones) (1). Se reconocen los impulsos de engrane en E.

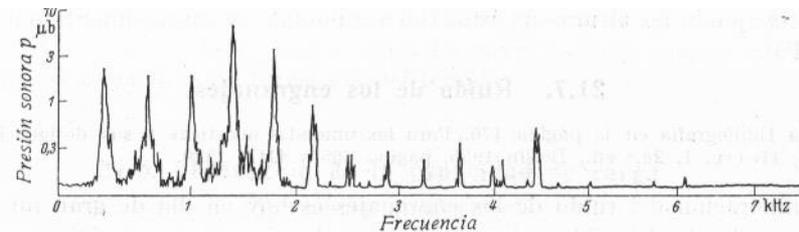


FIG. 21/36. Análisis Suchton (2) del ruido de dientes con un número de revoluciones  $n_1 = 800$  r. p. m. y un momento de torsión de 12,2 mkg. Obsérvese la resonancia en las frecuencias de diente primera a sexta [ $f_z$ ], siendo  $f_z = n_1 \cdot z_1 / 60 = 0,36$  kHz. Dentado recto de ruedas frontales rectificadas,  $z_1 = 27$ ,  $z_2 = 34$ ,  $m = 3$  mm, calidad 5 a 6

### 2.10.3 Ruídos de funcionamento das engrenagens

**Medidas para diminuir ruídos de funcionamento das engrenagens:**

- **diminuir a força tangencial.**
- **diminuir a velocidade tangencial.**
- **eliminar os erros de passo.**
- **melhorar o acabamento e adotar amaciamento.**
- **aumentar o grau de recobrimento.**
- **adotar dentes inclinados.**

## 2.11. Lubrificação das engrenagens

- **Objetivos da lubrificação**

- ✓ reduzir atrito
- ✓ reduzir desgaste
- ✓ conduzir calor

- **Lubrificantes usados:**

- ✓ óleos minerais ( puros ou com aditivos extrema pressão EP)
- ✓ graxa ( velocidades tangenciais baixas )
- ✓ sólido ( grafite , bissulfeto de molibdênio)

A escolha é baseada na viscosidade necessária calculada :

$\eta \uparrow$  para velocidades  $\downarrow$  e pressão de contato  $\uparrow$  ( Tabela 22.28 do Niemann)

- **Tipos de lubrificação:**

- ✓ por imersão. A profundidade de imersão deve ser de 1 a 6 vezes o módulo. As demais engrenagens são lubrificadas por salpicamento. A aceleração centrífuga máxima do óleo deve ser de
- ✓ por lubrificação forçada ( aceleração maiores) com bomba e injetores.

## 2.12. Fundamentos da fabricação de engrenagens

Como produzir estes perfis ?

- ⚡ por geração.
- ⚡ por perfilamento.

movimento axial do cortador

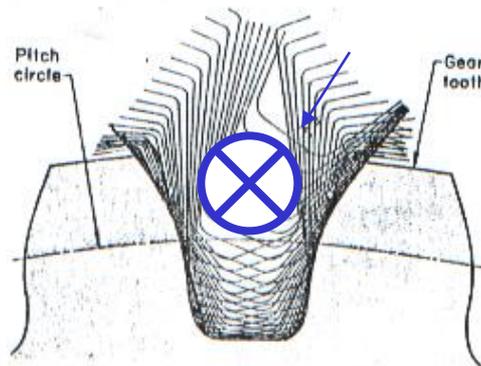


Fig. 12. Hobbing action as a gear tooth is generated progressively by hob teeth

geração

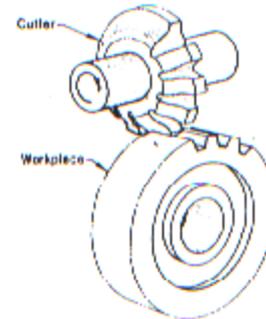


Fig. 9. Relation of cutter and workpiece when milling teeth in a spur gear

perfilamento

## 2.12. Fundamentos da fabricação de engrenagens

Da geometria do engrenamento sabemos que o raio de curvatura no diâmetro genérico  $i$ :

$$\operatorname{tg} \phi_i = \frac{\rho_i}{r_b} \quad \text{portanto} \quad \rho_i = r_b \cdot \operatorname{tg} \phi_i \quad \text{mas} \quad d_b = d_p \cdot \cos \alpha$$

$$\text{e} \quad \boxed{\rho_i = \frac{m \cdot z}{2} \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \phi_i}$$

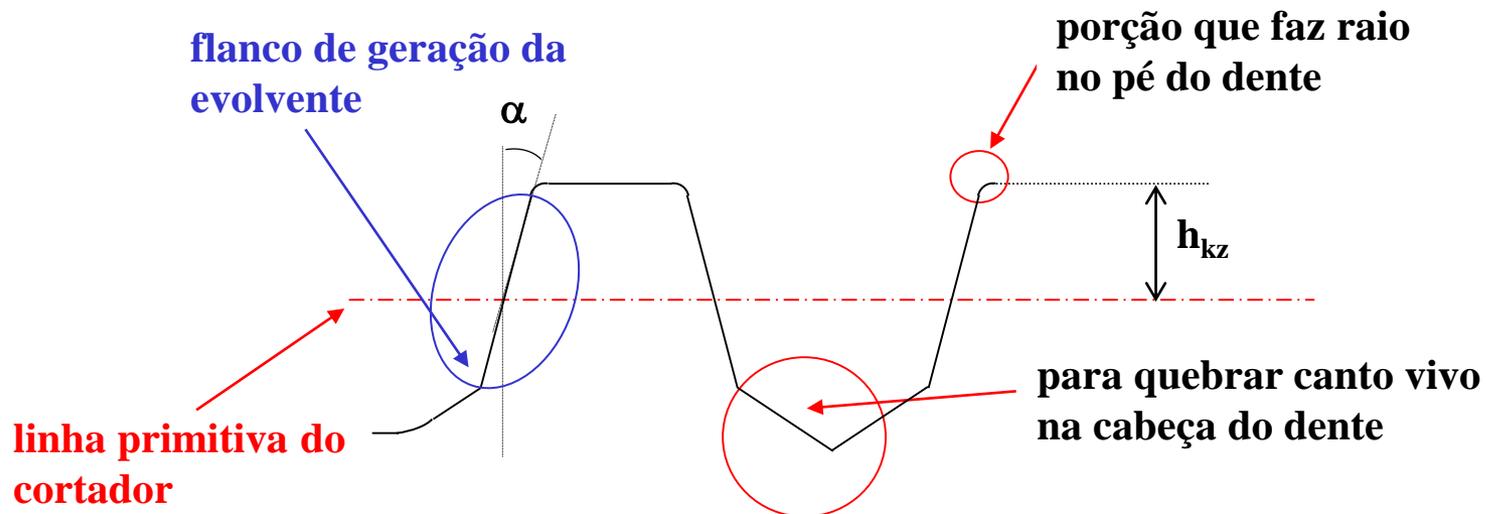
- curvatura depende do número de dentes:  $z$  pequeno tem dentes mais “gordos”, cremalheira tem flanco plano ( $d_p$  é infinito).
- **NB: para um mesmo par o perfil do pinhão é diferente da coroa !**

## 2.12.1 Fabricação de engrenagens por processo de geração

- Ferramenta (cortador) faz movimento de corte ( $v_c$  e  $v_a$ ) + movimento de engrenamento.

### Geração por cremalheira (sistema Hob ou Renânia).

- Os dentes do cortador tem flanco reto (cremalheira).
- Um cortador tem módulo  $m$  e ângulo de pressão  $\alpha$  fixados.



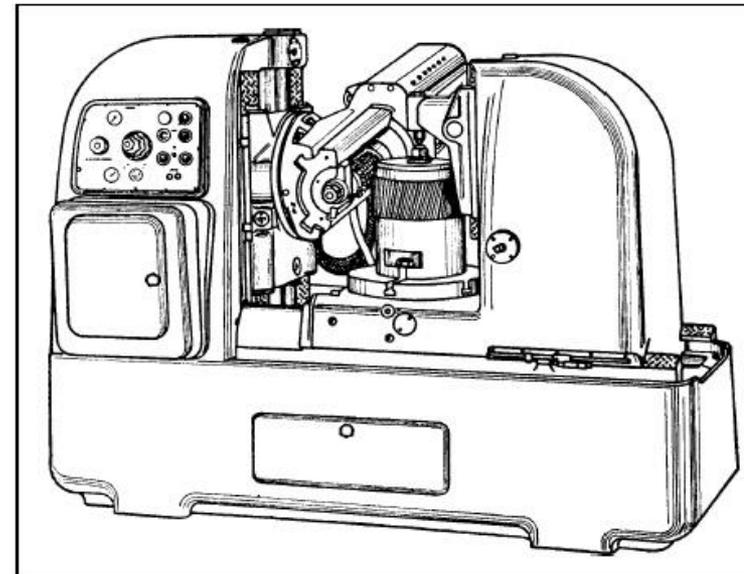
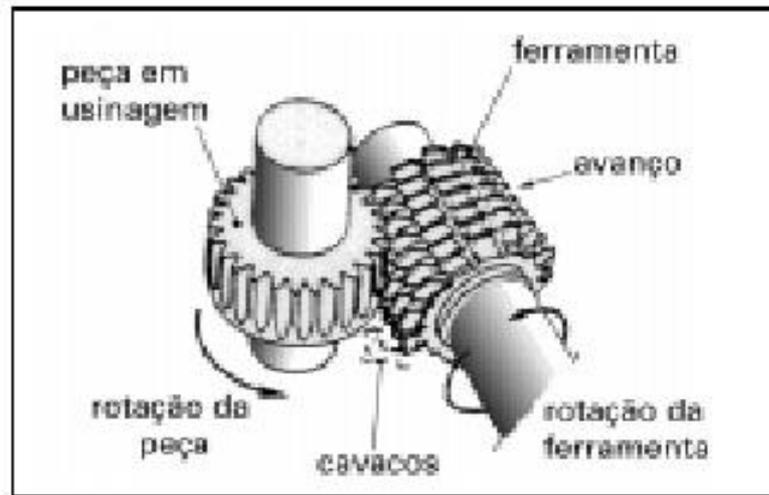
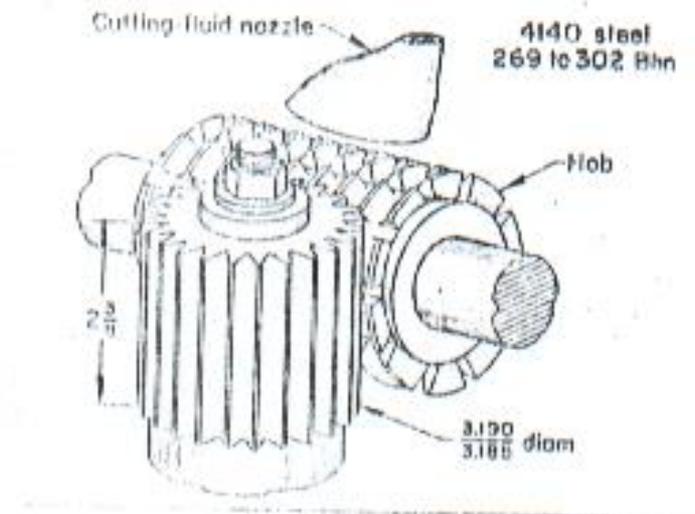
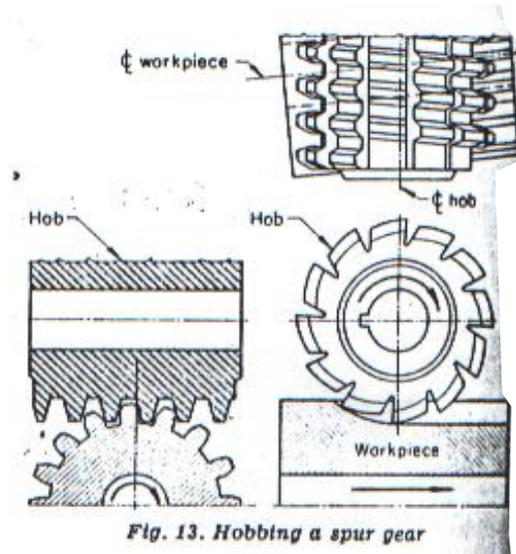
## 2.12.1 Fabricação de engrenagens por processo de geração

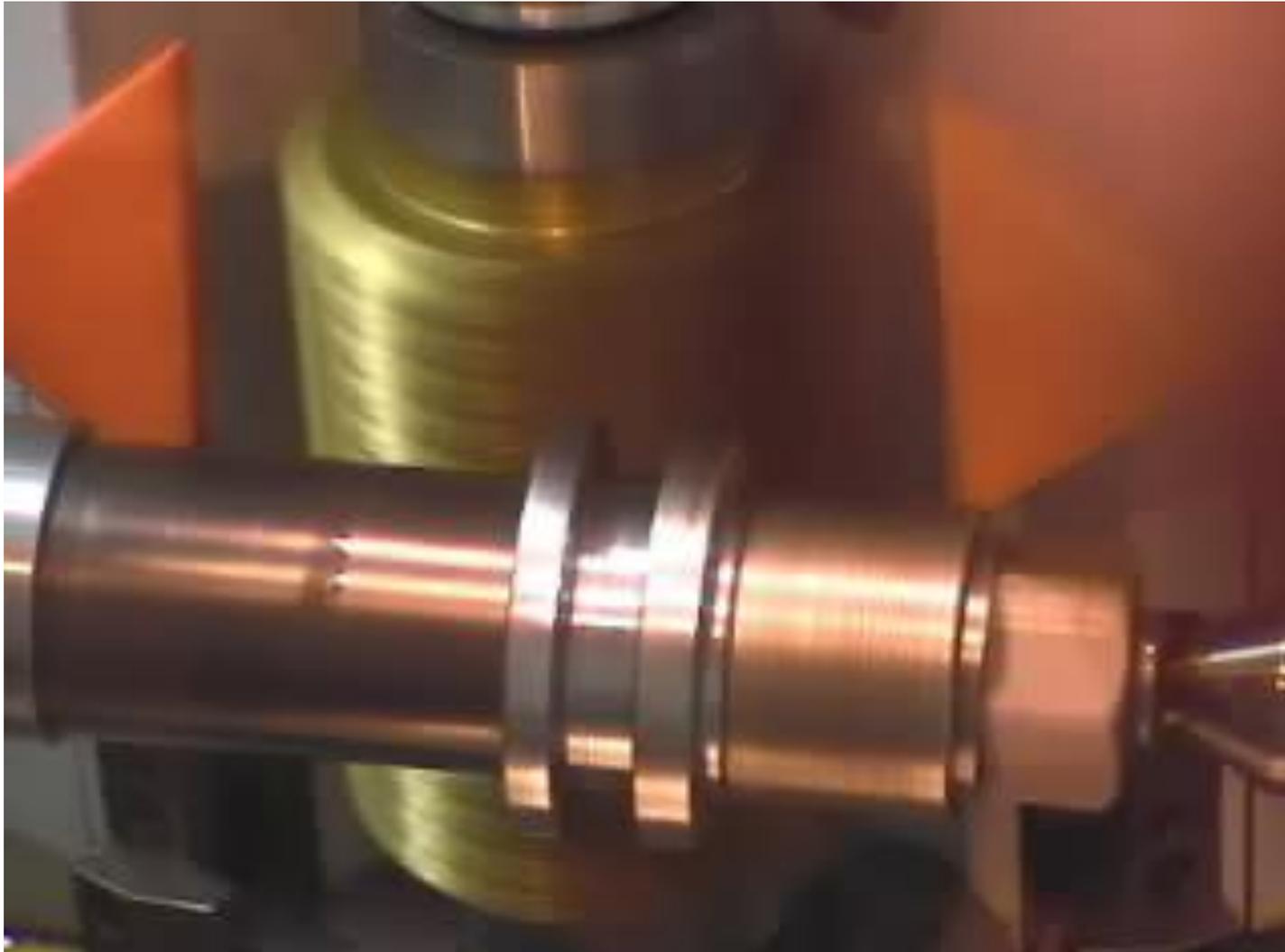
- O adendo do cortador  $h_{kz}$  é tal que dedendo da engrenagem cortada é  $\frac{7.m}{6}$
- E portanto a folga radial de engrenamento fica  $f = \frac{m}{6}$
- A parte superior do perfil do flanco do cortador faz o raio do pé do dente (e também causa interferência - *undercut* - quando  $z$  é pequeno).
- A parte inferior do perfil do flanco do cortador faz o chanfro da cabeça do dente (quebra de canto vivo).
- Para engrenagens corrigidas faz-se afastamento ou aproximação do cortador.

## 2.12.1 Fabricação de engrenagens por processo de geração

$$\rho_i = \frac{m \cdot z}{2} \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \phi_i$$

- O mesmo cortador serve para qualquer  $z$  e faz qualquer raio de curvatura necessário uma vez fixo o ângulo de pressão. O ângulo  $\phi_i$  é gerado pelo movimento de engrenamento.
- O ângulo de hélice é dado pelo posicionamento angular da ferramenta.
- O número de dentes depende da montagem do mecanismo de divisão o qual dá a relação **voltas do cortador / voltas da peça**.









## 2.12.2 Fabricação de engrenagens por processo de geração

### Geração por engrenamento comum: sistema *Fellows*

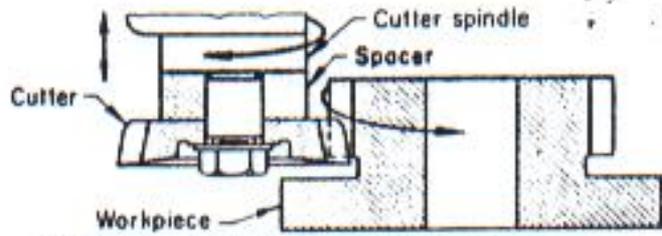
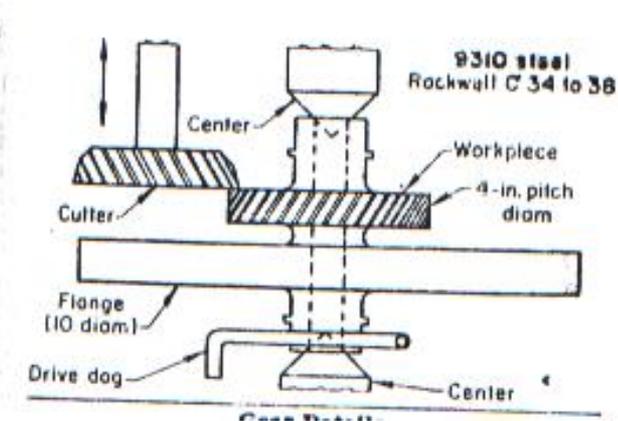
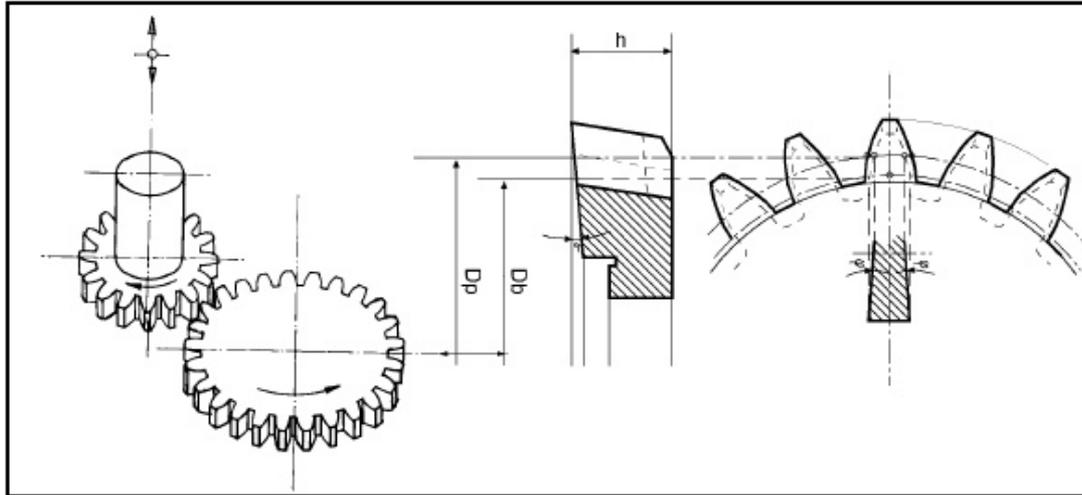
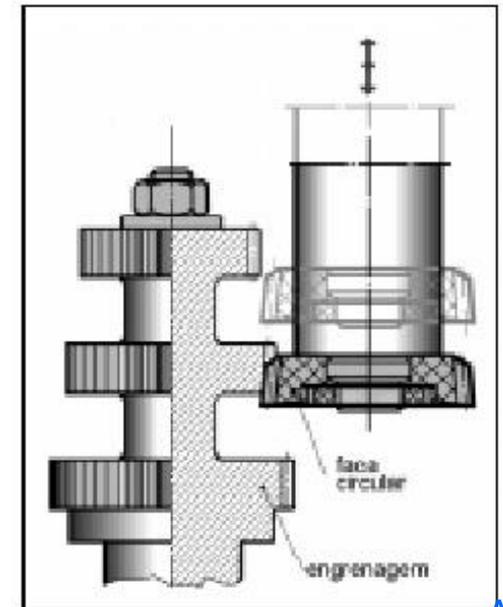


Fig. 14. Relation of cutter and workpiece in shaping gear teeth





## 2.12.2 Fabricação de engrenagens por processo de geração

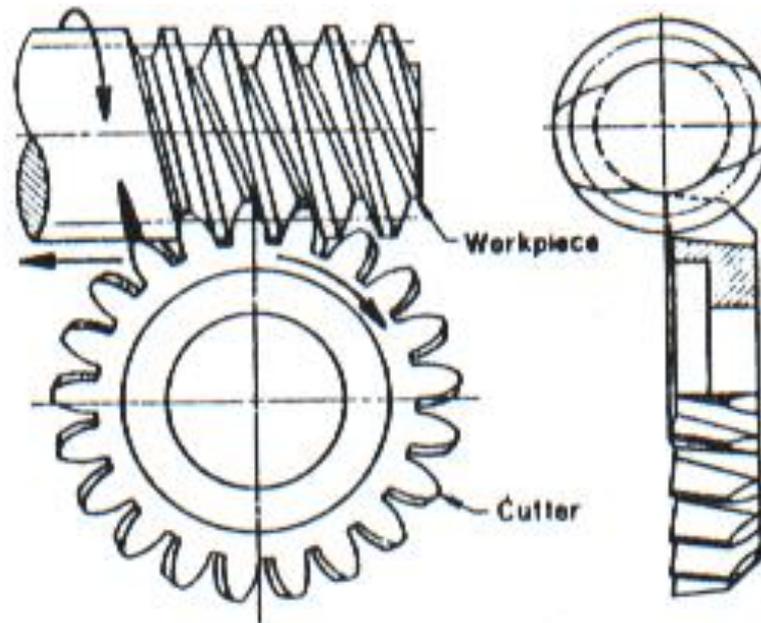
### Geração por engrenamento comum: sistema *Fellows*

- agora o cortador tem fixados  $m$  ,  $\alpha$  e um número finito de dentes  $z$ .
- o ângulo de hélice é dado pelo movimento helicoidal da ferramenta.
- o número de dentes depende da montagem do mecanismo de divisão o qual dá a relação **voltas do cortador / voltas da peça**.
- a grande vantagem deste caso é cortar engrenagens usando curto percurso axial como visto na figura acima à esquerda, ou mesmo engrenagens internas.

## 2.12.2 Fabricação de engrenagens por processo de geração

### Geração por engrenamento comum: sistema *Fellows*

- um sistema semelhante ao *Fellows* pode ser usado para cortar sem-fim.



*Fig. 15. Relation of cutter and workpiece in generating a worm by shaping*

### 2.12.3. Fabricação de engrenagens por processo de perfilamento

- Perfilamento = cópia do perfil.
- Não existe movimento de engrenamento , portanto depois de feito um vão faz-se o movimento de divisão.
- Também chamado de **sistema módulo** e a fresa chamada de **fresa módulo**.
- O perfil obtido é aproximado e cada fresa módulo tem fixados,  $m$  ,  $\alpha$  e faixa de  $z$ .

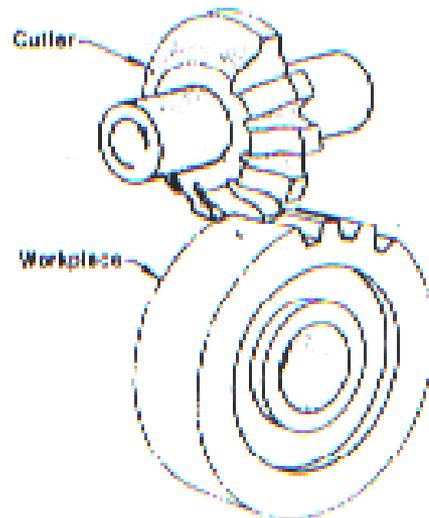
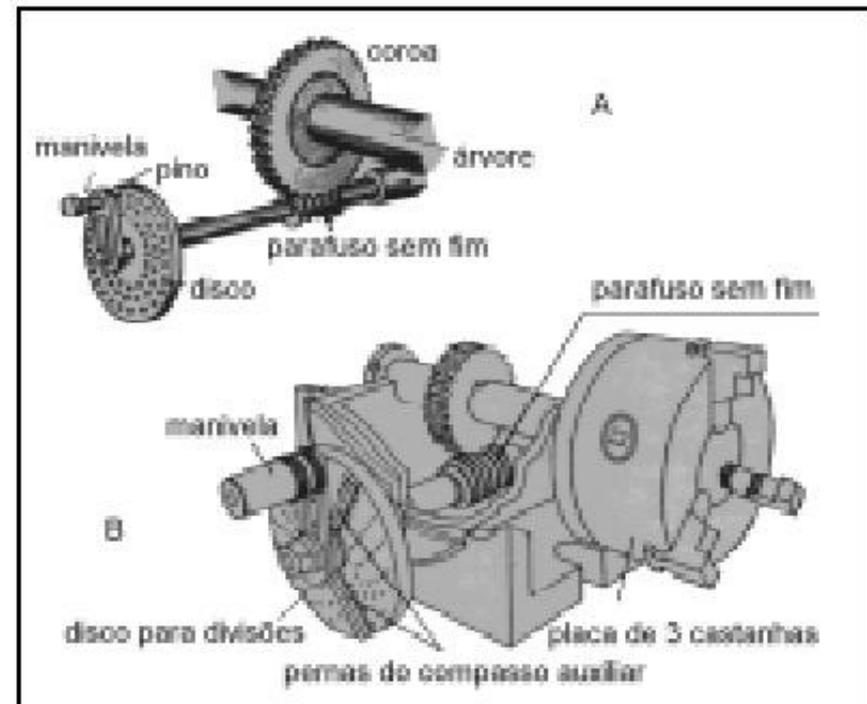


Fig. 9. Relation of cutter and workpiece when milling teeth in a spur gear



### 2.12.3. Fabricação de engrenagens por processo de perfilamento

- É um processo de baixa série e também pode ser usada plainadora e ferramenta de barra com perfil.
- Para altas séries usa-se máquina especial com movimento de plainadora e avanço radial concomitante das ferramentas (*shear cutting*).

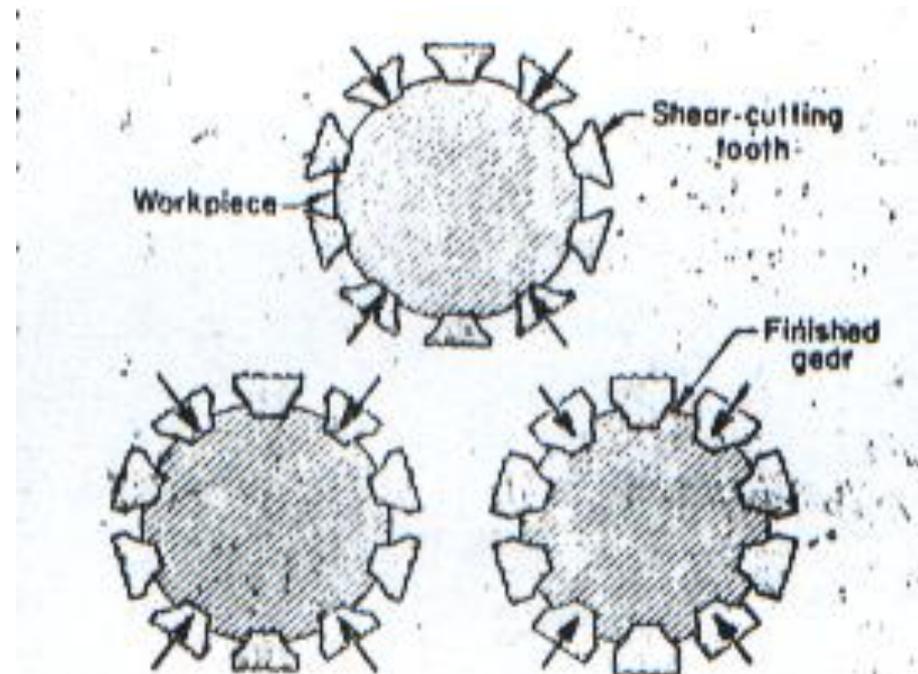


Fig. 11. Progressive action in shear cutting teeth of an external spur gear

## 2.12.4. Fabricação de engrenagens por outros processos

- Existem vários outros processos de fabricação de engrenagens.
- Forjamento a frio – para altas séries devido ao alto custo das matrizes.
- Injeção – engrenagens pequenas e sem responsabilidade.
- Sinterização.

## 2.12.5 Acabamento e outros processos típicos

Quando se quer precisão e/ou baixo ruído usam-se os processos de acabamento:

- *shaving*
- retificação

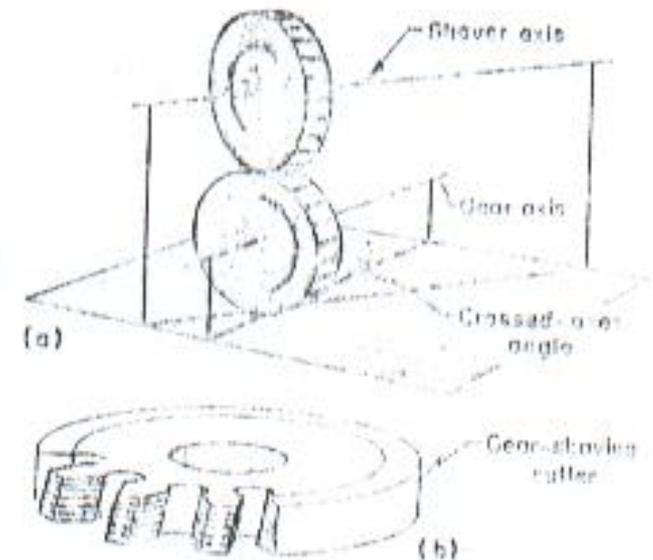


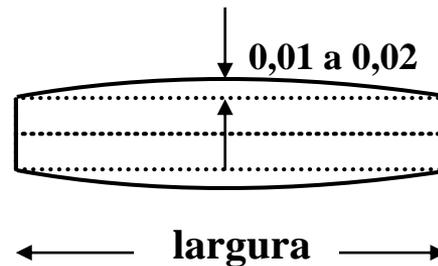
Fig. 26. (a) Work gear in mesh with shaving cutter. (b) Serrated gear-shaving cutter.





## 2.12.5 Acabamento e outros processos típicos

Em ambos os casos a máquina faz movimento de geração e ainda pode produzir um abaulamento (*crown*) do flanco (“contra-flecha”).



### Tratamentos térmicos.

- tempera superficial por indução, etc
- nitreção
- *shot peening* (jateamento com granalhas) – para elevar resistência, diminuir tensões residuais e aumentar resistência à fadiga.

### Amaciamento e ajustagem.

## 2.12.5 Acabamento e outros processos típicos

### Controle de Qualidade de engrenagens ISO 1328

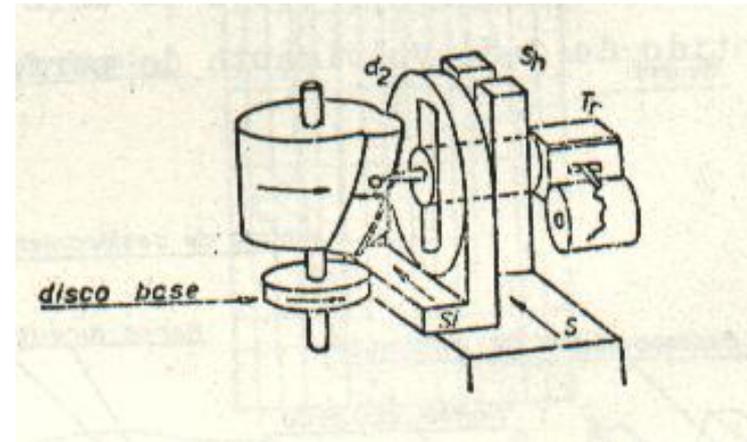
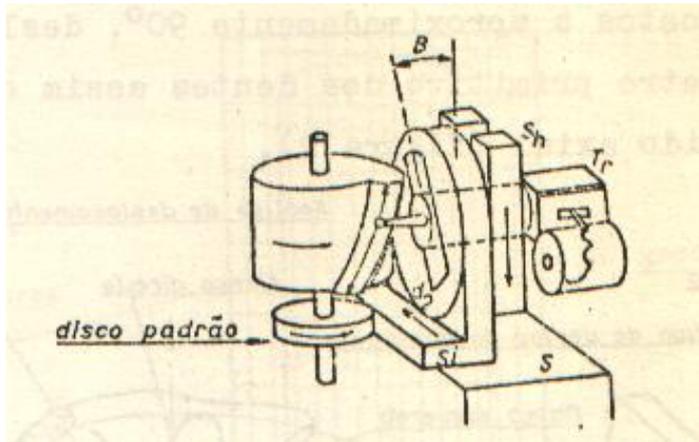
- Medida sobre pinos (retas) ou esferas (helicoidais)

controla se a espessura do dente está dentro da tolerância  $\Delta t$

$$r_x = r_p \frac{\cos \alpha}{\cos \phi_{pino}} ; \text{ com } ev \phi_{pino} = \frac{(t_p + \Delta t)}{d_p} + ev \alpha + \frac{r_{pino}}{r_b} - \frac{\pi}{z}$$

dados  $\Delta t$ , e geometria da engrenagem calcula-se a medida entrepino  $d_x + \Delta d_x$

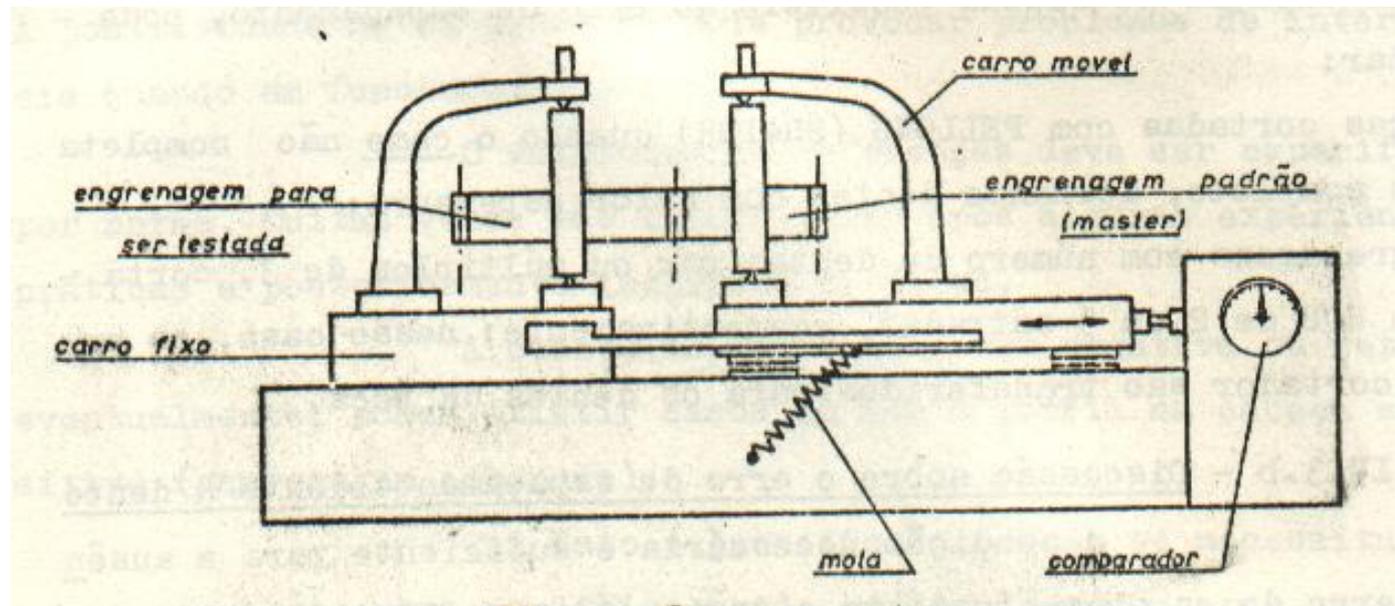
- Controle de passo de hélice e de perfil



## 2.12.5 Acabamento e outros processos típicos

### Controle de Qualidade de engrenagens ISO 1328

- Rolagem com engrenagem padrão





## 2.12.5 Acabamento e outros processos típicos

### Tolerâncias para dentes.

- a) **Passo** – a faixa de 0,013 a 0,040 mm.
- b) **Perfil** – variação dentro de 0,013mm. a 0,025.
- c) **Concentricidade** – está na faixa de 0,13mm.
- d) **Alinhamento do dente** – em engrenagens comerciais o alinhamento é mantido dentro de 0,013 a 0,025 mm/mm.
- e) **Espessura** – engrenagens de potência toleram de 0,050 a 0,13 mm de variação na espessura do dente.
- f) **Acabamento superficial** – engrenagens de precisão têm o acabamento superficial mantido de 0,8 microns rms. Engrenagens comerciais estão dentro de 1,2 - 1,5 microns rms.

## 2.12.5 Acabamento e outros processos típicos

### Tolerâncias para dentes.

Em muitos casos a qualidade das engrenagens pode ser medida por simples testes funcionais.

Em algumas aplicações um **TESTE DE RUÍDO** é suficiente para aprovar ou reprovar as engrenagens.

Algumas das engrenagens de potência são testadas **RODANDO A PLENA CARGA E VELOCIDADE** durante um período de tempo. Se elas ficarem polidas, sem desgaste, e girarem silenciosamente, pode ser garantido que elas trabalharão bem.

### **BACKLASH**

• em alguns casos a carga não permite que se forme um filme de lubrificante adequado e então se recuam as engrenagens e aumenta-se a distância entre-centros de  $\Delta C$  para obter folga circunferencial (*backlash B*).

$$B = 2 \Delta C \sin \alpha$$

