

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO MECÂNICO

MÉTODOS DE CONTROLE DE UM PAR DE

ENGRENAGENS CILÍNDRICAS DE DENTES

HELICOIDAIS

Autor: NELSON MIKIO TAKATA

Orientador: ETTORE BRESCIANI Fº

APRESENTAÇÃO

Este trabalho refere-se a um par de Engrenagens Cilíndricas de Dentes Helicoidais, onde serão abordados principalmente os aspectos de seu projeto e controle, além de algumas referências aos processos de usinagem.

O par engrenado pertence ao mecanismo de acionamento do martelo e do prensa-chapas de uma prensa de duplo efeito destinada à conformação de carrocerias de automóveis.

Os processos e dispositivos descritos neste trabalho referem-se ao controle dimensional e ensaios em engrenagens e correspondem, em parte, aos comumente utilizados nas indústrias. Alguns dispositivos, no entanto, não são encontrados nos processos de controle usuais, e foram criados para atender a algumas exigências específicas das peças e a alguns requisitos econômicos.

A primeira parte do trabalho tratará do cálculo da geometria do par, com a posterior verificação quanto a sua resistência.

Feito o dimensionamento, os materiais das engrenagens serão especificados, e um conjunto de ensaios será programado.

Aprovados os materiais, serão elaborados métodos de controle das engrenagens durante e após a utilização. Finalmente, para concluir o processo, as peças irão passar pela inspeção final e, se liberadas, seguirão para montagem.

I - DIMENSIONAMENTO DO PAR ENGRENADO

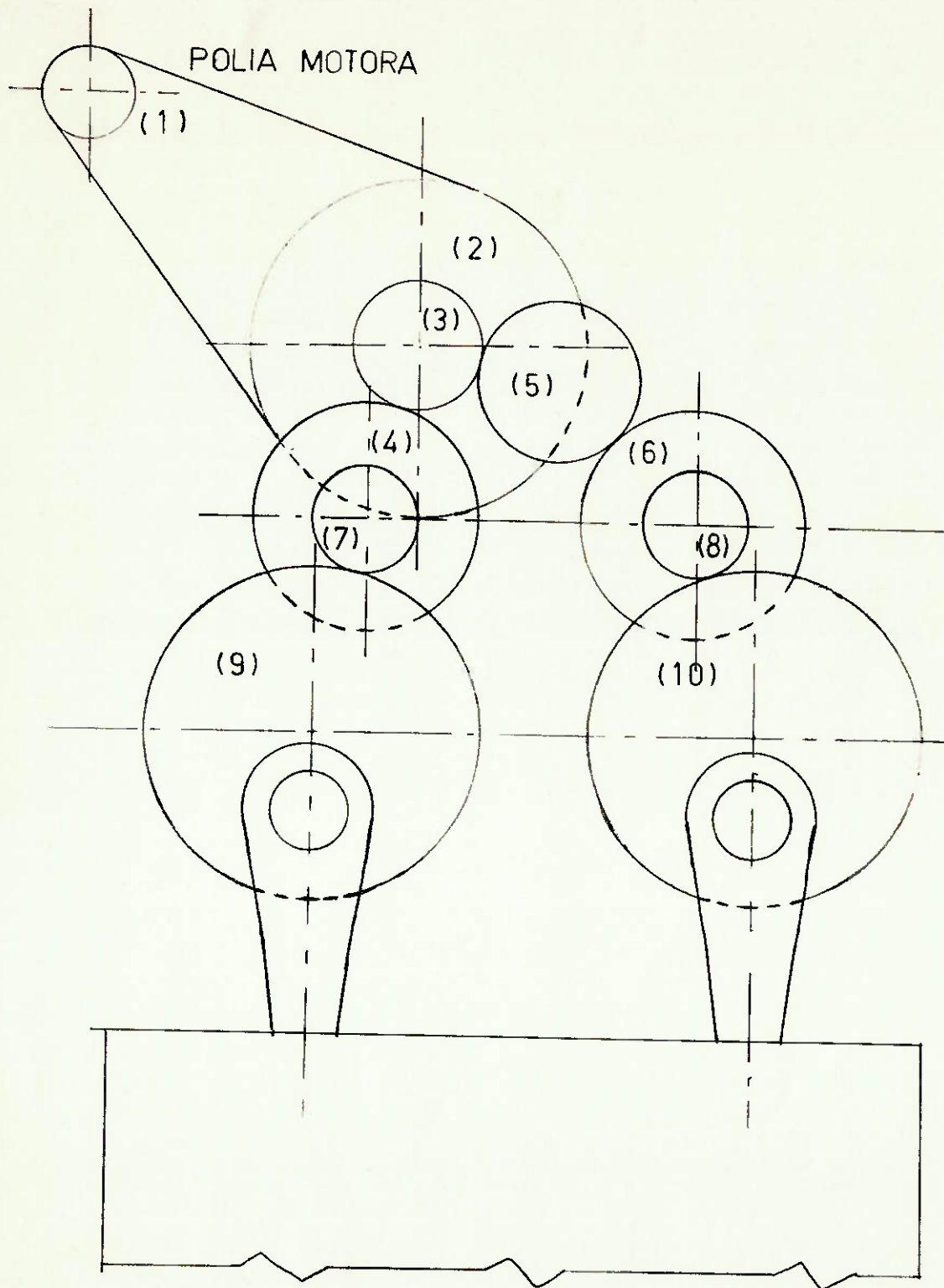
I - 1) O MECANISMO DE ACIONAMENTO DA PRENSA

O par engrenado objeto de nosso estudo é componente do mecanismo de acionamento do martelo e do prensa-chapas da prensa de duplo efeito, que iremos apresentar a seguir:

Dados Técnicos:

- Força de prensagem do martelo: 1200 t
- Força de prensagem do prensa-chapas: 600 t
- Curso do martelo: 900mm
- Curso do prensa-chapas: 750mm
- Velocidade máxima de repuxo: 19m/min
- Número de golpes: 20 golpes/min
- Potência do motor de acionamento: 85 cv
- Rotação do motor de acionamento: 1800 rpm

ESQUEMA DO MECANISMO DA PRENSA :



O objeto de nosso estudo será o par engrenado (7) - (9). Vamos tentar estimar a relação de transmissão $i = Z_9 / Z_7$.

Como podemos observar no esquema, as engrenagens (9) e (10) movimentam as bielas que, por sua vez, estão fixas ao corpo do prensa-chapas. Deste modo, podemos concluir que, a cada volta completa das engrenagens corresponde um golpe do conjunto martelo e prensa-chapas.

Como a prensa desenvolve 20 golpes por minuto, temos:

$$n_9 = n_{10} = 20 \text{ r.p.m.}$$

Como a polia (1) está montada no eixo do motor, temos:

$$n_1 = n_{\text{motor}} = 1800 \text{ rpm}$$

A relação de transmissão total será:

$$i \text{ total} = \frac{n1}{n9} = \frac{n1}{n10} = \frac{1800}{20} = 90$$

$$i \text{ total} = \frac{d2}{d1} \times \frac{z4}{z3} \times \frac{z9}{z7} = 90$$

$$\text{Admitindo } \frac{d2}{d1} = 5,0 \text{ e } \frac{z4}{z3} = 4,5 :$$

$$\frac{z9}{z7} = \frac{90}{5,0 \times 4,5}$$

$i7-9 = \frac{z9}{z7} = 4,0$

I - 2) CÁLCULO DA GEOMETRIA DO PAR

Para o dimensionamento do par engrenado, será utilizado o Critério da Pressão Específica, que leva em conta a pressão determinada no contato entre os flancos dos dentes e a vida expressa em horas efetivas de trabalho. Este critério pode ser expresso pela seguinte equação:

$$bd^2 = 2f^2 \times \frac{71620 \cdot N}{P_{adm}^2 \cdot n \cdot Y_p} \times \frac{i + 1}{i} \quad (1)$$

onde:

b = largura da superfície de contato (cm)

d = diâmetro primitivo do pinhão (cm)

f = fator que depende do módulo de elasticidade dos materiais

N = potência transmitida (cv)

P_{adm} = pressão admissível no contato (kgf/cm^2)

n = rotação do pinhão (r.p.m.)

γ_p = fator de correção de hélice

i = relação de transmissão

Para o pinhão temos:

a) largura $b = 15,0\text{cm}$

b) -material do pinhão - Aço SAE 4140

(Aço Cromo-Molibdênio)

-material da engrenagem - Ferro Fundido

DIN GGG 70

(Ferro Fundido Nodular)

Com isso, temos: $f = 1234$

c) Supondo um rendimento de 100% para o mecanismo de transmissão, teremos:

$N = N_{\text{motor}} = 85 \text{ CV}$

d) Temos $n_{\text{pinhão}} = i \times n_{\text{engrenagem}} (9)$

$n_{\text{pinhão}} = 4 \times 20$

$n_{\text{pinhão}} = 80 \text{ r.p.m.}$

e) O valor da pressão admissível no contato pode ser expresso pela equação:

$$p_{adm} = \frac{48,7 \times HB}{W^{1/6}}$$

onde HB = Dureza Brinell (kgf/mm²)

W = Vida em milhões de rotações

Para o pinhão de aço SAE 4140 com uma rotação de 80 r.p.m. e uma vida de 60.000 horas, temos:

$$p_{adm} = 4927,24 \text{ kgf/cm}^2$$

f) Para um ângulo de hélice de 10° temos um fa

tor de correção de hélice $\gamma_p = 1,22$

Substituindo os valores na equação (1) teremos:

$$15 \times d^2 = \frac{2 \times 1234^2 \times 71620 \times 85}{4927,24^2 \times 80 \times 1,22} \times \frac{4 + 1}{4}$$

$$d^2 = 652,04$$

$$d = 25,54 \text{ cm}$$

Vamos tomar

$d_7 = 26,00 \text{ cm} = 260 \text{ mm}$

Se admitirmos $z_7 = 30$ dentes para o pinhão, teremos:

$$m_f = \text{módulo frontal do par} = \frac{d_7}{z_7}$$

$$m_f = \frac{260}{30} = 8,67 \text{ mm}$$

$$m_n = \text{módulo normal do par} = m_f \times \cos \beta$$

$$m_n = 8,67 \times \cos 10^\circ = 8,54 \text{ mm}$$

Tomando um valor normalizado do módulo normal, teremos:

$$m_n = 9,00 \text{ mm}$$

Recalculando m_f , teremos:

$$m_f = \frac{m_n}{\cos} = \frac{9,00}{\cos 10^\circ}$$

$$m_f = 9,14 \text{ mm}$$

Recalculando d_7 , teremos:

$$d_7 = m_f \times z_7 = 9,14 \times 30$$

$$d_7 = 274,20 \text{ mm}$$

$$z_9 = z_7 \times i = 30 \times 4$$

$$z_9 = 120 \text{ dentes}$$

$$d_9 = m_f \times z_9 = 9,14 \times 120$$

$$d_9 = 1096,80 \text{ mm}$$

I - 3) VERIFICAÇÃO PELO CRITÉRIO DA RESISTÊNCIA

Dimensionado o par pelo critério da Pressão, vamos fazer a verificação pelo critério da Resistência, que pode ser representado pela seguinte equação:

$$\sigma_{\max} = \frac{P_u \times q}{b \times m_n \times e \times Y_r} \left(\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \right)$$

onde:

P_u = esforço tangencial (kgf)

q = fator de forma

b = largura da superfície de contato (cm)

m_n = módulo normal (cm)

e = fator de carga

γ_r = fator de correção de hélice

Devemos ter $\sigma_{\max} \leq \sigma_{badm}$,

onde σ_{badm} = tensão admissível de flexão
(kgf/cm²)

a - Para o pinhão temos:

$$a - 1) \quad P_u = \frac{75 \times N}{V} = \frac{75 \times 85}{V}$$

$$V = \frac{\pi d n}{60} = \frac{\pi \times 0,27 \times 80}{60}$$

$$V = 1,13 \text{ m/s}$$

$$P_u = \frac{75 \times 85}{1,13} = 5636,74 \text{ kgf}$$

$$a - 2) \quad z_n = \frac{z}{\cos^3 \beta} = \frac{30}{\cos^3 10^\circ}$$

$$z_n = 32 \longrightarrow q \approx 3,0$$

a - 3) Para o regime de utilização da prensa, podemos tomar um fator de carga $e = 1,20$

a - 4) Para um ângulo de hélice $\beta = 10^\circ$, temos $\gamma_r = 1,28$

Substituindo os valores na equação, temos:

$$\tau_{\max} = \frac{5636,74 \times 3,0}{15 \times 0,9 \times 1,20 \times 1,28}$$

$\tau_{\max} = 815,50 \text{ kgf/cm}^2$

Para o Aço SAE 4140, temos:

$$\tau_{badm} = 1500 \text{ kgf/cm}^2$$

Como $\tau_{max} < \tau_{badm}$, concluímos que o pinhão, na geometria calculada, resiste aos esforços no pé do dente.

b - Para a engrenagem temos:

$$b - 1) P_u = 5636,74 \text{ kgf}$$

$$b - 2) Z_n = \frac{z}{\cos^3 \beta} = \frac{120}{\cos^3 10^\circ}$$

$$Z_n = 126 \longrightarrow q = 2,45$$

$$b - 3) e = 1,20$$

$$b - 4) \beta = 10^\circ \longrightarrow \gamma_r = 1,28$$

Substituindo os valores na equação, temos:

$$\sigma_{\max} = \frac{5636,74 \times 2,45}{15 \times 0,9 \times 1,20 \times 1,28}$$

$\sigma_{\max} = 665,99 \text{ kgf/cm}^2$

Para o Ferro Fundido DIN GGG 70 temos:

$$\sigma_{\text{badm}} = 700 \text{ kgf/cm}^2$$

Como $\sigma_{\max} < \sigma_{\text{badm}}$, concluímos que a engrenagem, na geometria calculada, resiste aos esforços no pé do dente.

Feito o dimensionamento e a verificação do par engrenado (7) - (9), podemos considerar a geometria final das engrenagens como sendo a anteriormente calculada.

I - 4) DETERMINAÇÃO DA MEDIDA WO NOMINAL

A medida teórica WO pode ser determinada pela seguinte equação:

$$WO = Mn \times \cos \alpha \left[\pi(V + 0,5) + Z (\operatorname{tg} \alpha - \hat{\alpha}) \right]$$

onde:

Mn = módulo normal

α = ângulo de pressão em graus

$\hat{\alpha}$ = ângulo de pressão em radianos

V = número de vãos no arco a ser medido

V = n - 1

n = número de dentes no arco a ser medido

Z = número de dentes da engrenagem

a - Medida WO do Pinhão

$$n = \frac{Z}{9} + 0,5$$

$$n = \frac{30}{9} + 0,5 = 3,83$$

$$n = 4 \text{ dentes}$$

$$V = n - 1 = 4 - 1$$

$$V = 3 \text{ vãos}$$

$$WO = 9 \times \cos 20^\circ \left[\pi (3 + 0,5) + 30 \left(\operatorname{tg} 20^\circ - \frac{20 \pi}{180} \right) \right]$$

$WO \text{ pinhão} = 96,77 \text{ mm} \quad p/n = 4 \text{ dentes}$

b - Medida WO da engrenagem

$$n = \frac{Z}{9} + 0,5 = \frac{120}{9} + 0,5 = 13,83$$

$$n = 14 \text{ dentes}$$

$$V = n - 1 = 14 - 1$$

$$V = 13 \text{ vãos}$$

$$W_0 = 9 \times \cos 20^\circ \left[\pi (13 + 0,5) + 120 (\operatorname{tg} 20^\circ - \frac{20\pi}{180}) \right]$$

$W_0 \text{ engrenagem} = 373,81 \text{ mm } p/n = 14 \text{ dentes}$

I - 5) DETERMINAÇÃO DO DIÂMETRO ENTRE ESFERAS De
NOMINAL

A medição do diâmetro entre esferas geralmente se dá após a usinagem dos dentes da engrenagem, ao contrário da medida W , que é verificada durante a fabricação. O desvio do valor medido de De em

relação ao valor nominal indica o grau de precisão obtido na usinagem. Em nossa medição vamos utilizar duas esferas de 20mm de diâmetro. O diâmetro entre esferas teórico pode ser calculado pela seguinte expressão.

$$De = \frac{d \times \cos \varphi_{ap}}{\cos \Theta} + d_{es}$$

onde:

- d = diâmetro primitivo da engrenagem
- φ_{ap} = ângulo de pressão aparente
- Θ = ângulo função da evolvente
- d_{es} = diâmetro das esferas calibradas

Equações auxiliares:

$$(1) \quad \operatorname{tg} \varphi_{ap} = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\cos \beta}$$

$$(2) \quad \text{ev} \Theta = \frac{S_n}{d} + \text{ev} \gamma_{ap} + \frac{\text{des}}{\cos \beta' \cdot d \cdot \cos \gamma_{ap}} \cdot \frac{\pi}{Z}$$

$$(3) \quad S_n = \frac{p_n}{2} = \frac{M_n \times \pi}{2}$$

$$(4) \quad \text{tg} \beta' = \cos \gamma_{ap} \times \text{tg} \beta$$

onde β' = ângulo de hélice medida sobre a
circunferência base

a - Diâmetro D do pinhão

$$d = 274,20 \text{ mm}$$

$$Z = 30 \text{ dentes}$$

$$M_n = 9,00 \text{ mm}$$

$$\gamma = 20^\circ$$

$$\beta = 10^\circ$$

$$\text{Da equação (1) : } \gamma_{ap} = 20,28^\circ$$

Da equação (3) : $S_n = 14,14 \text{ mm}$

Da equação (4) : $\beta' = 9,39^\circ$

Substituindo os valores na equação (2) :

$$\text{ev } \Theta = 0,04127$$

$$\Theta = 27,6^\circ$$

Substituindo na equação principal, tiramos:

$D_e = 310,23 \text{ mm} \quad p/d e s = 20 \text{ mm}$

b - Diâmetro D da engrenagem

$$d = 1096,80 \text{ mm}$$

$$Z = 120 \text{ dentes}$$

$$m_n = 9,00 \text{ mm}$$

$$\alpha = 20^\circ$$

$$\beta = 10^\circ$$

Da equação (1) : $\gamma_{ap} = 20,28^\circ$

Da equação (3) : $S_n = 14,14 \text{ mm}$

Da equação (4) : $\beta' = 9,39^\circ$

Substituindo os valores na equação (2) :

$$\text{ev } \ominus = 0,02203$$

$$\ominus = 22,7^\circ$$

Substituindo na equação principal, tiramos:

$D_e = 1135,19\text{mm} \quad p/d e s = 20\text{mm}$
--

I - 6) GEOMETRIA FINAL

Feitos os cálculos e verificações, chegamos à geometria final do par engrenado.

Características do engrenamento

- relação de transmissão	$i = 4,00$
- distância entre centros	$a = 685,50\text{mm}$
- módulo normal	$m_n = 9,00\text{mm}$
- módulo frontal	$m_f = 9,14\text{mm}$

Geometria do pinhão

- número de dentes	$Z = 30$
- diâmetro primitivo	$d = 274,20\text{mm}$
- ângulo de pressão	$\alpha = 20^\circ$
- ângulo de hélice	$\beta = 10^\circ$
- deslocamento do perfil (correção)	$x.m_n = 0$
- largura	$b = 150\text{mm}$
- número de dentes p/ medição	$n = 4$
- medida W_0 nominal	$W_0 = 96,77\text{mm}$

- diâmetro da esfera calibrada $d e s = 20mm$
- diâmetro entre esferas $D e = 310,23mm$

Geometria da engrenagem

- número de dentes $Z = 120$
- diâmetro primitivo $d = 1096,80mm$
- ângulo de pressão $\alpha = 20^{\circ}$
- ângulo de hélice $\beta = 10^{\circ}$
- deslocamento do perfil $x.mn = 0$
(correção)
- largura $b = 150mm$
- número de dentes p/ medição $n = 14$
- medida WO nominal $WO = 373,81mm$
- diâmetro da esfera calibrada $d e s = 20mm$
- diâmetro entre esferas $D e = 1135,19mm$

II - ESPECIFICAÇÃO DO MATERIAL DO PINHÃO

Neste capítulo iremos especificar o material e indicar tratamentos térmicos para que o pinhão atinja níveis de dureza e resistência ideais.

II - 1) CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL

O material do pinhão é o aço SAE 4140, também denominado Aço Cromo - Molibdênio. Este tipo de aço caracteriza-se por altos níveis de dureza e resistência, com um certo grau de tenacidade.

A composição do aço SAE 4140 é :

C : 0,38 - 0,43%

Mn : 0,75 - 1,00%

P : max. 0,040%

S : max. 0,040%
Si : 0,20 - 0,35%
Cr : 0,80 - 1,10%
Mo : 0,15 - 0,25%

II - 2) TRATAMENTO TÉRMICO

O material do pinhão sofrerá dois tratamentos: um de endurecimento antes da usinagem e um tratamento superficial após a usinagem dos dentes. Os processos utilizados serão o de Têmpera e Revenido e, para o endurecimento superficial, o de Nitretação a Gás.

a) Antes da usinagem

Para que o material do pinhão atinja um alto grau de dureza, vamos aplicar um tratamento de TÊMPERA ao aço, seguido de REVENIDO, para alívio das tensões resultantes do resfriamento brusco e para que sejam restituídas as propriede

dades de ductilidade e tenacidade do material.

Segundo a norma ABNT, temos para o aço 4140 :

- TÊMPERA : $T = 840 - 860^{\circ}\text{C}$

(Resfriamento em banho de óleo)

- REVENIDO: $T = 200 - 680^{\circ}\text{C}$

É desejada uma resistência à tração

$\sigma = 120 \text{ kgf/mm}^2$ para o aço após o tratamento de
TÊMPERA e REVENIDO.

Segundo as Curvas de Revenido, da norma ABNT,
para o aço 4140 temos:

$\sigma = 120 \text{ kgf/mm}^2 \longrightarrow \text{Trevenido} = 450^{\circ}\text{C}$

Resumindo, então, teremos para o material do
pinhão, antes da usinagem :

Aço SAE 4140 tratado termicamente por TÊMPERA
e REVENIDO.

$$T \text{ têmpera} = 840 - 860^{\circ}\text{C}$$

(Resfriamento em banho de óleo)

$$T \text{ revenido} = 450^{\circ}\text{C}$$

Após o tratamento, teremos :

$$\sigma = 120 \text{ kgf/mm}^2 = 1176 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Dureza} = 350 \text{ HB}$$

b) Após a usinagem

Para que o pinhão tenha um alto grau de
dureza na superfície dos dentes, o mesmo será

submetido a um tratamento superficial denominado NITRETAÇÃO A GÁS. O processo consiste na sujeição da peça acabada a uma corrente de Amônia (NH_4) a uma temperatura de aproximadamente 500°C . Nesta temperatura, o NH_4 se dissocia, e o Nitrogênio livre se associa ao Ferro, formando o Nitreto de Ferro (Fe_4N), uma substância de alta dureza. A Nitretação pode atingir uma profundidade na peça de até 1mm.

Para o aço SAE 4140 submetido à NITRETAÇÃO A GÁS durante 84 horas a uma temperatura de 500°C , teremos os seguintes valores de dureza em função da profundidade na peça :

Tabela - NITRETAÇÃO A GÁS
84 horas - 500°C

profundidade (mm)	sup.	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
dureza (HB)	658	570	561	500	470	430	420	380

III - INSPEÇÃO DO " BLANCK " - PINHÃO

Quando do recebimento do " BLANCK " (bloco cilíndrico para fabricação da engrenagem), devemos fazer a inspeção para verificar a sua conformidade com as especificações do material já formuladas.

III - 1) CONTROLE DO MATERIAL

O material deve ter sua granulação controlada para se verificar se há conformidade com o grão normalizado. Uma Análise Química também se faz necessária, sendo que a composição química obtida deve ser semelhante àquela

já determinada na seção II - 1. '

III - 2) ENSAIO DE DUREZA

A Dureza Brinell de um material é dada pela seguinte expressão :

$$HB = \frac{2 P}{D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

onde HB = Dureza Brinell (kgf/mm²)

P = carga aplicada (kgf)

D = diâmetro da esfera (mm)

d = diâmetro da calota esférica (mm)

sejam P = 3000 kgf

D = 10mm

Na medição do diâmetro da calota esférica im-

primida no " Blanck " , tiramos :

$$d = 5,50\text{mm}$$

$$HB = \frac{2 \times 3000}{10(10 - \sqrt{10^2 - 5,5^2})}$$

$HB = 364 \text{ kgf/mm}^2$

Visto que a dureza do material foi especificada em 350 HB, e o valor medido foi de 364 HB, podemos considerar o blanck dentro das especificações.

Pela tabela de comparação de durezas e resistência à tração (DIN 50150) :

$$\text{Dureza} = 364 \text{ HB} \longrightarrow \sigma = 1225 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma = 125 \text{ kgf/mm}^2$$

III - 3) ENSAIO POR ULTRASSOM

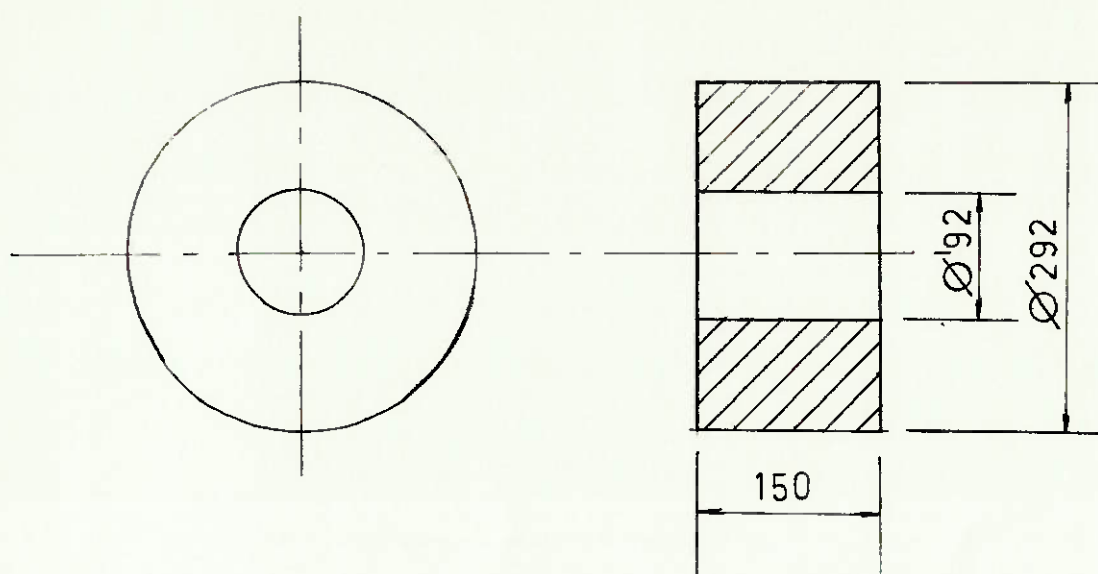
Antes do início da usinagem do pinhão, é necessário verificarmos se há falhas presentes no blank, isto é, descontinuidades internas e externas do material que possam prejudicar o funcionamento do sistema.

As trincas internas podem ser perfeitamente detectadas por um aparelho de Ultrassom que, através de um cabeçote emissor - receptor, pode detectar falhas através do método da reflexão de ondas mecânicas de alta frequência (ondas ultra-sônicas). As trincas superficiais podem ser detectadas pelo mesmo aparelho, mas com a utilização de um cabeçote a ângulo.

a) Preparação do Blank

Para que a peça esteja em condições de ser inspecionada, terá de ser usinada de modo a atingir as seguintes dimensões.

medidas em mm

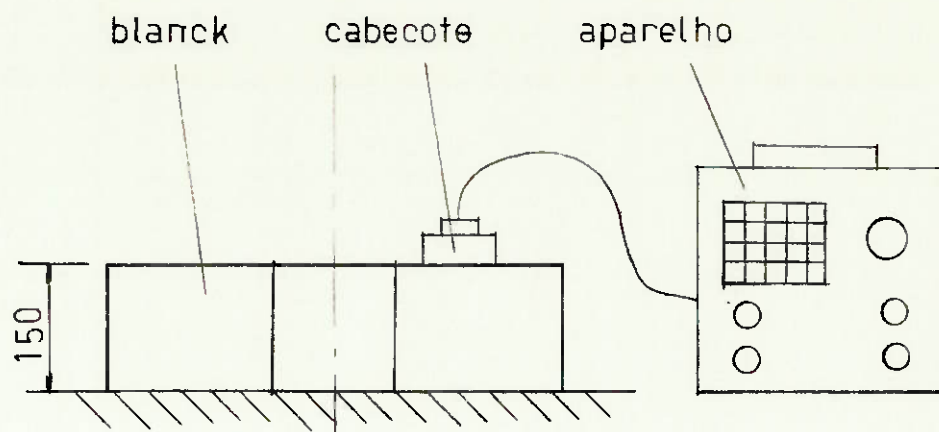


b - Equipamento

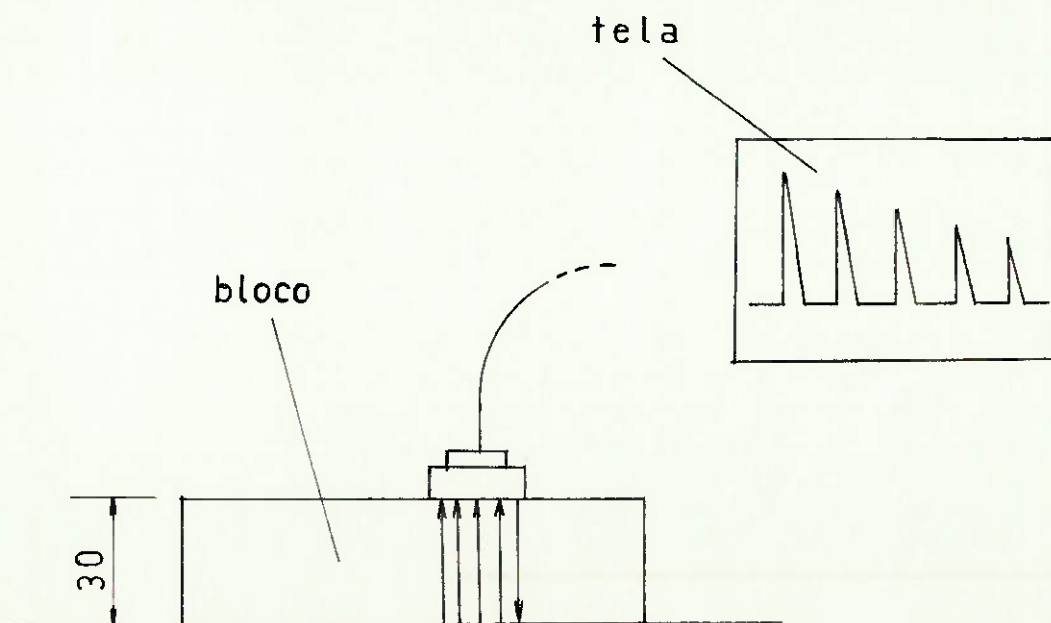
O sistema a ser utilizado para a inspeção é composto pelos seguintes elementos :

- Cabeçote tipo Q4 de 4 MHZ com oscilador de quartzo e diametro de 25 mm.
- Bloco de aço de dimensões 30 x 50mm para calibração do equipamento.
- Sapata de PLEXIGLASS para emissão oblíqua de ondas (ângulo de 45°).
- Sapata de PLEXIGLASS para adaptação do cabeçote em superfícies curvas.
- Óleo SAE 20 para acoplamento do cabeçote e das sapatas à peça.

C - Inspeção na direção axial



Para calibrar o equipamento a uma profundidade de 150 mm, é necessário gerar ecos múltiplos no osciloscópio com a utilização do bloco de calibração.

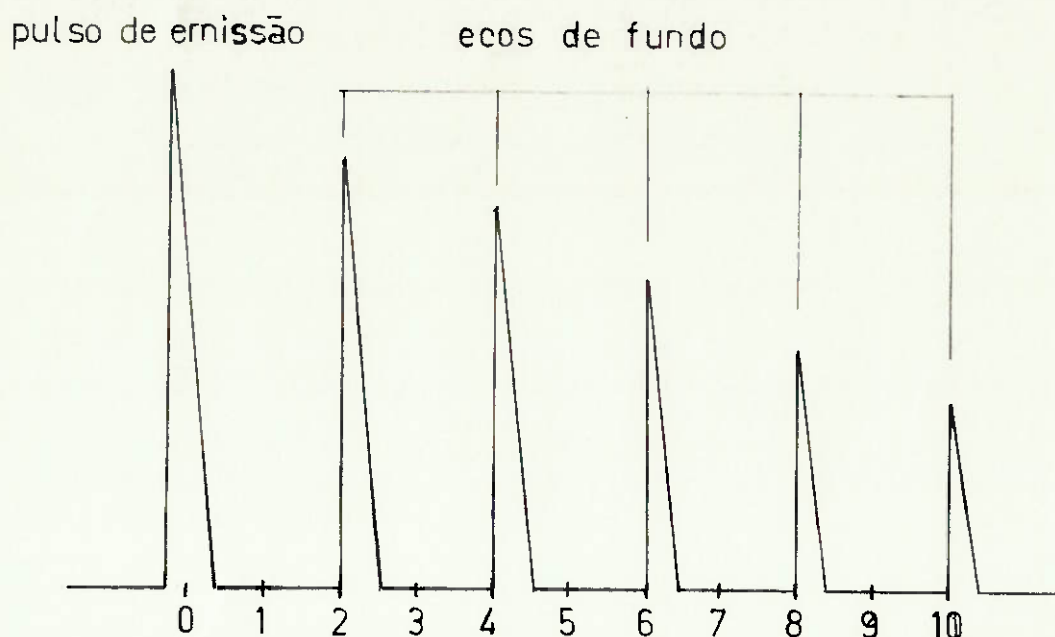


O número n de ecos de fundo necessários para a calibração é dado por :

$$n = \frac{150 \text{ mm}}{30 \text{ mm}} = 5 \text{ ecos de fundo}$$

Como temos 10 divisões na escala horizontal do aparelho, devemos posicionar os 5 ecos nos pontos 2, 4, 6, 8 e 10 da escala, sendo que o eco de emissão se localizará no ponto 0.

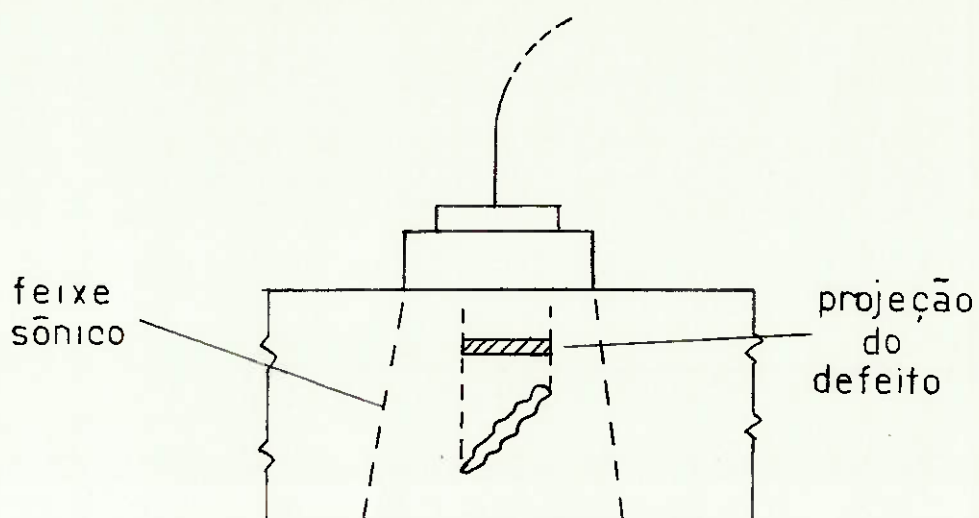
Posicionando os ecos, teremos a seguinte configuração na tela :



Calibrado o aparelho, pode-se iniciar a inspeção do Blanck, através da emissão de ondas longitudinais.

O cabeçote deve percorrer toda a superfície plana do Blanck, e as descontinuidades detectadas terão seus ecos dispostos entre o pulso de emissão e o eco de fundo numa posição na tela proporcional a suas profundidades na peça. Nestas condições (o cabeçote apoiado diretamente sobre a peça), o aparelho somente detecta defeitos com um certo valor da

área projetada no plano normal ao feixe sônico que, no caso, será emitido normalmente em relação à superfície da peça.



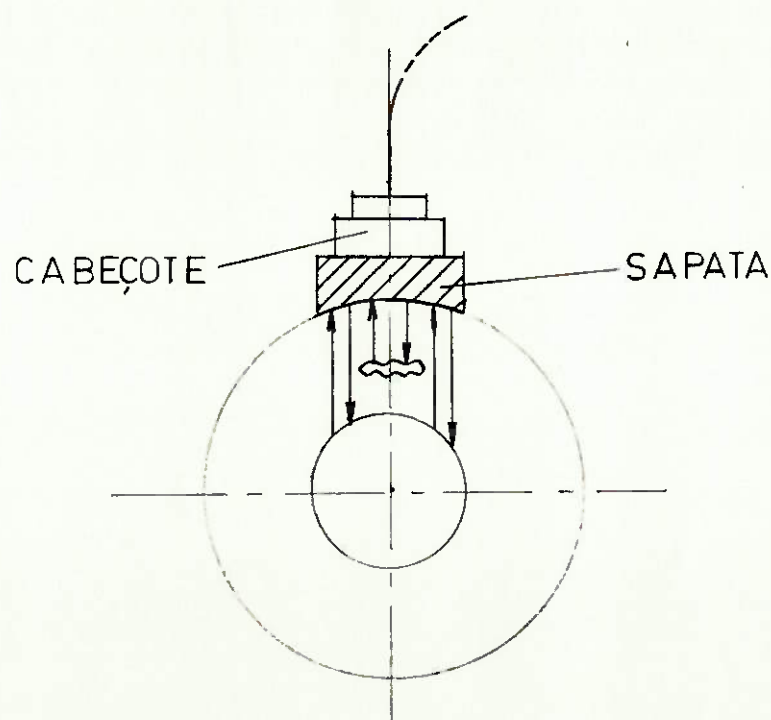
Os defeitos com direção paralela ao feixe sônico e os defeitos superficiais não serão detectados por este tipo de inspeção.

d) Inspeção na direção radial

Para esta inspeção, faz-se necessário adaptar um acoplamento especial entre o cabeçote e a peça pois, no caso, o contato direto não proporciona condições para a transmissão da onda sonora.

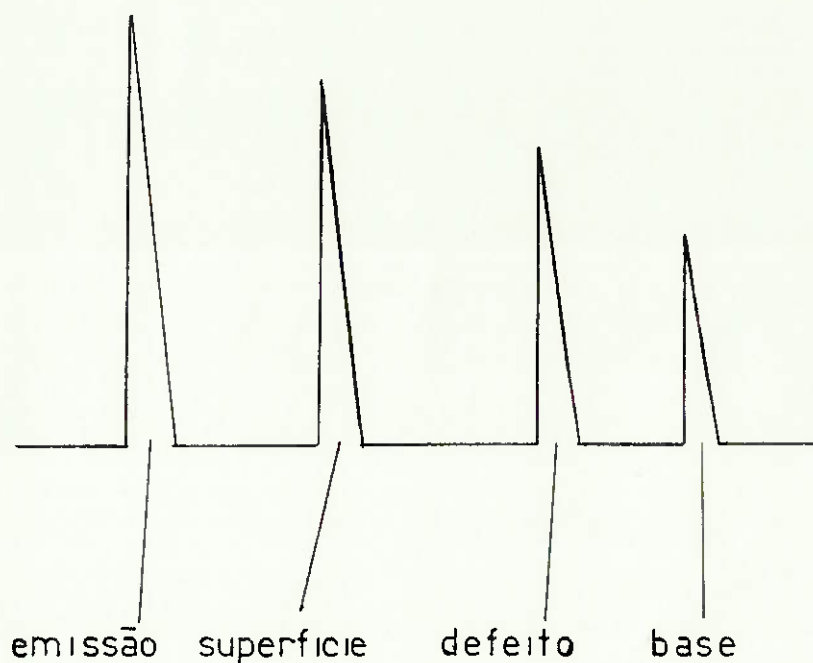
Um acoplamento conveniente teria que unir o cabeçote à peça sem permitir a presença de ar entre eles.

Para o caso do pinhão, podemos utilizar uma sapata com o formato esquematizado a seguir.



A sapata será constituída de material plástico;
no caso o PLEXIGLASS.

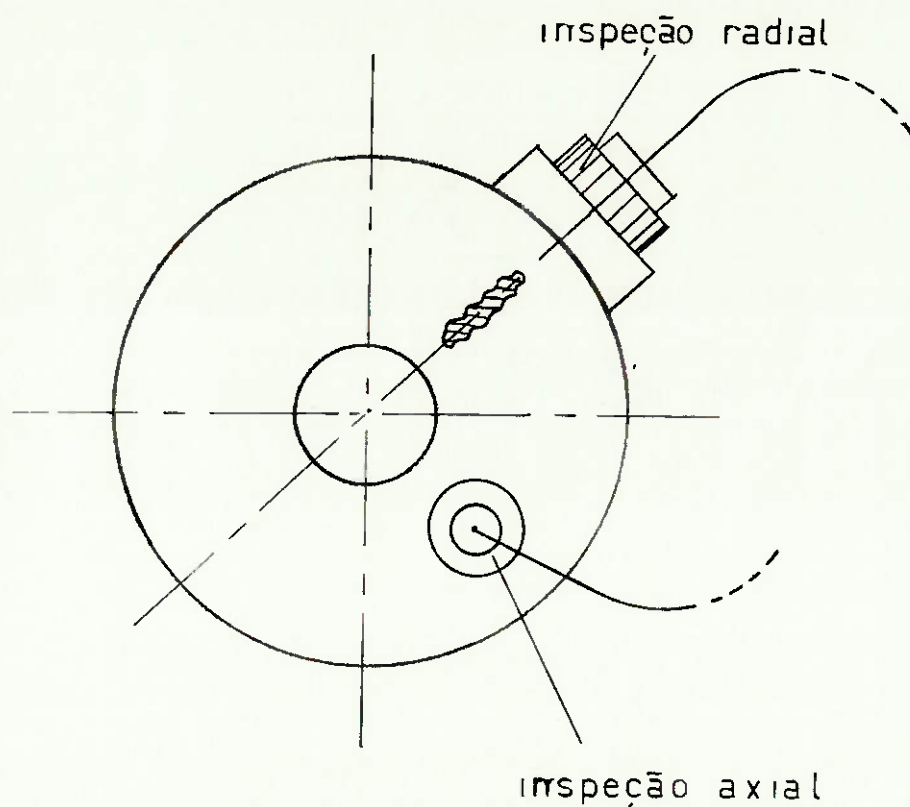
Um ecograma típico para este tipo de inspeção
tem a seguinte configuração.



À exemplo do caso anterior, os defeitos com dire_
ção paralela ao feixe sônico não serão detectados
nesta inspeção.

e) Inspeção com emissão oblíqua

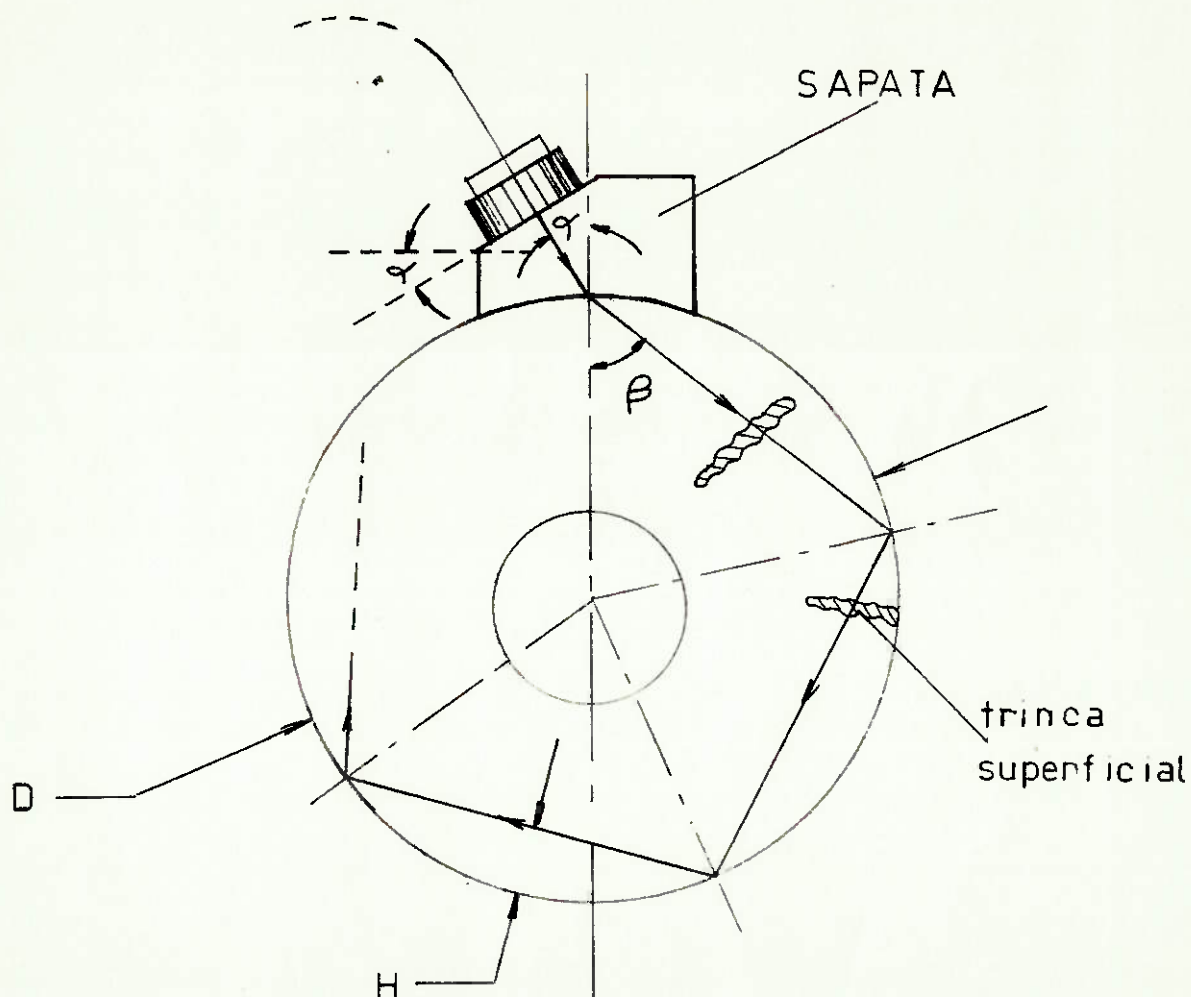
Existem defeitos que não serão detectados pelas duas inspeções apresentadas, pois terão suas direções paralelas aos dois feixes produzidos, como podemos observar no seguinte esquema :



Para a detecção desses defeitos, podemos utilizar o método da emissão oblíqua de ondas sonoras. Estas ondas poderão ser produzidas com o auxílio

de uma sapata especial, que tem a face que suporta o cabeçote inclinada em relação à face que se apoia à peça.

Este método de inspeção produz ONDAS TRANSVERSAIS no interior da peça.



É bom notar que, nesta inspeção, os defeitos superficiais também são detectados, desde que

atingam uma certa profundidade.

Pode-se observar na figura que existe uma profundidade máxima H que pode ser inspecionada na peça pelo método da emissão oblíqua. Deste modo, devemos fixar um ângulo β relativamente pequeno, de tal forma que a profundidade atingida pelo feixe seja razoável. Uma tabela relacionando β , H e D (diâmetro da peça) é mostrada a seguir :

β	30°	35°	45°	60°	70°	80°
H/D	0,250	0,213	0,145	0,067	0,030	0,0076

Para a inspeção do Blanck, vamos fixar $\beta = 30^\circ$, onde teremos $H/D = 0,25$

Como $D = 292 \text{ mm}$, teremos :

$$H = 0,25 \times 292 \longrightarrow H = 73 \text{ mm}$$

Assim, o método deverá detectar defeitos à uma profundidade de até 73 mm.

Quanto à sapata, esta deve ter seu ângulo α dimensionado de modo que o feixe sônico penetre na peça a um ângulo $\beta = 30^\circ$.

f - Critérios de aceitação

Devemos estabelecer critérios de aceitação convenientes para os defeitos detectados, de modo que sejam evitados os casos em que uma peça inapta seja usinada e montada, ou que uma peça em condições de utilização seja refugada.

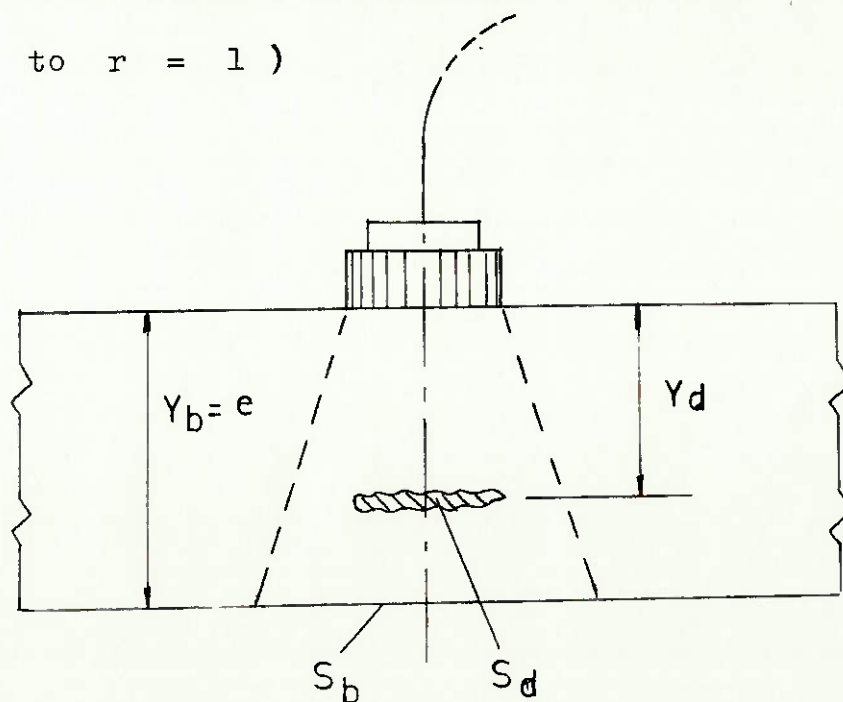
Vamos adotar o critério do Eco de Referência, ou seja, o eco de um defeito não deve ter sua amplitude maior que a de um eco de referência, caso contrário, a peça será rejeitada.

No caso, o eco de referência será aquele proveniente da superfície posterior do blank, ou seja, o Eco de Base.

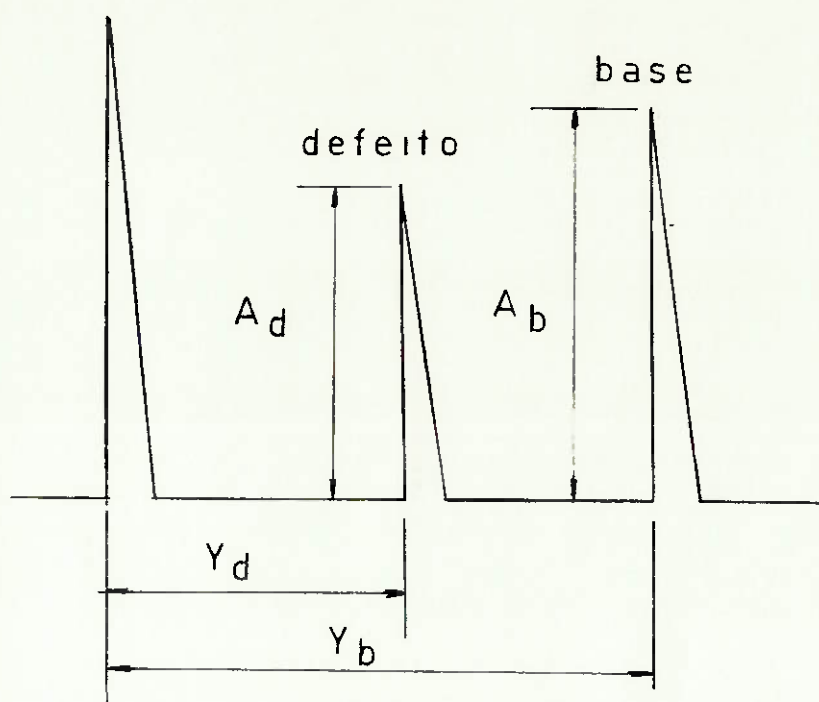
Existe um meio de se avaliar a área de um defeito através da configuração dos ecos na tela do aparelho.

Consideremos um aparelho inspecionando uma peça com espessura e , com as seguintes hipóteses :

- A área do defeito é perpendicular à direção do feixe sônico.
- Toda a energia sonora incidente sobre o defeito é refletida (coeficiente de reflexão do defeito $r = 1$)



Na tela teremos :



Sendo $S = \text{área}$

$Y = \text{profundidade}$

$A = \text{amplitude do eco}$

A área do defeito pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$S_d = S_b \times \frac{A_d}{A_b} \times e^{2\alpha(y_d - y_b)}$$

S_b = área da base atingida pelo feixe sônico

$$S_b = \frac{\pi (d + 2e \operatorname{tg} \Theta)^2}{4}$$

O cálculo da área do defeito fica:

$$S_d = \frac{\pi (d + 2e \operatorname{tg} \Theta)^2}{4} \times \frac{A_d}{A_b} \times e^{2\alpha(y_d - y_b)}$$

Onde S_d = área do defeito

A_d = amplitude do eco do defeito

A_b = amplitude do eco de base

Y_d = profundidade do defeito

$Y_b = e$ = espessura da peça

d = diâmetro do cabeçote

Θ = ângulo de abertura do feixe sônico

α = coeficiente de atenuação do ultra-som
no material

IV - CONTROLE DURANTE A USINAGEM DOS DENTES

(PINHÃO)

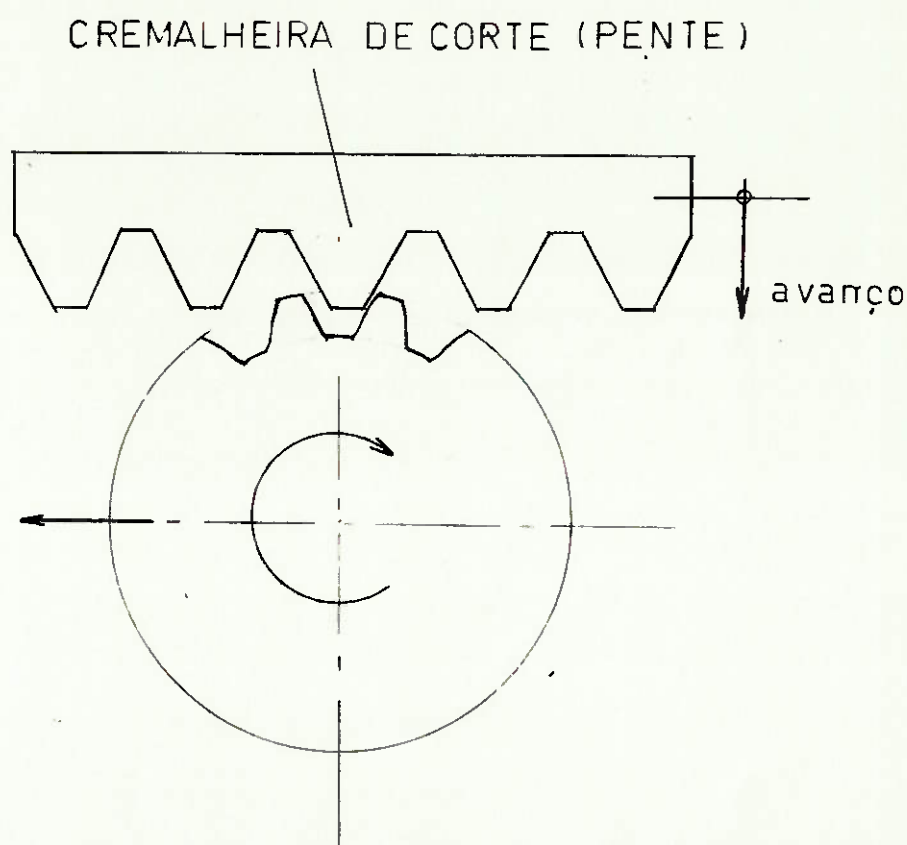
Para que o pinhão esteja de acordo com as dimensões de projeto, é necessário que o valor de W medido seja igual ao valor nominal, que já foi calculado e vale :

$$W_o = 96,77 \text{ mm } p/n = 4 \text{ dentes}$$

A usinagem dos dentes será executada numa entalhadadeira de engrenagens MAAG SH-250, que uti-

liza uma cremalheira de corte para a geração dos dentes.

O processo consistirá de dois passes de desbaste e um de acabamento. Um esquema do processo de corte é mostrado a seguir.



- 1º passe de desbaste

Dado um certo avanço a do pente em direção ao blank, o processo de corte pode ser iniciado.

O pente movimenta-se numa direção correspondente ao ângulo de hélice da engrenagem (no caso, $\beta = 10^\circ$), enquanto o blanck possui movimentos simultâneos de translação (na direção transversal) e rotação.

A operação termina quando o blanck realiza uma volta completa.

- 1ª medição de W

Feito o primeiro passe de desbaste, passa-se à medição de W para 4 dentes. Utilizando um micrômetro de prato, medimos :

$$W = 103,50 \text{ mm}$$

Visto que o valor medido é maior que o nominal, temos que aplicar um avanço a do pente de modo que esse valor seja atingido. Como o passe de desbaste exige sobremetal, vamos recalcular W_0 .

$$W_o' = W_o + S$$

Sendo S = sobremetal = 2mm

$$W_o' = 96,77 + 2,00$$

$W_o' = 98,77 \text{ mm}$

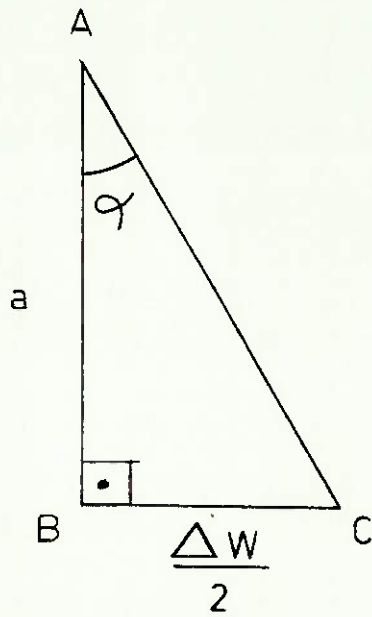
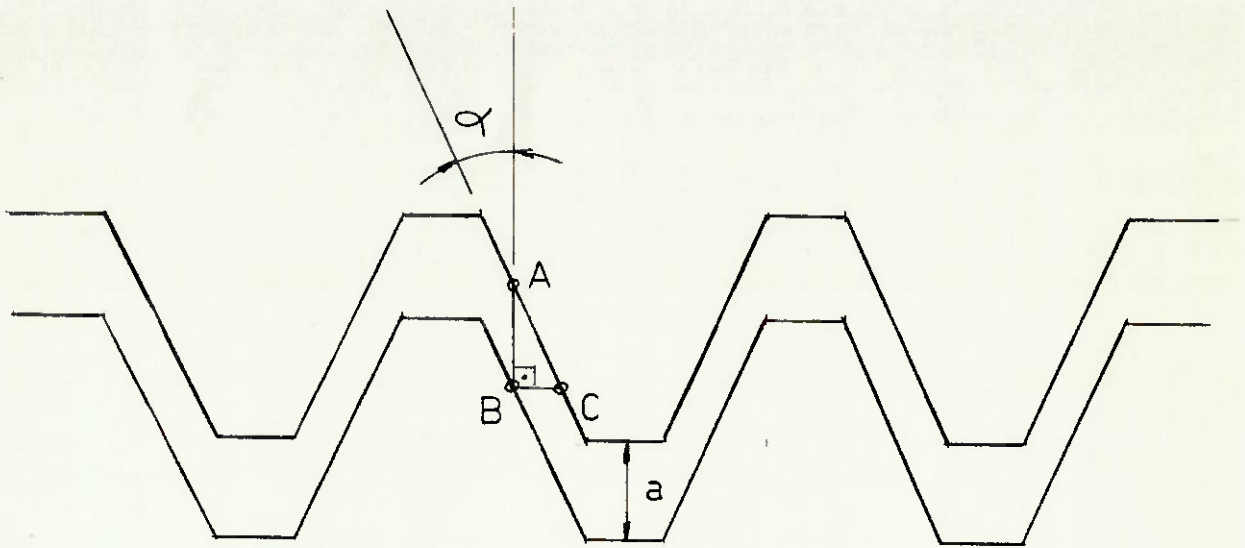
A discrepância entre o valor medido e o valor nominal de W vale :

$$W = W_{\text{medido}} - W_o'$$

$$W = 103,50 - 98,77$$

$\Delta W = 4,73 \text{ mm}$

Temos que calcular um valor de avanço a de modo que 4,73mm de material sejam removidos dos flancos dos dentes.



$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta w / 2}{a}$$

$$a = \frac{\Delta w}{2 \operatorname{tg} \alpha}$$

$$a = \frac{4,73}{2 \times \operatorname{tg} 20^{\circ}} \longrightarrow a = 6,50 \text{ mm}$$

- 2º passe de desbaste

Dado o avanço $a = 6,50 \text{ mm}$ no pente, daremos o 2º passe de desbaste ao blank.

- 2ª medição de W

Novamente no micrômetro de pratos medimos :

$$W = 98,80 \text{ mm}$$

$$W_o = 96,77 \text{ mm}$$

$$W = W - W_o = 98,80 - 96,77$$

$$W = 2,03 \text{ mm} = \text{sobremetal a ser removido no}$$

passe de acabamento

$$a = \frac{\Delta w}{2 \operatorname{tg} \varphi} = \frac{2,03}{2 \times \operatorname{tg} 20^{\circ}}$$

$$a = 2,79 \text{ mm}$$

Daremos um avanço $a = 2,79\text{mm}$ ao pente para que, após o passe de acabamento, o valor nominal W_o seja atingido.

- passe de acabamento

Para esta operação, usaremos um pente especial para acabamento, que remove material apenas nos flancos dos dentes.

- 3^o medição de W

Desta vez medimos :

$$W = 96,75 \text{ mm}$$

Admitindo uma tolerância de $0,05 \text{ mm}$ para o valor nominal, teremos :

$$W_o = 96,77 \pm 0,05 \text{ mm}$$

Visto que o valor medido se encontra dentro da tolerância do valor nominal, podemos aceitar a geometria dos dentes do pinhão com sendo a especificada no projeto.

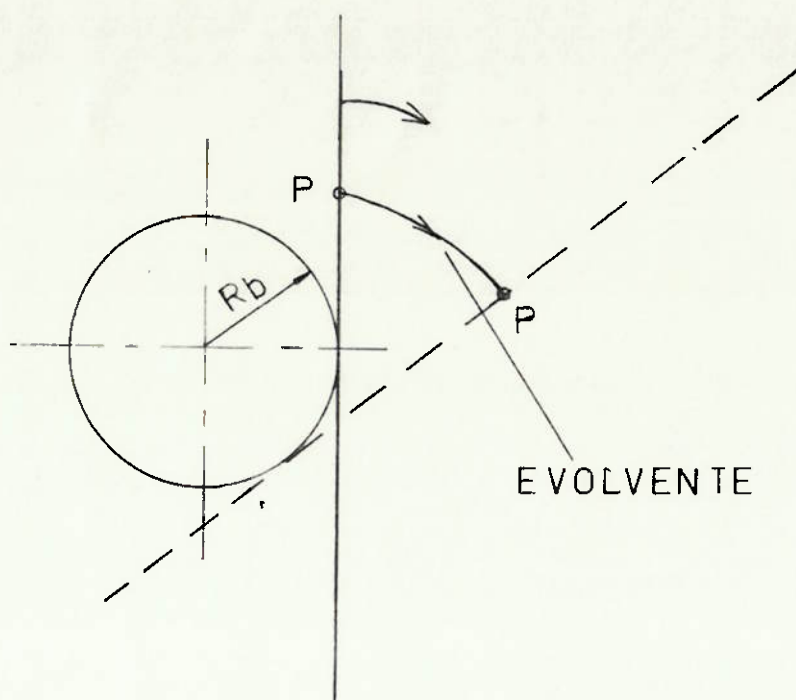
V - CONTROLE DA PEÇA ACABADA (PINHÃO)

Usinado o pinhão, passaremos a controlar sua geometria. Faremos a verificação do perfil dos flancos dos dentes, do diâmetro entre esferas e do passo.

V - 1) CONTROLE DO PERFIL DOS DENTES

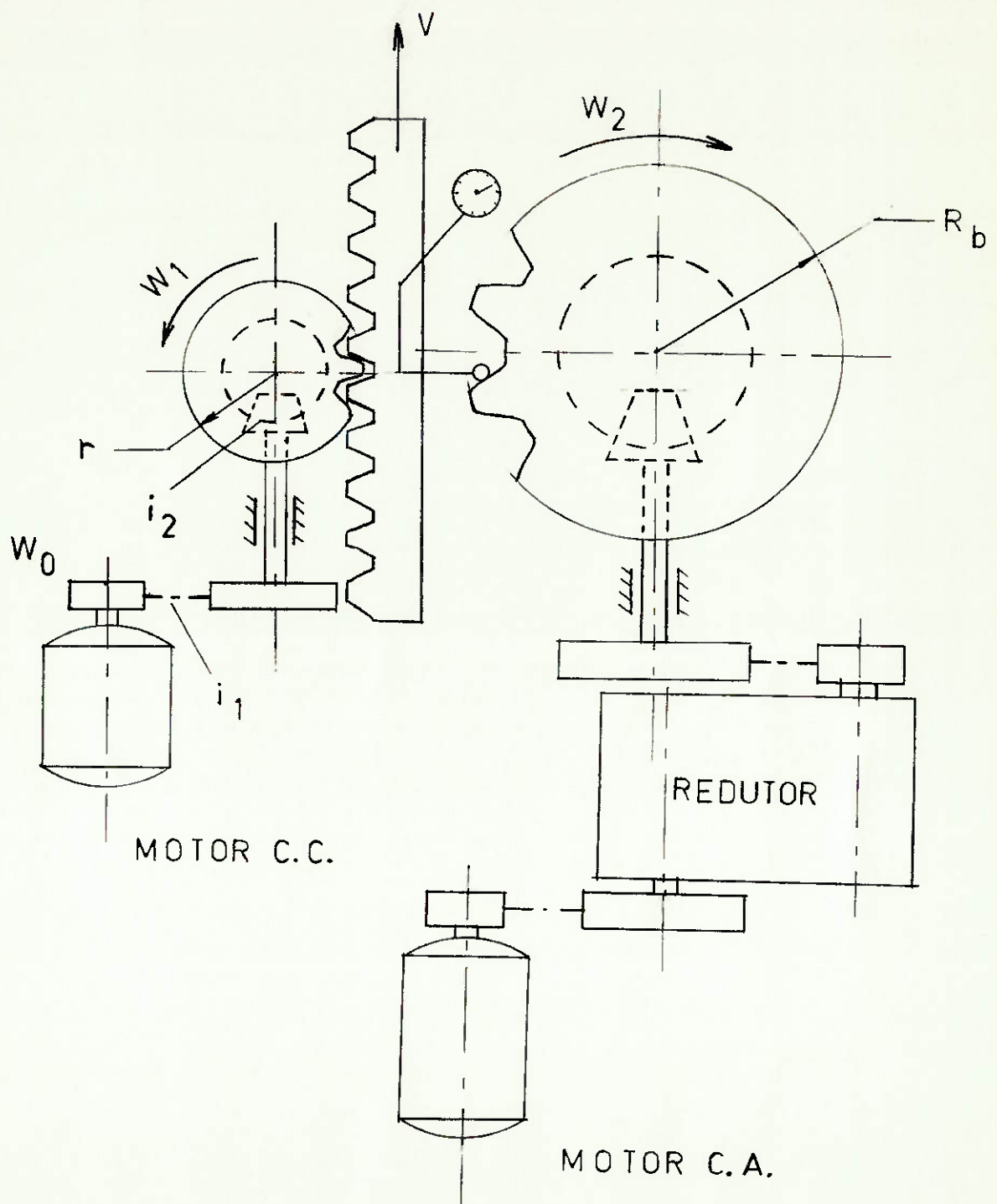
Inicialmente vamos estudar o princípio da geração do perfil de evolvente.

Seja uma reta qualquer rolando sem escorregar sobre uma circunferência de raio igual ao raio de base da engrenagem, como esquematizado na figura.



Considerando um ponto fixo P da reta, observamos que este descreve uma trajetória curvilínea à medida que a reta se movimenta. A este tipo de curva dá-se o nome de **EVOLVENTE DO CÍRCULO**, sendo que é função somente do raio do círculo correspondente que, no caso, é o raio de base da engrenagem.

Pode-se esquematizar um dispositivo que permita controlar os flancos dos dentes de uma engrenagem, sendo que estes possuem perfil de **EVOLVENTE**.



No esquema proposto, a ponta do apalpador caracteriza um ponto fixo de uma reta que, no caso, é representada por uma cremalheira.

O movimento de translação (com velocidade V) da cremalheira, juntamente com o movimento de rotação (com velocidade W_2) da engrenagem a ser testada (raio de base R_b), caracterizam o movimento de uma reta que rola sem escorregar sobre uma circunferência, desde que

$$\boxed{V = W_2 \times R_b} \quad .$$

Satisfeita esta condição, teremos a ponta do apalpador descrevendo uma EVOLVENTE em relação à engrenagem. No caso, esta EVOLVENTE corresponde ao raio de base R_b da peça.

Pelo esquema apresentado, observa-se que a engrenagem a ser testada possui rotação W_2 constante, pois é acionada por um motor de Corrente Alternada.

A cremalheira, por sua vez, é acionada por um motor de Corrente Contínua, de modo que possa ter sua velocidade ajustada para a condição de

não escorregamento, isto é, $V = W_2 \times R_b$.

Pode-se calcular a rotação W_o do motor C.C. em função do raio de base R_b da engrenagem.

Seja a condição de não escorregamento

$$V = W_2 \times R_b$$

$$\text{mas } V = W_1 \times r$$

$$W_1 \times r = W_2 \times R_b$$

$$W_1 = \frac{W_2 \times R_b}{r}$$

$$\text{mas } W_1 = \frac{W_o}{i_1 \times i_2}$$

$$\frac{W_o}{i_1 \times i_2} = \frac{W_2 \times R_b}{r}$$

$$W_o = W_2 \times \frac{R_b \times i_1 \times i_2}{r}$$

onde :

W_o = rotação do motor C.C. (rd/s)

W_2 = rotação fixa da engrenagem (rd/s)

R_b = raio de base da engrenagem (mm)

r = raio da engrenagem de acionamento da cremalheira (mm)

i_1 = relação de transmissão da correia do motor C.C.

i_2 = relação de transmissão coroa - semfim

Fazendo
$$\frac{W_2 \times i_1 \times i_2}{r} = K,$$

$$W_o = K \times R_b$$

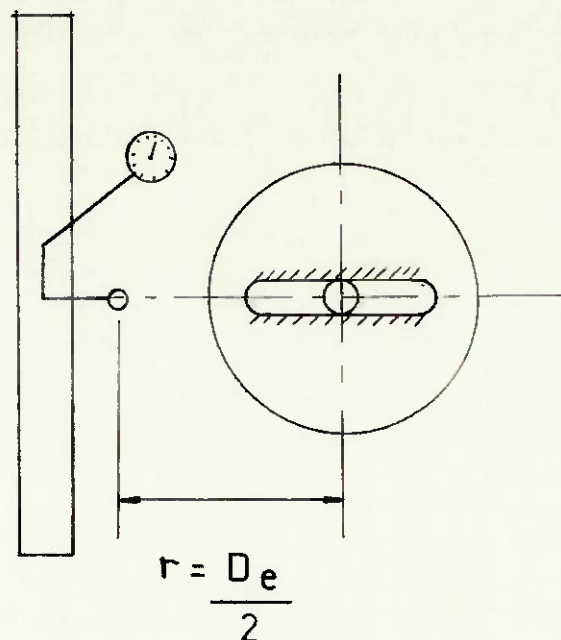
Para se iniciar a inspeção, basta ajustar a rotação W_o do motor C.C. em função do raio de base R_b

da engrenagem.

A tolerância para a forma do perfil, no nosso caso, será de 0,05 mm.

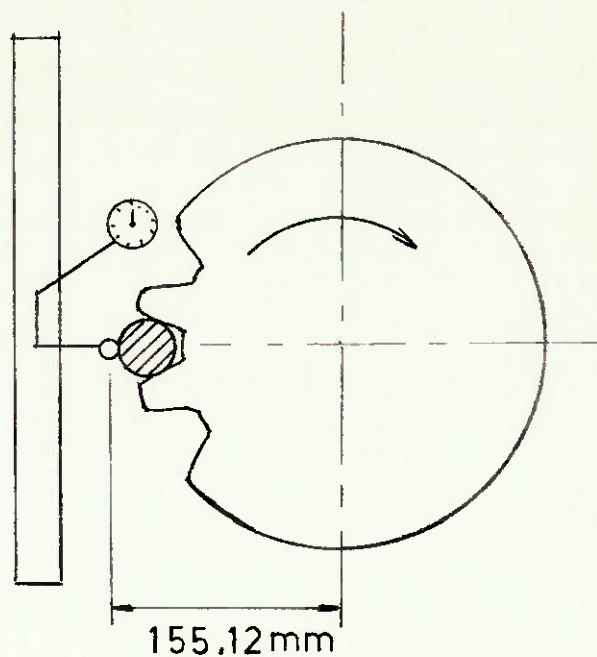
V - 2) CONTROLE DO DIÂMETRO ENTRE ESFERAS
(PINHÃO)

A inspeção do diâmetro entre esferas pode ser feita no aparelho de controle do perfil dos dentes. Como no aparelho existe um relógio-comparador e uma base móvel para a fixação da engrenagem, a distância relativa entre a ponta do apalpador e o centro da engrenagem pode ser ajustada para metade do valor nominal do diâmetro entre esferas, isto é, o raio correspondente ao extremo da esfera de medição.



Ajustada a distância r para o valor $D_e/2$, onde D_e é o diâmetro entre esferas nominal, podemos girar a engrenagem (já com a esfera colocada) e medir o desvio em relação ao valor nominal.

Para o pinhão temos $D_e = 310,23$ mm, de modo
 que $r = \frac{310,23}{2} = 155,12$ mm



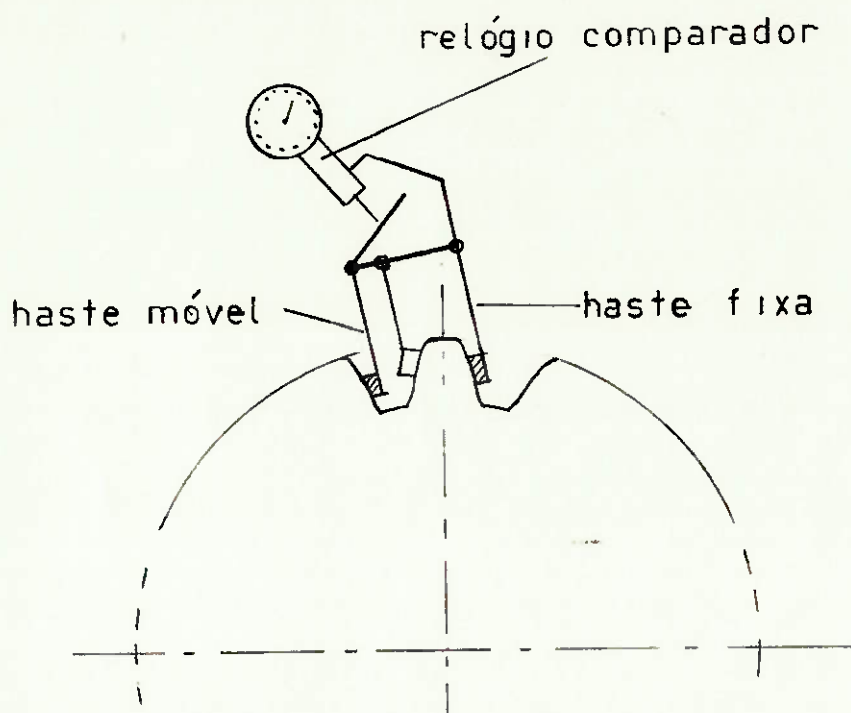
A tolerância para o diâmetro entre esferas é de 0,05 mm, isto é :

$$De = 310,23 \pm 0,05 \text{ mm}$$

Caso o desvio seja maior, a engrenagem estará fora das medidas de projeto.

V - 3) CONTROLE DO PASSO (PINHÃO)

O controle do passo será feito pelo instrumento de medição denominado PASSÔMETRO ,que mede o desvio do passo primitivo em relação ao valor nominal.



O valor nominal do passo com o qual o passômetro deve ser calibrado vale :

$$P_n = M_n \times \pi = 9,00 \times \pi = 28,27 \text{ mm}$$

A tolerância para a medida do passo é de 0,02 mm e a medição será feita em três pontos ao longo dos flancos dos dentes.

VI - ESPECIFICAÇÃO DO MATERIAL DA ENGRENAGEM
MOVIDA

O material da engrenagem movida é o Ferro Fundido Nodular, e deve ser fornecido dentro das seguintes especificações :

VI - 1) MATERIAL

Ferro Fundido Nodular DIN GGG-70

-Limite de Resistência à Tração = 70 kgf / mm²

-Limite de Escoamento = 50 kgf / mm²

- Alongamento = 2 %
- Faixa de Dureza HB 30
(Dureza Brinell 230 - 290 kgf / mm²)

VI - 2) FUNDIÇÃO

Não é permitida a inclusão de elementos de resfriamento na peça.

VI - 3) TRATAMENTO TÉRMICO

A peça deve ser recozida para alívio das tensões.

VI - 4) ACABAMENTO

Não é permitida qualquer correção de falhas na peça com solda.

VI - 5) CORPO DE PROVA

Corpo de prova em apenso , situado em local definido pelo fundidor.

VI - 6) CERTIFICADO DE ANÁLISE QUÍMICA

A análise química deve apresentar a seguinte composição :

C : max. 4,00 %

Mn : 0,25 - 0,50 %

P : max. 0,10 %

S : max. 0,01 %

Si : 1,70 - 2,80 %

Ni : 1,00 - 3,00 %

Cu : 1,50 %

Cr : 0,30 %

Mo : 0,30 %

Sn : 0,10 %

VI - 7) CERTIFICADO DE ENSAIO DESTRUTIVO

O material deve ter seus Limites de Resistência Limite de Escoamento e Alongamento determinados através de ensaio destrutivo.

VII - INSPEÇÃO DO BLANCK - ENGRENAGEM MOVIDA

Desde que o material é fornecido dentro das especificações formuladas, devemos apenas inspecionar a dureza do blanck. Já vimos que o Ferro Fundido DIN GGG - 70 deve estar situado na faixa de dureza HB 30, ou seja, entre os valores de dureza Brinell 230 e 290 kgf / mm².

$$HB = \frac{2 P}{D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (kgf/mm^2)$$

Sejam $P = 3000 \text{ kgf}$

$$D = 10 \text{ mm}$$

Na medição do diâmetro da calota esférica imprimida no Blanck, tiramos:

$$d = 6,30 \text{ mm}$$

$$HB = \frac{2 \times 3000}{10 \left(10 - \sqrt{10^2 - 6,3^2} \right)}$$

$$HB = 269 \text{ kgf} / \text{mm}^2$$

Visto que o material se situa na faixa de dureza HB 30 , podemos considerá-lo dentro das especificações.

VIII - CONTROLE DURANTE A USINAGEM DOS DENTES (ENGRENAGEM MOVIDA)

A exemplo do pinhão, a engrena-

gem movida terá sua medida W verificada durante a usinagem dos dentes. O valor nominal é :

$$W_o = 373,81 \text{ mm} \quad \text{para } n = 14 \text{ dentes}$$

O processo de corte dos dentes consistirá de dois passes de desbaste e um de acabamento.

Como o passe de acabamento necessita de sobre-metal, teremos :

$$W'o = W_o + s$$

onde $s = \text{sobremetal} = 2 \text{ mm}$

$$W'o = 373,81 + 2,00$$

$$W'o = 375,81 \text{ mm}$$

- 1ª medição de W

Medimos $W = 382,30 \text{ mm}$ com o micrômetro de pratos.

$$\Delta W = W - W'o = 382,30 - 375,81$$

$$\Delta W = 6,49 \text{ mm}$$

O avanço a ser dado para o segundo passe é :

$$a = \frac{\Delta W}{2 \operatorname{tg} \gamma} = \frac{6,49}{2 \times \operatorname{tg} 20^\circ}$$

$$a = 8,92 \text{ mm}$$

- 2ª medição de W

$$\text{Medimos } W = 375,90 \text{ mm}$$

Como o valor medido é próximo de W_o , podemos calcular o avanço a ser dado para o passe de acabamento.

$$\Delta W = W - W_o$$

$$\Delta W = 375,90 - 373,81$$

$$\Delta W = 2,09 \text{ mm} = \text{sobremetal a ser removido}$$

no passe de acabamento

$$a = \frac{\Delta W}{2 \operatorname{tg} \varphi} = \frac{2,09}{2 \times \operatorname{tg} 20^\circ}$$

$$a = 2,87 \text{ mm}$$

- 3ª medição de W

Medimos $W = 373,80 \text{ mm}$

Admitindo uma tolerância de $0,05 \text{ mm}$ para o valor nominal, teremos :

$$W_o = 373,81 \pm 0,05 \text{ mm}$$

Como o valor medido se encontra dentro da tolerância estabelecida, podemos aceitar a geometria dos dentes da engrenagem como sendo a especificada no projeto.

IX - CONTROLE GEOMÉTRICO DA PEÇA ACABADA
(ENGRENAGEM MOVIDA)

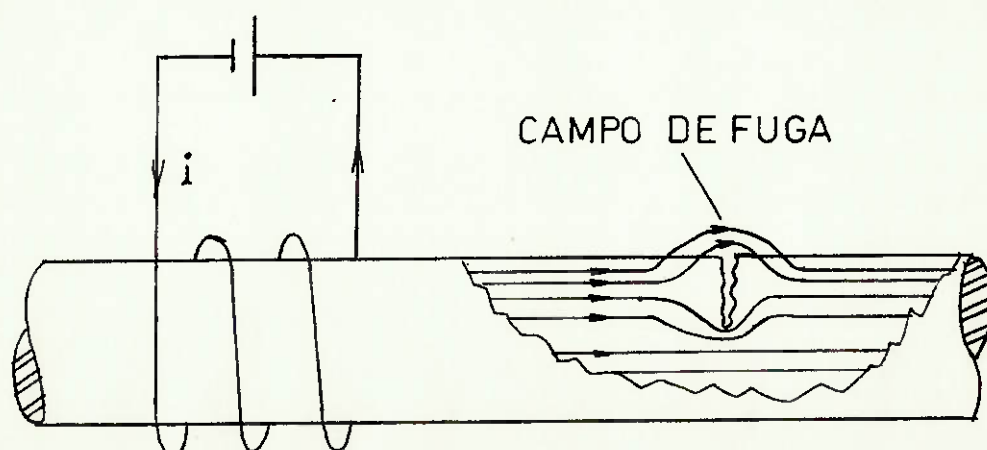
O controle geométrico da engrenagem movida se dará de modo semelhante ao pinhão, ou seja, serão inspecionados o perfil dos dentes, o diâmetro entre esferas calibradas e o passo primitivo. Os valores nominais e as tolerâncias são os seguintes:

- Tolerância para a forma do perfil dos dentes=
= 0,05 mm
- Diâmetro entre esferas nominal
 $De = 1135,19 \pm 0,05 \text{ mm}$
- Passo primitivo nominal
 $Pn = 28,27 \pm 0,02 \text{ mm}$

X - INSPEÇÃO DA SUPERFÍCIE DA ENGRENAGEM

Para a detecção de possíveis falhas superficiais e sub-superficiais na engrenagem, vamos nos utilizar do MÉTODO MAGNÉTICO de ensaio.

Este tipo de inspeção consiste na aplicação de uma corrente elétrica à peça, de modo que um campo magnético seja gerado na mesma. Caso exista uma descontinuidade do material na superfície da peça, o campo sofrerá um desvio, e uma parte deste passará por fora da peça (campo de fuga).



Este campo de fuga pode ser detectado por partículas magnéticas espalhadas sobre a peça.

No local da descontinuidade, haverá uma aglomeração de partículas, desde que a peça esteja magnetizada.

No caso da engrenagem, o detector será o pó de $\text{Fe}_3 \text{O}_4$, tendo como veículo de suspensão o óleo. Como o ensaio detecta apenas os defeitos com área normal ao campo magnético, iremos aplicar dois tipos de magnetização à peça :
a LONGITUDINAL e a CIRCULAR .

X - 1) MAGNETIZAÇÃO LONGITUDINAL

Uma das maneiras de se obter um campo magnético longitudinal é através de bobinas enroladas sobre a peça. A corrente de alimentação , para este método, pode ser calculada pela expressão:

$$i \times n = \frac{45000}{l / d}$$

onde i = corrente elétrica (A)

n = numero de espiras

l = comprimento da peça (mm)

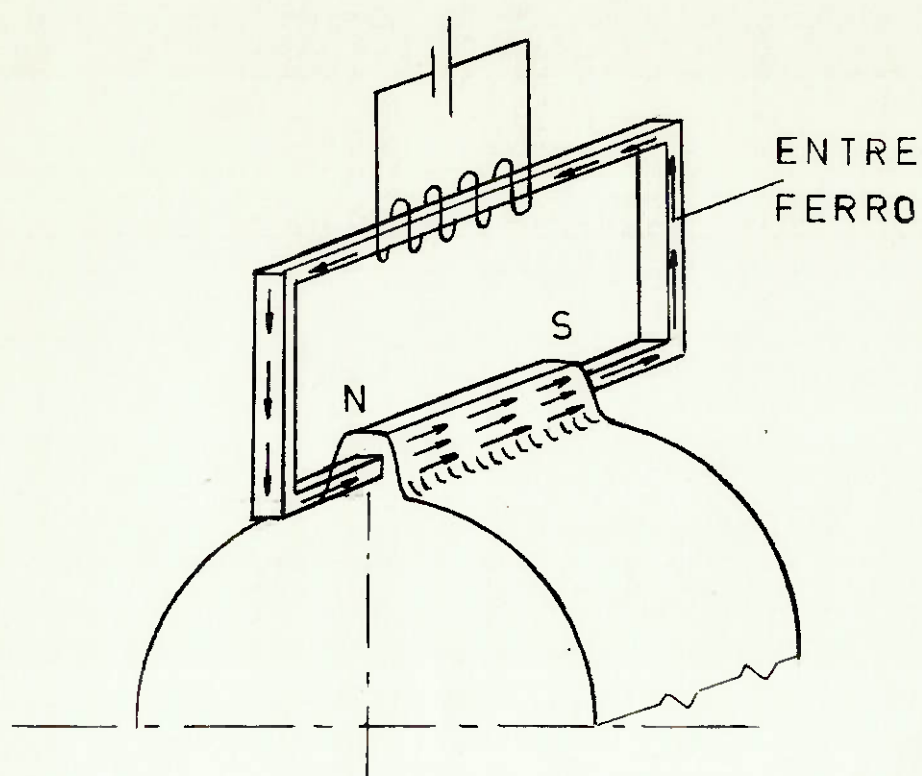
d = diâmetro da peça (mm)

Esta expressão só é válida quando $l / d > 2$

Mas no caso da engrenagem, além de termos uma superfície irregular, a relação l / d vale $150 \text{ mm} / 1097 \text{ mm} = 0,14 < 2$.

Deste modo , é conveniente utilizarmos outro método para gerarmos um campo longitudinal.

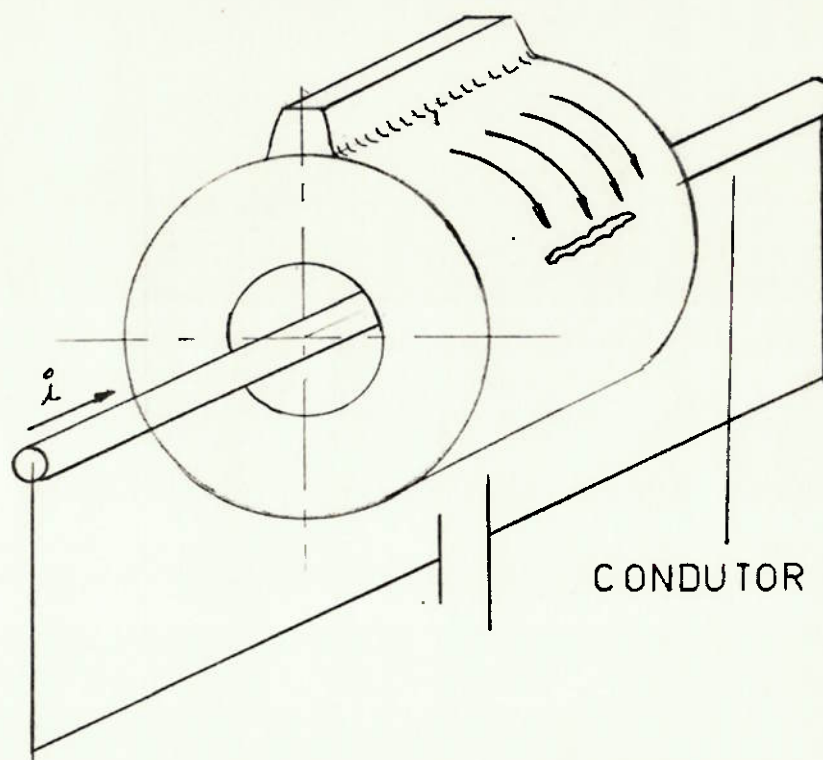
Este método pode ser o da MAGNETIZAÇÃO POLAR ,
ou MAGNETIZAÇÃO POR ENTRE - FERRO.



Neste método, a peça faz parte de um circuito magnético fechado, passando a ser um segmento deste circuito. A inspeção deve percorrer todo o perímetro da engrenagem.

X - 2) MAGNETIZAÇÃO CIRCULAR

Para esta inspeção vamos passar um condutor pelo interior da engrenagem.



Quando percorrido por uma corrente, o condutor irá produzir um campo magnético circular na engrenagem, de modo que as falhas superficiais

na direção axial possam ser detectadas.

Seguindo a norma ASTM E - 138 - 63 , vamos aplicar uma corrente de 60 A / cm de diâmetro .

Como a engrenagem possui 110 cm de diâmetro, temos:

$$i = 60 \text{ A / cm} \times 110 \text{ cm} = 6600 \text{ A} ,$$

que é a corrente que irá percorrer o condutor neste ensaio.

X - 3) CRITÉRIOS DE ACEITAÇÃO

A aceitação ou não dos defeitos detectados irá depender de sua localização na peça , sendo que os casos críticos são aqueles em que a direção

do defeito for radial no corpo da engrenagem e axial no flanco dos dentes.

Em qualquer um dos casos, o comprimento da trinca não deve ultrapassar a 5 mm .

Eventualmente, no caso de trincas acentuadas , pode-se furar as extremidades do defeito de modo que o mesmo não se expanda.

XI - MONTAGEM

Finalmente, o pinhão e a engrenagem motida seguirão para o almoxarifado, onde aguardarão a ordem de montagem. Se uma das peças for rejeitada em algum dos testes ou ensaios elaborados, será refugada ou retrabalhada, dependendo do caso, sendo que as tolerâncias e os critérios de aceitação deverão ser sempre respeitados.

C O N C L U S ã O

Os métodos de controle apresentados neste trabalho foram elaborados para o caso específico de mecanismo de acionamento de uma prensa de duplo efeito, mas podem ser adaptados em outras aplicações de engrenagens, desde que se leve em conta o tipo de solicitação.

Alguns métodos, inclusive, podem ser aplicados em outros tipos de peças com configuração semelhante, especialmente os métodos de ensaio não destrutivo.

Todos os procedimentos descritos no trabalho foram elaborados de modo que as engrenagens atingissem um certo grau de qualidade exigido atualmente, tanto no aspecto dimensional como no dos materiais.

B I B L I O G R A F I A

- Stipkovic Fº , Marco

" ENGRENAGENS : GEOMETRIA, DIMENSIONAMENTO, CON-
TROLE, ENSAIOS " - 2ª Edição

Rio de Janeiro , Guanabara Dois , 1983

- Dudley , Darle W.

" PRACTICAL GEAR DESIGN "

New York , Mc Graw , 1954

- Chiaverini , Vicente

" AÇOS E FERROS FUNDIDOS " - 4ª Edição

São Paulo , A.B.M. , 1977

- Bresciani Fº , Ettore

" PROPRIEDADES E ENSAIOS INDUSTRIAIS DOS
MATERIAIS "

São Paulo , D.L.P.-Grêmio Politécnico , 1968

- Paula Leite , P. G. de

" CURSO DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS DOS METAIS "

São Paulo , A.B.M. , 1966

- Nepomuceno , Lauro Xavier

" TECNOLOGIA ULTRA-SÔNICA "

São Paulo , Edgar Blucher , 1980

- Mc Gonnagle , Warren J.

" NONDESTRUCTIVE TESTING " - 2ª Edição

New York , Gordon and Breach , 1961