

## Exemplo 14-5 no SI

Um pinhão cilíndrico helicoidal com 17 dentes, ângulo de pressão de 20 graus, com um ângulo de hélice de 30 graus, roda a 1800 rpm e transmite 3 kW a uma engrenagem de disco helicoidal de 52 dentes. O módulo normal é 2,5 mm, a largura de face é 38 mm e o padrão de qualidade é 6. As engrenagens são montadas entre mancais imediatamente adjacentes. O pinhão e a coroa são fabricados em aço endurecido por completo, com dureza superficial e de núcleo de 240 Brinell no pinhão e 200 Brinell na coroa. A transmissão é suave, conectando um motor elétrico a uma bomba centrífuga. Considere uma vida para o pinhão de  $10^8$  ciclos e confiabilidade de 0,90. Utilize as curvas superiores nas Figuras 14-14 e 14-15.

(a) Encontre o fator de segurança das engrenagens em flexão.  
 (b) Encontre o fator de segurança das engrenagens com relação ao desgaste.  
 (c) Examinando os fatores de segurança, identifique o risco para cada engrenagem e para o engrenamento.

número de dentes do pinhão:	$N_P := 17$	
ângulo de pressão normal:	$\phi_n := 20 \text{ deg}$	
ângulo e hélice:	$\psi := 30 \text{ deg}$	
rotação do pinhão:	$n_P := 1800 \text{ rpm}$	
potência:	$H := 3 \text{ kW}$	
número de dentes da coroa:	$N_G := 52$	
módulo normal:	$m_n := 2,5 \text{ mm}$	
largura:	$b := 38 \text{ mm}$	
índice de qualidade:	$Q_v := 6$	
montagem := "entre mancais imediatamente adjacentes"		
material_pinhao := "aço Grau 1"		
dureza superficial do pinhão:	$HB_P := 240$	
	tratamento_pinhao := "totalmente endurecido"	
material_coroa := "aço Grau 1"		
dureza superficial da coroa:	$HB_G := 200$	
	tratamento_coroa := "totalmente endurecido"	
coeficiente de Poisson:	$\nu_P := 0,3$	$\nu_G := 0,3$
módulo de elasticidade:	$E_P := 207 \text{ GPa}$	$E_G := 207 \text{ GPa}$
fonte_de_potencia := "suave"		
maquina_acionada := "uniforme"		
vida para o pinhão:	$N_{CP} := 10^8$	
confiabilidade:	$R := 0,9$	
fator de ciclagem para resistência à fleão:		$Y_N = 1,3558 \cdot N^{-0,0178}$
fator de ciclagem para resistência ao crateramento:		$Z_N = 1,4488 \cdot N^{-0,023}$
coroamento := "sem coroamento"		
construcao := "unidade redutora comercial fechada"		

**CÁLCULO DA TENSÃO DE FLEXÃO DE TRABALHO:**

módulo transversal:

$$m_t := \frac{m_n}{\cos(\psi)} = 2,887 \text{ mm}$$

diâmetros primitivos:

$$d_p := m_t \cdot N_p = 49,07 \text{ mm}$$

$$d_G := m_t \cdot N_G = 150,11 \text{ mm}$$

velocidade tangencial:

$$V := \frac{d_p}{2} \cdot n_p = 4,63 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

força tangencial:

$$W_t := \frac{H}{V} = 648,62 \text{ N}$$

fator de sobrecarga (tabela):

fonte\_de\_potencia = "suave"

 $K_o := 1$ 

maquina\_acionada = "uniforme"

fator dinâmico (eq. 14-27):

$$B := 0,25 \cdot (12 - Q_v)^{\frac{2}{3}} = 0,8255$$

$$A := 50 + 56 \cdot (1 - B) = 59,77$$

$$K_v := \left( \frac{A + \sqrt{\frac{V}{\frac{ft}{\min}}}}{A} \right)^B = 1,4012$$

fator de tamanho: Para engrenagens métricas padronizadas

 $K_{SP} := 1$  $K_{SG} := 1$ 

fator de distribuição de carga:

fator de correção de carga (Eq. 14-31):

coroamento = "sem coroamento"

 $C_{mc} := 1$ 

fator de proporção do pinhão (Eq. 14-32):

$$b = 38 \text{ mm} \quad \frac{b}{d_p} = 0,77 \quad C_{pf} := \frac{b}{10 \cdot d_p} - 0,0375 + 4,92 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{b}{\text{mm}} = 0,0586$$

modificador de proporção do pinhão (Eq. 41-33):

montagem = "entre mancais imediatamente adjacentes"

 $C_{pm} := 1$ 

fator de alinhamento (Eq. 14-34):

construcao = "unidade redutora comercial fechada"

 $A := 0,127$  $B := 0,0158$  $C := -0,930 \cdot 10^{-4}$ 

$$C_{ma} := A + B \cdot \frac{b}{\text{in}} + C \cdot \left( \frac{b}{\text{in}} \right)^2 = 0,1504$$

fator de correção do alinhamento (Eq. 14-35):

 $C_e := 1$  (adotado)

fator de distribuição de carga (Eq. 14-30)

$$K_{HP} := 1 + C_{mc} \cdot (C_{pf} \cdot C_{pm} + C_{ma} \cdot C_e) = 1,2091$$

$$K_{HG} := 1 + C_{mc} \cdot (C_{pf} \cdot C_{pm} + C_{ma} \cdot C_e) = 1,2091$$

fator de espessura do aro (Eq. 14-40):

$$K_B := 1 \quad (\text{considerando engrenagem sem aro})$$

fator geométrico:

fator geométrico básico (Fig. 14-7):  $\psi = 30 \text{ deg}$   $N_P = 17$   $Y'_{JP} := 0,45$

$N_G = 52$   $Y'_{JG} := 0,54$

fator multiplicador (Fig. 14-8):  $\psi = 30 \text{ deg}$   $N_P = 17$   $FM_P := 0,94$

$N_G = 52$   $FM_G := 0,98$

fator geométrico corrigido:  $Y_{JP} := Y'_{JP} \cdot FM_P = 0,423$

$Y_{JG} := Y'_{JG} \cdot FM_G = 0,529$

tensão de flexão (Eq. 14-15)

$$\sigma_{fP} := W_t \cdot K_o \cdot K_v \cdot K_{sP} \cdot \frac{1}{b \cdot m_t} \cdot \frac{K_{HP} \cdot K_B}{Y_{JP}} = 23,68 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{fG} := W_t \cdot K_o \cdot K_v \cdot K_{sG} \cdot \frac{1}{b \cdot m_t} \cdot \frac{K_{HG} \cdot K_B}{Y_{JG}} = 18,93 \text{ MPa}$$

#### CÁLCULO DA TENSÃO DE FLEXÃO ADMISSÍVEL:

resistência à flexão (Fig. 14-2):

*material\_pinhao* = "aço Grau 1"

*tratamento\_pinhao* = "totalmente endurecido"

$HB_P = 240$   $S_{tP} := (0,533 \cdot HB_P + 88,3) \text{ MPa} = 216,22 \text{ MPa}$

*material\_coroa* = "aço Grau 1"

*tratamento\_coroa* = "totalmente endurecido"

$HB_G = 200$   $S_{tG} := (0,533 \cdot HB_G + 88,3) \text{ MPa} = 194,9 \text{ MPa}$

fator de cilclagem (Fig. 14-14):

$N_{CP} = 1 \cdot 10^8$   $Y_{NP} := 1,3558 \cdot N_{CP}^{-0,0178} = 0,977$

$N_{CG} := N_{CP} \cdot \frac{N_P}{N_G} = 3,27 \cdot 10^7$   $Y_{NG} := 1,3558 \cdot N_{CG}^{-0,0178} = 0,996$

fator de temperatura (considerando  $T < 120$  graus):

$Y_\theta := 1$

fator de confiabilidade (Tab. 14-10):

$R = 0,9$   $Y_Z := 0,85$

tensão de flexão admissível (Eq. 14-17):

$$\sigma_{fadmP} := S_{tP} \cdot \frac{Y_{NP}}{Y_\theta \cdot Y_Z} = 248,47 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{fadmG} := S_{tG} \cdot \frac{Y_{NG}}{Y_\theta \cdot Y_Z} = 228,47 \text{ MPa}$$

## CÁLCULO DO FATOR DE SEGURANÇA PARA FLEXÃO

fator de segurança para flexão:

$$S_{FP} := \frac{\sigma_{fadmP}}{\sigma_{fP}} = 10,49$$

$$S_{FG} := \frac{\sigma_{fadmG}}{\sigma_{fG}} = 12,07$$

## CÁLCULO DA TENSÃO DE CONTATO DE TRABALHO

coeficiente elástico (Tab. 14-8 ou Eq. 14-13):

material\_pinhao = "aço Grau 1"

 $\nu_P = 0,3$  $E_P = 207 \text{ GPa}$ 

material\_coroa = "aço Grau 1"

 $\nu_G = 0,3$  $E_G = 207 \text{ GPa}$ 

$$Z_E := \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot \left( \frac{1 - \nu_P^2}{E_P} + \frac{1 - \nu_G^2}{E_G} \right)}} = 190,27 \sqrt{\text{MPa}}$$

fator de condição da superfície: para engrenagens normais  $Z_R := 1$ 

fator geométrico para desgaste (Eq. 14-23):

ângulo de pressão transversal:

$$\varphi_t := \text{atan} \left( \frac{\tan(\varphi_n)}{\cos(\psi)} \right) = 22,8 \text{ deg}$$

raios primitivos:

$$r_P := \frac{d_P}{2} = 24,54 \text{ mm}$$

$$r_G := \frac{d_G}{2} = 75,06 \text{ mm}$$

adendo:

$$a := m_n = 2,5 \text{ mm}$$

raios das circunferências de base:

$$r_{bP} := r_P \cdot \cos(\varphi_t) = 22,621 \text{ mm}$$

$$r_{bG} := r_G \cdot \cos(\varphi_t) = 69,193 \text{ mm}$$

comprimento de ação transversal (Eq. 14-25):

$$Z := \sqrt{(r_P + a)^2 - r_{bP}^2} + \sqrt{(r_G + a)^2 - r_{bG}^2} - (r_P + r_G) \cdot \sin(\varphi_t) = 11,2535 \text{ mm}$$

passo circular normal:

$$p_n := m_n \cdot \pi = 7,854 \text{ mm}$$

passo normal de base (Eq. 14-24):

$$p_N := p_n \cdot \cos(\varphi_n) = 7,38 \text{ mm}$$

razão de compartilhamento de carga (Eq. 14-21):

$$m_N := \frac{p_N}{0,95 \cdot Z} = 0,69$$

razão de engrenamento:

$$m_G := \frac{N_G}{N_P} = 3,06$$

fator geométrico para desgaste:

$$Z_I := \frac{\cos(\varphi_t) \cdot \sin(\varphi_t)}{2 \cdot m_N} \cdot \frac{m_G}{m_G + 1} = 0,195$$

tensão de contato de trabalho:

$$\sigma_{cP} := Z_E \cdot \sqrt{W_t \cdot K_o \cdot K_v \cdot K_{sP} \cdot \frac{K_{HP}}{d_P \cdot b} \cdot \frac{Z_R}{Z_I}} = 330,79 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cG} := Z_E \cdot \sqrt{W_t \cdot K_o \cdot K_v \cdot K_{sG} \cdot \frac{K_{HG}}{d_G \cdot b} \cdot \frac{Z_R}{Z_I}} = 189,14 \text{ MPa}$$

**CÁLCULO DA TENSÃO DE CONTATO ADMISSÍVEL:**

resistência ao contato (Fig. 14-5):

material\_pinhao = "aço Grau 1"

tratamento\_pinhao = "totalmente endurecido"

 $HB_P = 240$ 

$$S_{cP} := (2,22 \cdot HB_P + 200) \text{ MPa} = 732,8 \text{ MPa}$$

material\_coroa = "aço Grau 1"

tratamento\_coroa = "totalmente endurecido"

 $HB_G = 200$ 

$$S_{cG} := (2,22 \cdot HB_G + 200) \text{ MPa} = 644 \text{ MPa}$$

fator de cilclagem (Fig. 14-15):

$$N_{cP} = 1 \cdot 10^8$$

$$Z_{NP} := 1,4488 \cdot N_{cP}^{-0,023} = 0,948$$

$$N_{cG} := N_{cP} \cdot \frac{N_P}{N_G} = 3,27 \cdot 10^7$$

$$Z_{NG} := 1,4488 \cdot N_{cG}^{-0,023} = 0,973$$

fator de razão de dureza (Eq. 14-36):

pinhão:  $Z_{WP} := 1$

coroa:  $\frac{HB_P}{HB_G} = 1,2$

$$A' := 8,98 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{HB_P}{HB_G} - 8,29 \cdot 10^{-3} = 0,0025$$

$$Z_{WG} := 1 + A' \cdot (m_G - 1) = 1,005$$

tensão de contato admissível:

$$\sigma_{cadmP} := S_{cP} \cdot \frac{Z_{NP} \cdot Z_{WP}}{Y_\theta \cdot Y_Z} = 817,66 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cadmG} := S_{cG} \cdot \frac{Z_{NG} \cdot Z_{WG}}{Y_\theta \cdot Y_Z} = 741,07 \text{ MPa}$$

**CÁLCULO DO FATOR DE SEGURANÇA PARA CONTATO**

fator de segurança para contato:

$$S_{HP} := \frac{\sigma_{cadmP}}{\sigma_{cP}} = 2,47$$

$$S_{HG} := \frac{\sigma_{cadmG}}{\sigma_{cG}} = 3,92$$

$$S_{FP} = 10,49$$

$$S_{HP} = 2,47$$

$$S_{HP}^2 = 6,11$$

$$S_{FG} = 12,07$$

$$S_{HG} = 3,92$$

$$S_{HG}^2 = 15,35$$