

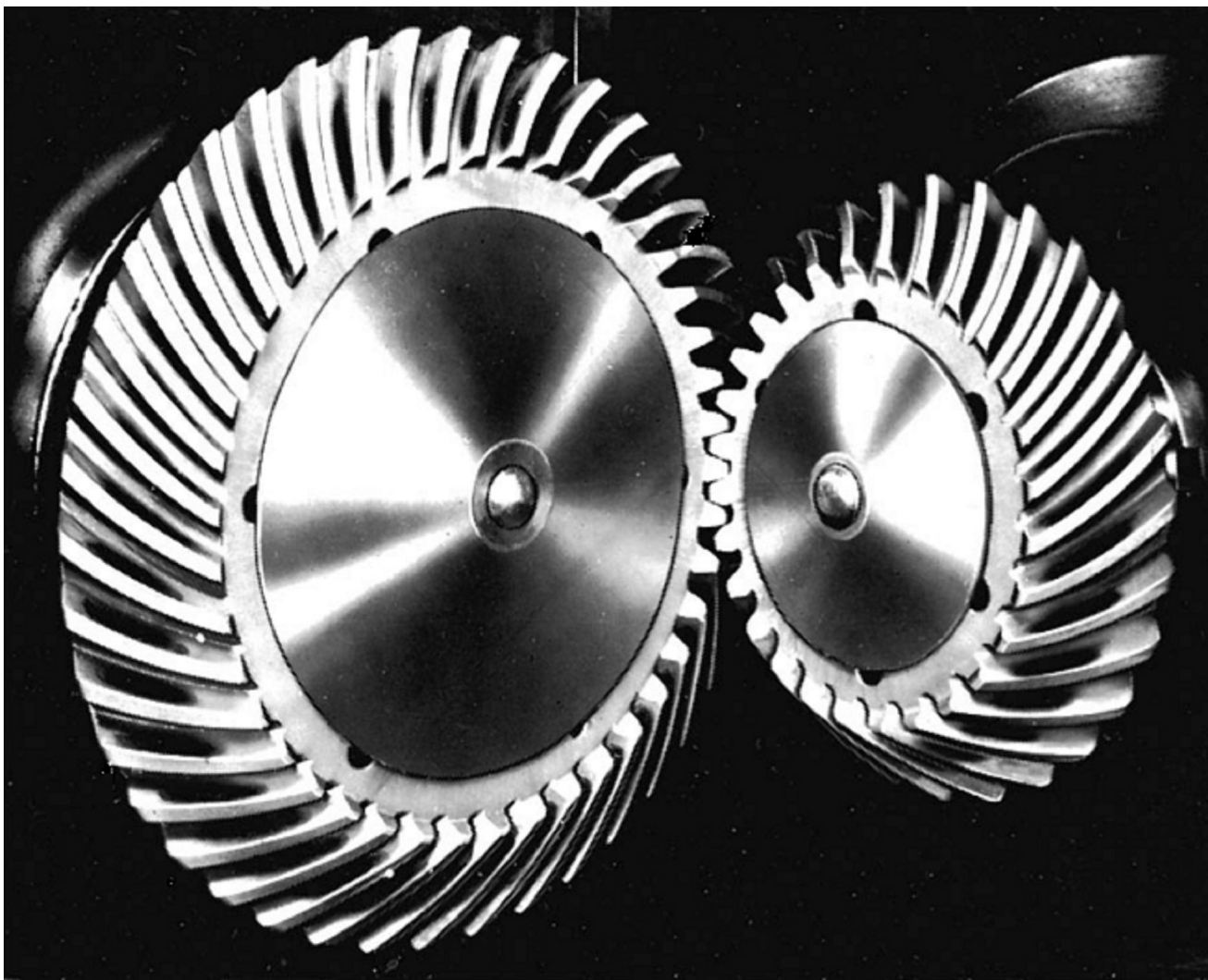
PROJETO DE ENGRENAGENS – CÔNICAS E SEM-FIM

Prof. Alexandre Augusto Pescador Sardá

ENGRENAGENS CILÍNDRICAS

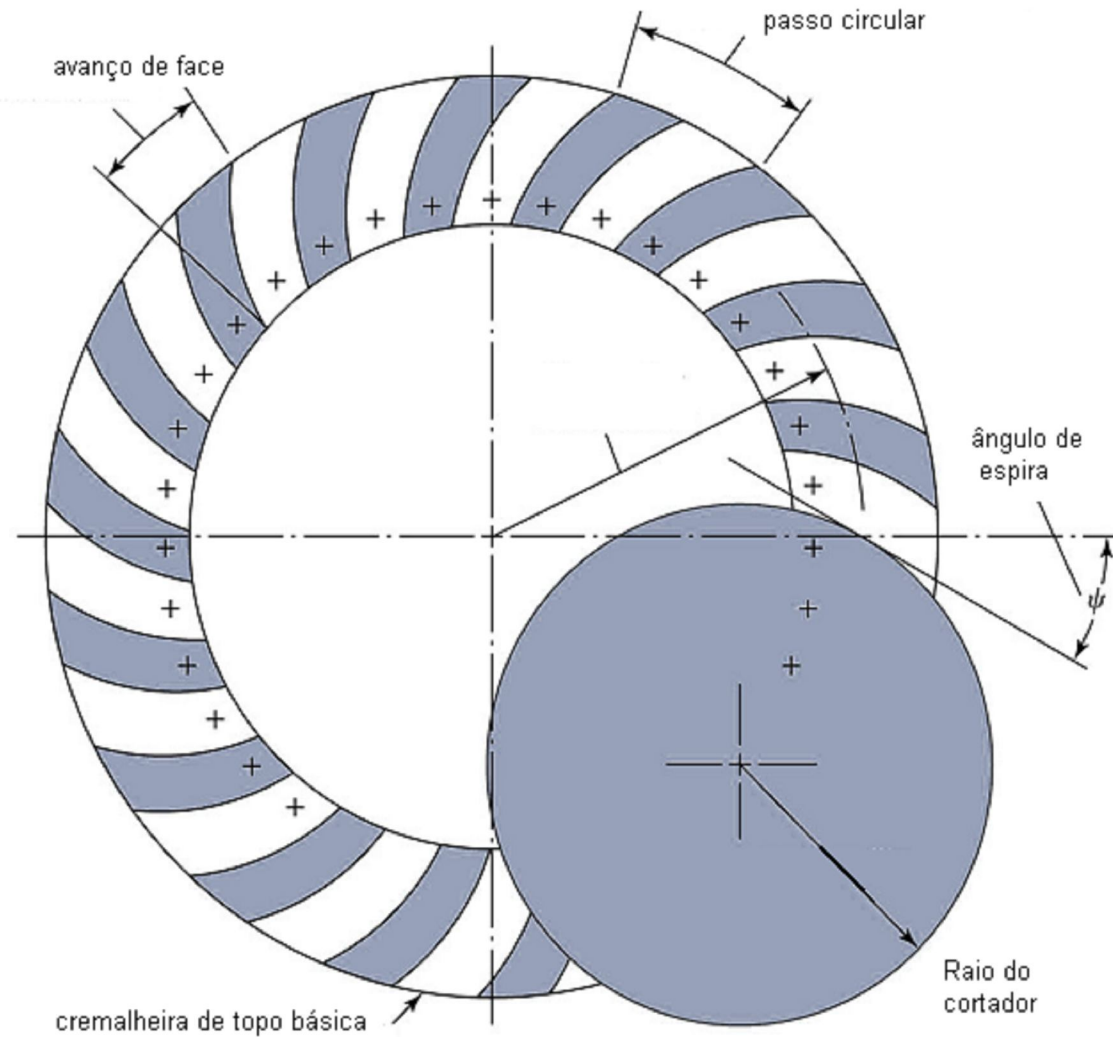
- Engrenagens cônicas de dentes retos;
- Engrenagens cônicas espirais;
- Engrenagens cônicas zero;
- Engrenagens hiperbolóides;
- Engrenagens espiróides.

ENGRENAGENS CILÍNDRICAS



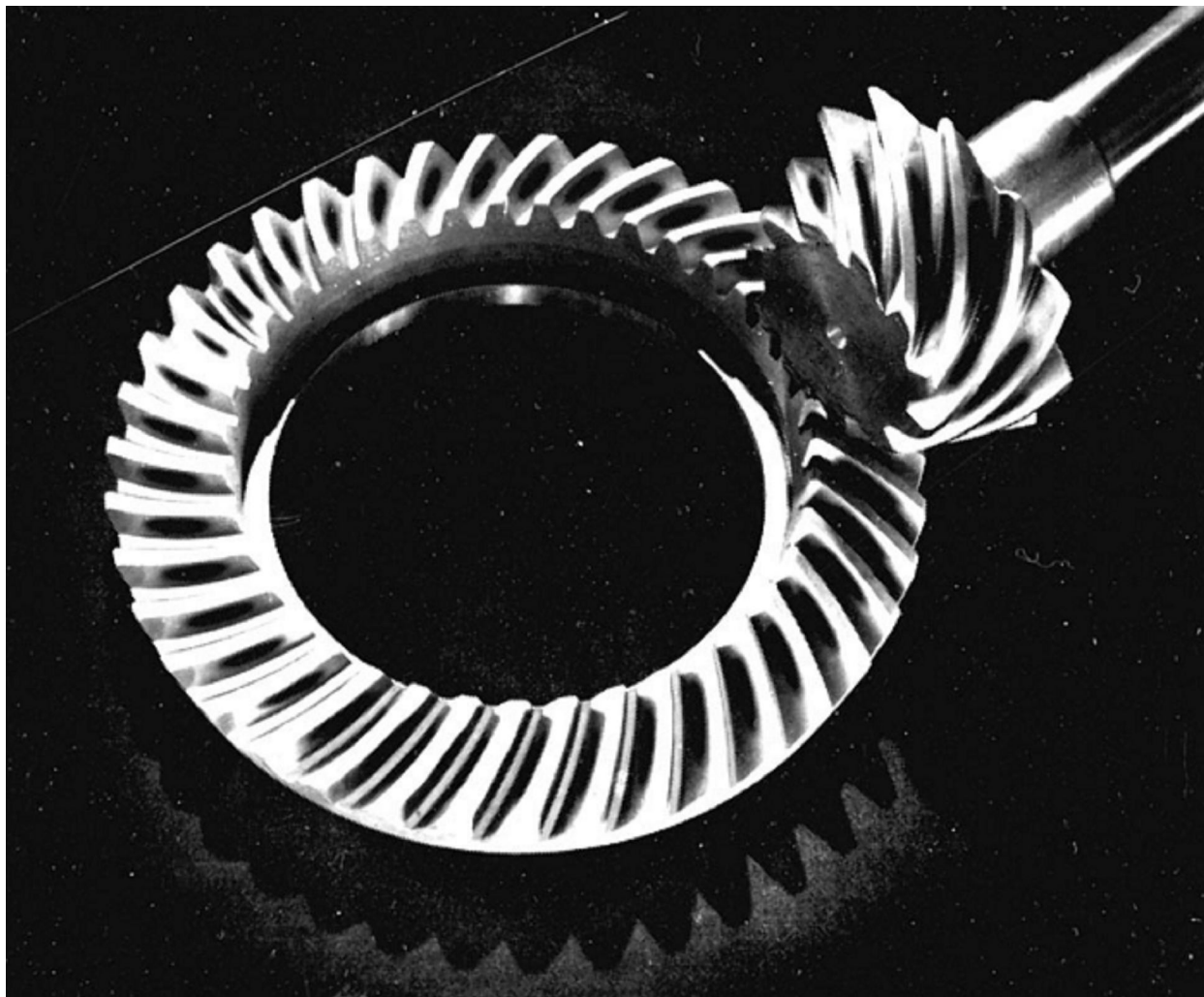
Engrenagens cônicas espirais

ENGRENAGENS CILÍNDRICAS



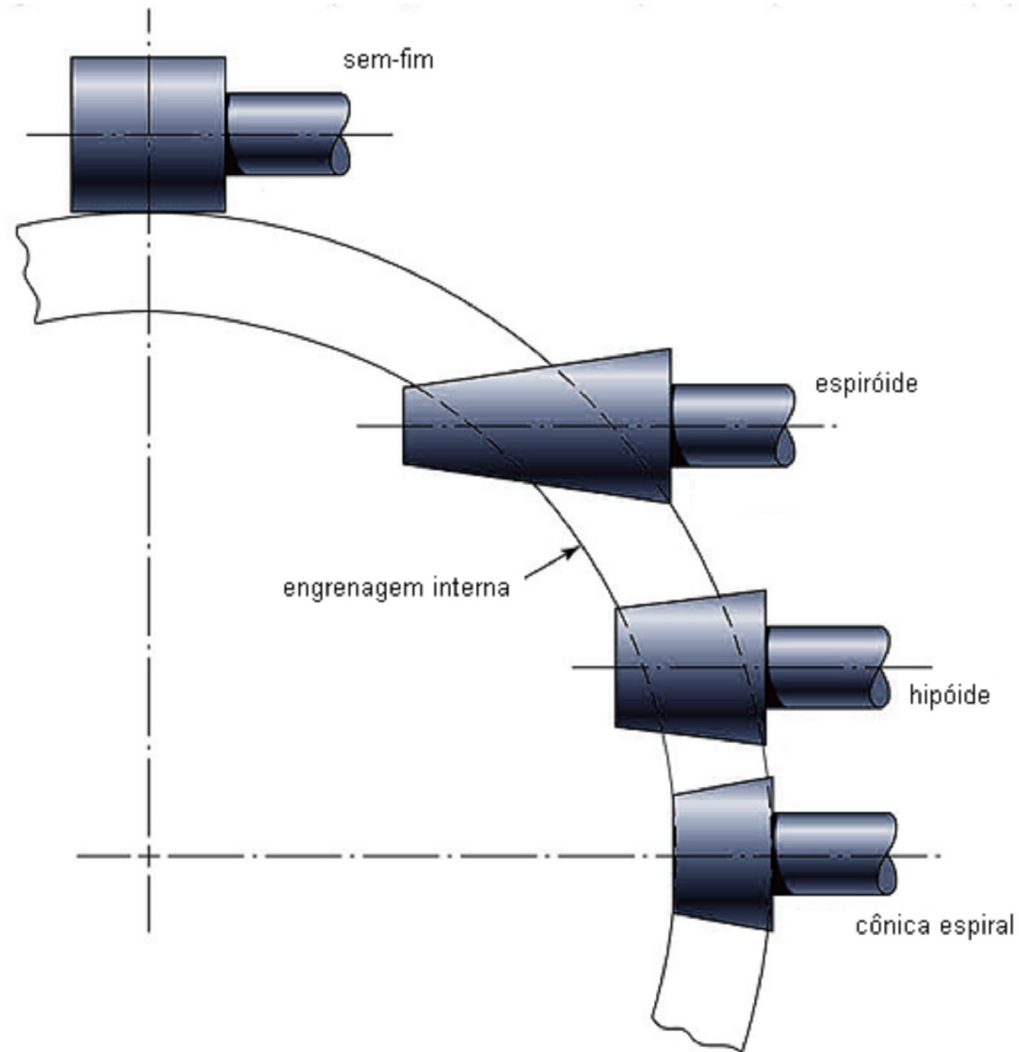
Corte de dentes de engrenagens cônicas espirais sobre a cremalheira de topo básica

ENGRENAGENS CILÍNDRICAS



Engrenagens hiperbolóides

ENGRENAGENS CILÍNDRICAS



Comparação de engrenagens entre eixos cônicos e inversos do tipo cônico

EQUAÇÃO FUNDAMENTAL PARA TENSÃO DE CONTATO

$$\sigma_c = \sigma_H = \begin{cases} C_p \sqrt{\frac{W^t}{F d_p I} K_0 K_v K_m C_s C_{xc}} & \text{Sistema inglês} \\ Z_E \sqrt{\frac{1000 W^t}{b d Z_1} K_A K_v K_{H\beta} Z_x Z_{xc}} & \text{SI} \end{cases}$$

EQUAÇÃO PARA VALOR (RESISTÊNCIA) PERMISSÍVEL DE CONTATO

$$(\sigma_c)_{all} = \frac{S_c C_L C_H}{S_H K_T K_R} \quad \text{Sistema inglês}$$

$$\sigma_{HP} = \frac{\sigma_{H \lim} Z_N Z_W}{S_H K_\theta Y_Z} \quad \text{SI}$$

EQUAÇÃO FUNDAMENTAL PARA TENSÃO DE FLEXÃO

$$S_t = \frac{W^t}{F} P_d K_0 K_v \frac{K_s K_m}{K_x Y_J}$$

Sistema inglês

$$\sigma_F = \frac{1000 W^t}{b} \frac{K_A K_v}{m_{et}} \frac{Y_x K_{H\beta}}{Y_\beta Y_J}$$

SI

EQUAÇÃO PARA TENSÃO DE FLEXÃO PERMISSÍVEL

$$S_{wt} = \frac{S_{at} K_L}{S_F K_T K_R}$$

Sistema inglês

$$\sigma_{FP} = \frac{\sigma_{F \text{ lim}} Y_{NT}}{S_F K_\theta Z_Z}$$

SI

FATORES PARA EQUAÇÃO AGMA

- Fator de sobrecarga K_o (K_A) – Fonte – Shigley pp. 734

	Caráter da carga na máquina acionada			
Caráter do acionador principal	Uniforme	Choques leves	Choques médios	Choques intensos
Uniforme	1,00	1,25	1,50	1,75 ou maior
Choques leves	1,10	1,35	1,60	1,85 ou maior
Choques médios	1,25	1,50	1,75	2,00 ou maior
Choques intensos	1,50	1,75	2,00	2,25 ou maior

- Fator de segurança S_H e S_F : ajustes de resistência

FATORES PARA EQUAÇÃO AGMA

- Fator dinâmico K_v : leva em consideração o efeito da qualidade dos dentes de engrenagem na velocidade e na carga. Número de precisão de transmissão descreve a acurácia com que perfis de dentes são espaçados ao longo do círculo primitivo.

$$K_v = \begin{cases} \left(\frac{A + \sqrt{v_t}}{A} \right)^B \\ \left(\frac{A + \sqrt{200v_{et}}}{A} \right)^B \end{cases}$$

V em m/s

$$v_t = \frac{\pi d_p n_p}{12}$$

V em ft/min

$$v_{et} = 5,236 \cdot 10^{-5} d_1 n_1$$

$$A = 50 + 56(1 - B)$$

$$B = 0,25(12 - Q_v)^{2/3}$$

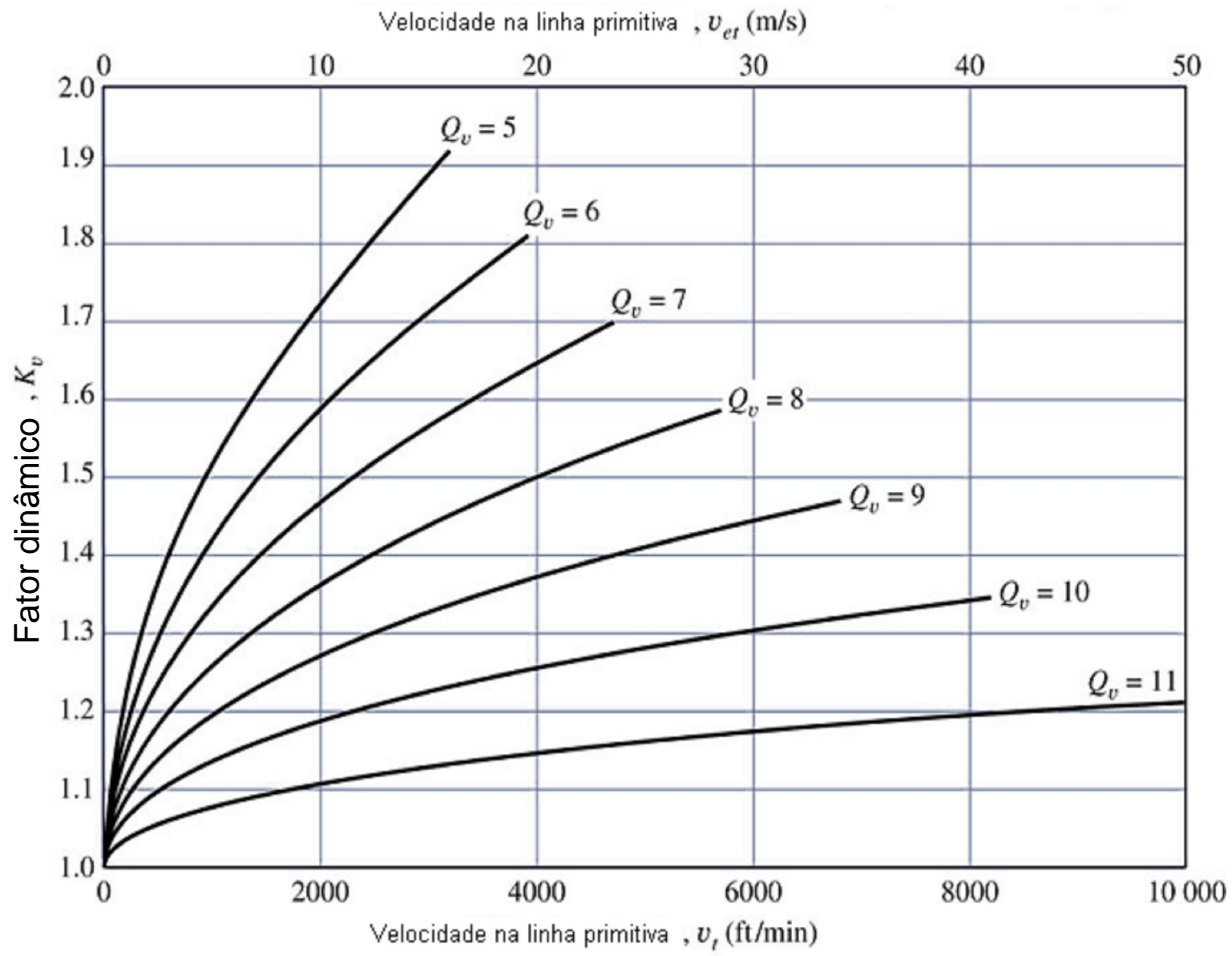
$$v_{t \max} = [A + (Q_v - 3)]^2$$

Sistema inglês

$$v_{te \max} = \frac{[A + (Q_v - 3)]^2}{200}$$

SI

FATORES PARA EQUAÇÃO AGMA



Fator dinâmico K_v

FATORES PARA EQUAÇÃO AGMA

- Fator de tamanho para Resistência à Formação de Cavidades - C_s (Z_x)

$$C_s = \begin{cases} 0,5 & F < 0,5 \text{ in} \\ 0,125F + 0,4375 & 0,5 \leq F \leq 4,5 \text{ in} \\ 1 & F > 4,5 \text{ in} \end{cases}$$

Sistema inglês

$$Z_x = \begin{cases} 0,5 & b < 12,7 \text{ mm} \\ 0,00492b + 0,4375 & 12,7 \leq b \leq 114,3 \text{ mm} \\ 1 & b > 114,3 \text{ mm} \end{cases}$$

SI

FATORES PARA EQUAÇÃO AGMA

- Fator de tamanho para flexão - $K_s (Y_x)$

$$C_s = \begin{cases} 0,4867 + 0,2132/P_d & 0,5 \leq P_d < 16 \text{in}^{-1} \\ 1 & P_d > 16 \text{in}^{-1} \end{cases}$$

Sistema inglês

$$Y_x = \begin{cases} 0,5 & m_{et} < 1,6 \text{mm} \\ 0,4867 + 0,008339 m_{et} & 1,6 \leq m_{et} \leq 50 \text{mm} \end{cases}$$

SI

FATORES PARA EQUAÇÃO AGMA

- Fator de distribuição de carga - K_m ($K_{H\beta}$)

$$K_m = K_{mb} + 0,0036F^2$$

Sistema inglês

$$K_{H\beta} = K_{mb} + 5,6 \cdot 10^{-6} b^2$$

SI

$$K_{mb} = \begin{cases} 1,0 & \text{ambos os membros montados entre mancais} \\ 1,10 & \text{um membro entre mancais} \\ 1,25 & \text{nenhum membro montado entre mancais} \end{cases}$$

FATORES PARA EQUAÇÃO AGMA

- Fator de coroamento para resistência à formação de cavidades - C_{xc} (Z_{xc})

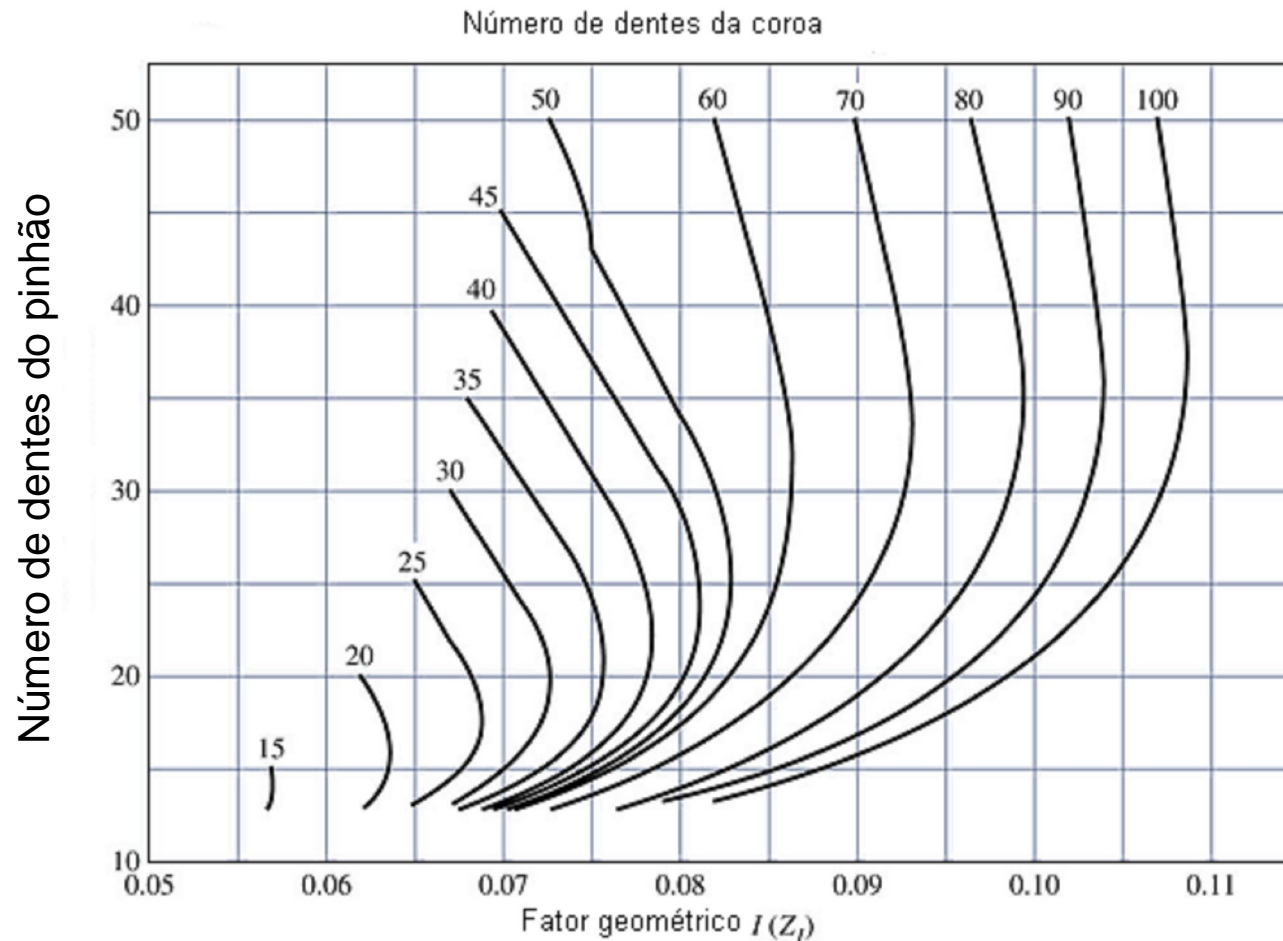
$$C_{xc} = Z_{xc} = \begin{cases} 1,5 & \text{dentes coroados apropriadamente} \\ 2,0 & \text{ou dentes maiores não – coroados} \end{cases}$$

- Fator de Curvatura ao Longo do Comprimento para Resistência à Flexão - K_x (Y_β)

$$K_x = Y_\beta = 1,0 \quad \text{para engrenagens cônicas de dentes retos}$$

FATORES PARA EQUAÇÃO AGMA

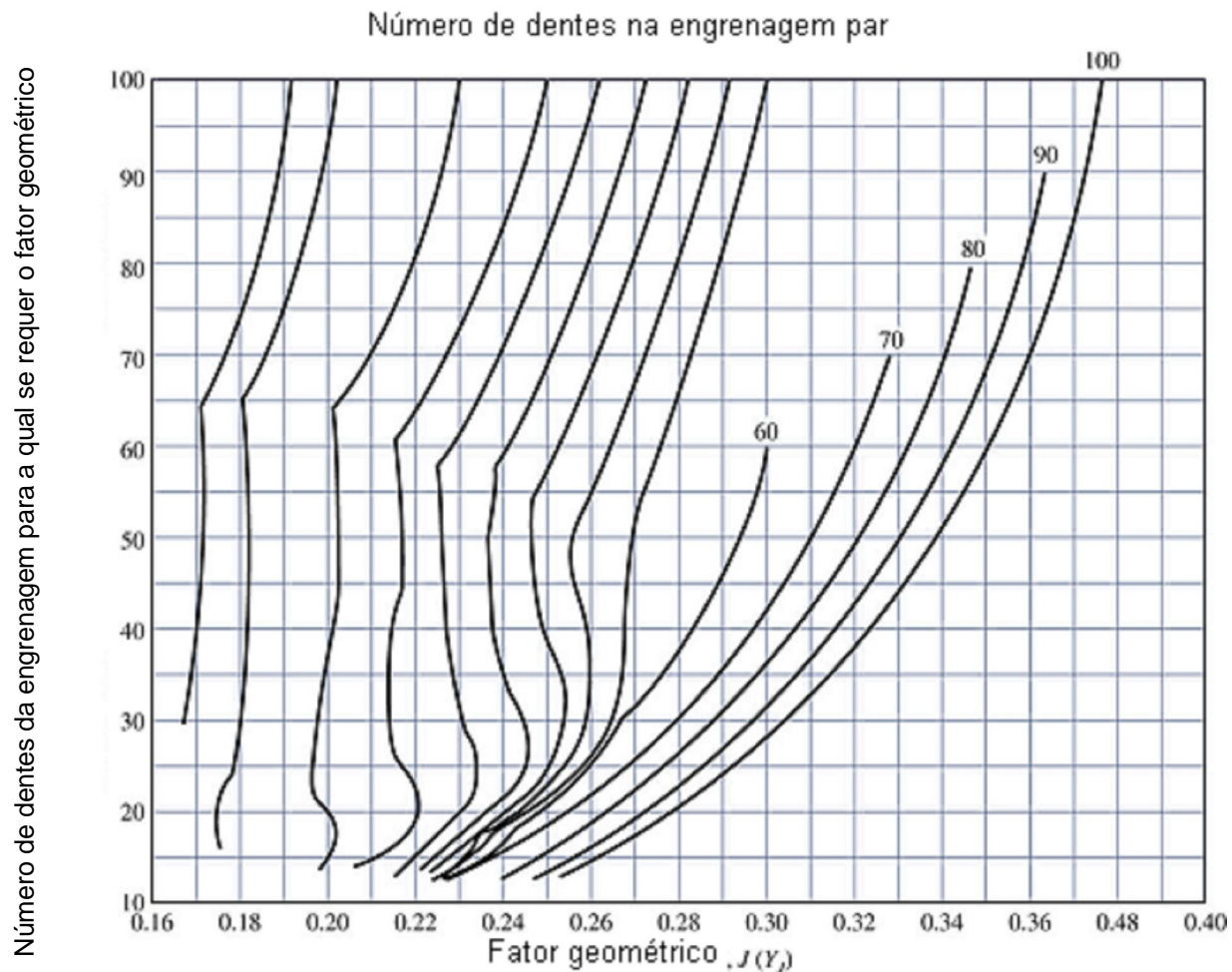
- Fator Geométrico para Resistência à Formação de Cavidades - $I(Z_1)$



Fator de geometria de contato $I(Z_1)$ para engrenagens cônicas de dentes retos coniflex, com um ângulo de pressão normal de 20° e um ângulo entre eixos de 90° (Fonte ANSI/AGMA 2003-B97; Shigley)

FATORES PARA EQUAÇÃO AGMA

- Fator Geométrico para Resistência à Flexão - $J (Y_J)$



Fator de flexão $J(Y_J)$ para engrenagens cônicas de dentes retos coniflex, com um ângulo de pressão normal de 20° e um ângulo entre eixos de 90° (Fonte ANSI/AGMA 2003-B97, Shigley)

FATORES PARA EQUAÇÃO AGMA

- Fator de Ciclagem de Tensão para Resistência à Formação de Cavidades - C_L (Z_{NT})

$$C_L = \begin{cases} 2,0 & 10^3 \leq N_L \leq 10^4 \\ 3,4822N_L^{-0,0602} & 10^4 \leq N_L \leq 10^{10} \end{cases}$$

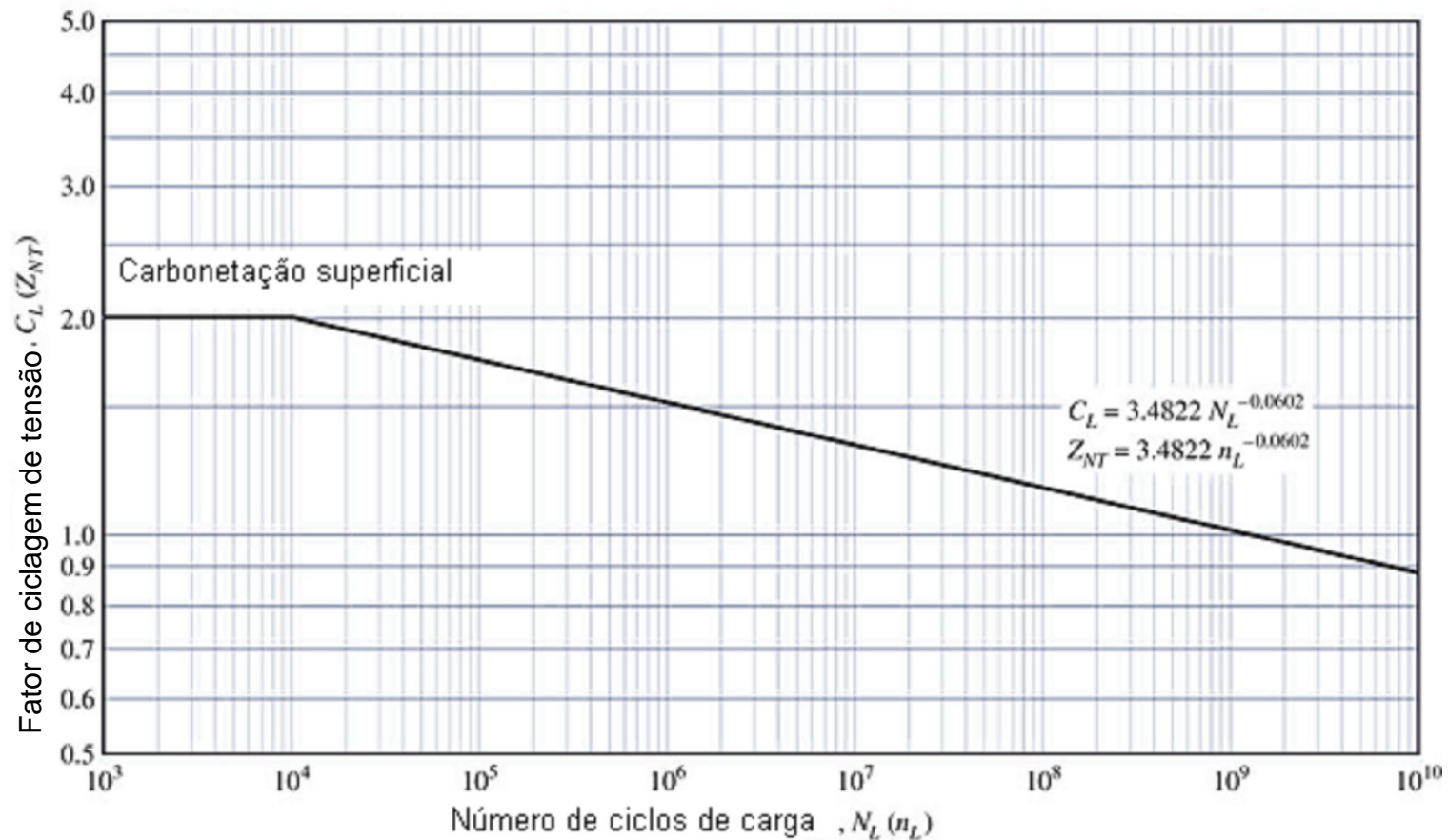
Sistema inglês

$$Z_{NT} = \begin{cases} 2,0 & 10^3 \leq n_L \leq 10^4 \\ 3,4822n_L^{-0,0602} & 10^4 \leq n_L \leq 10^{10} \end{cases}$$

SI

FATORES PARA EQUAÇÃO AGMA

- Fator de Ciclagem de Tensão para Resistência à Formação de Cavidades - C_L (Z_{NT})



FATORES PARA EQUAÇÃO AGMA

- Fator de Ciclagem de Tensão para Resistência à Flexão K_L (Y_{NT})

$$K_L = \begin{cases} 2,7 & 10^2 \leq N_L < 10^3 \\ 6,1514N_L^{-0,1182} & 10^3 \leq N_L < 3 \cdot 10^6 \\ 1,6831N_L^{-0,0323} & 3 \cdot 10^6 \leq N_L < 3 \cdot 10^{10} & \text{geral} \\ 1,3558N_L^{-0,0178} & 3 \cdot 10^6 \leq N_L < 3 \cdot 10^{10} & \text{crítico} \end{cases}$$

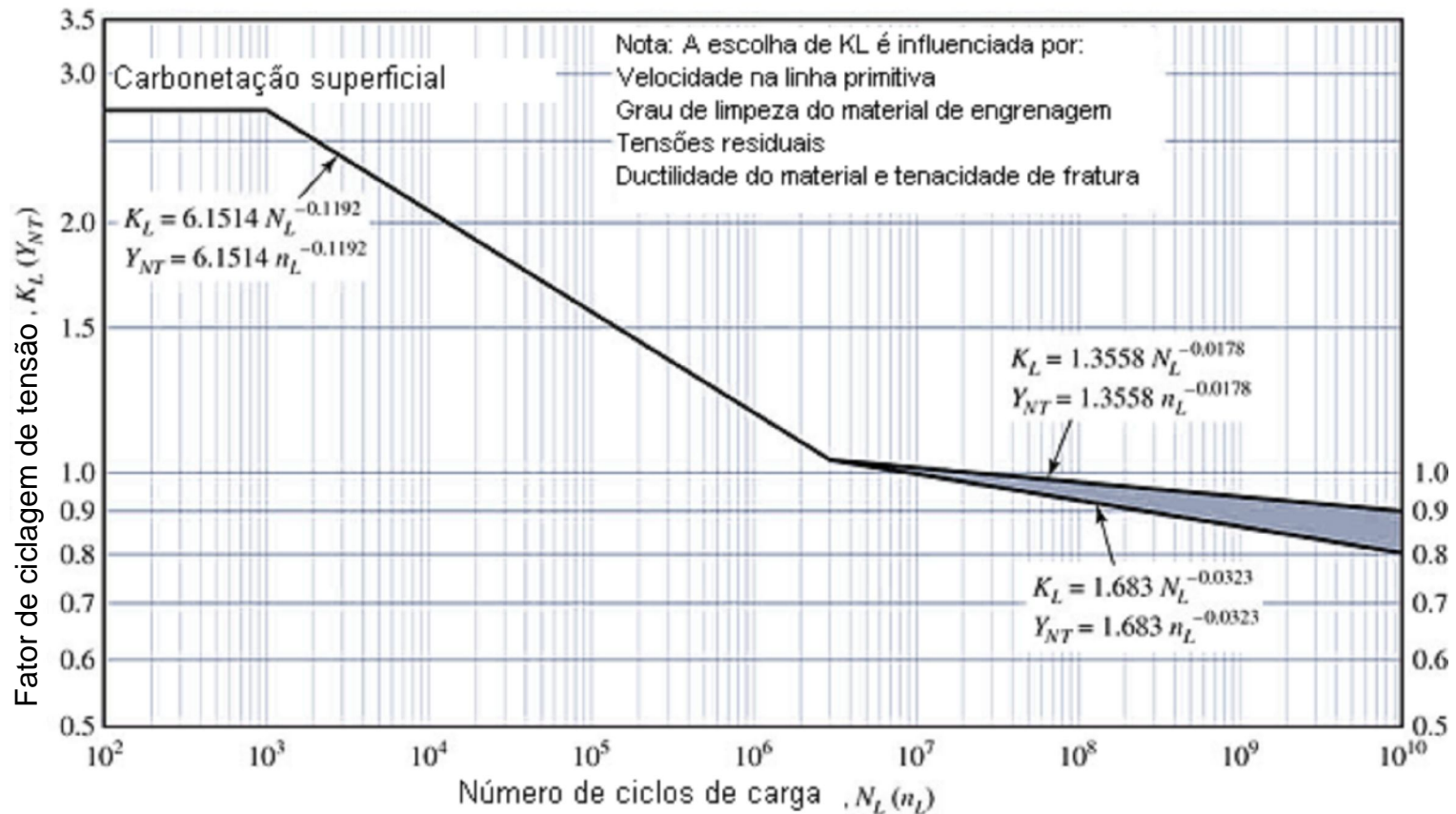
Sistema
inglês

$$Y_{NT} = \begin{cases} 2,7 & 10^2 \leq n_L < 10^3 \\ 6,1514n_L^{-0,1182} & 10^3 \leq n_L < 3 \cdot 10^6 \\ 1,6831n_L^{-0,0323} & 3 \cdot 10^6 \leq n_L < 3 \cdot 10^{10} & \text{geral} \\ 1,3558n_L^{-0,0178} & 3 \cdot 10^6 \leq n_L < 3 \cdot 10^{10} & \text{crítico} \end{cases}$$

SI

FATORES PARA EQUAÇÃO AGMA

- Fator de Ciclagem de Tensão para Resistência à Flexão K_L (Y_{NT})



Fator de ciclagem de tensão para a resistência à flexão K_L (Y_{NT}) de engrenagens cônicas de aço endurecido superficialmente, por carbonetação (Fonte ANSI/AGMA 2003-B97, Shigley)

FATORES PARA EQUAÇÃO AGMA

- Fator de Razão de Dureza C_H (Z_W)

$$C_H = 1,0 + B_1(N/n - 1,0)$$

$$B_1 = 0,00898 \left(\frac{H_{BP}}{H_{BG}} \right) - 0,00829$$

$$Z_W = 1,0 + B_1(z_1/z_2 - 1,0)$$

$$B_1 = 0,00898 \left(\frac{H_{B1}}{H_{B2}} \right) - 0,00829$$

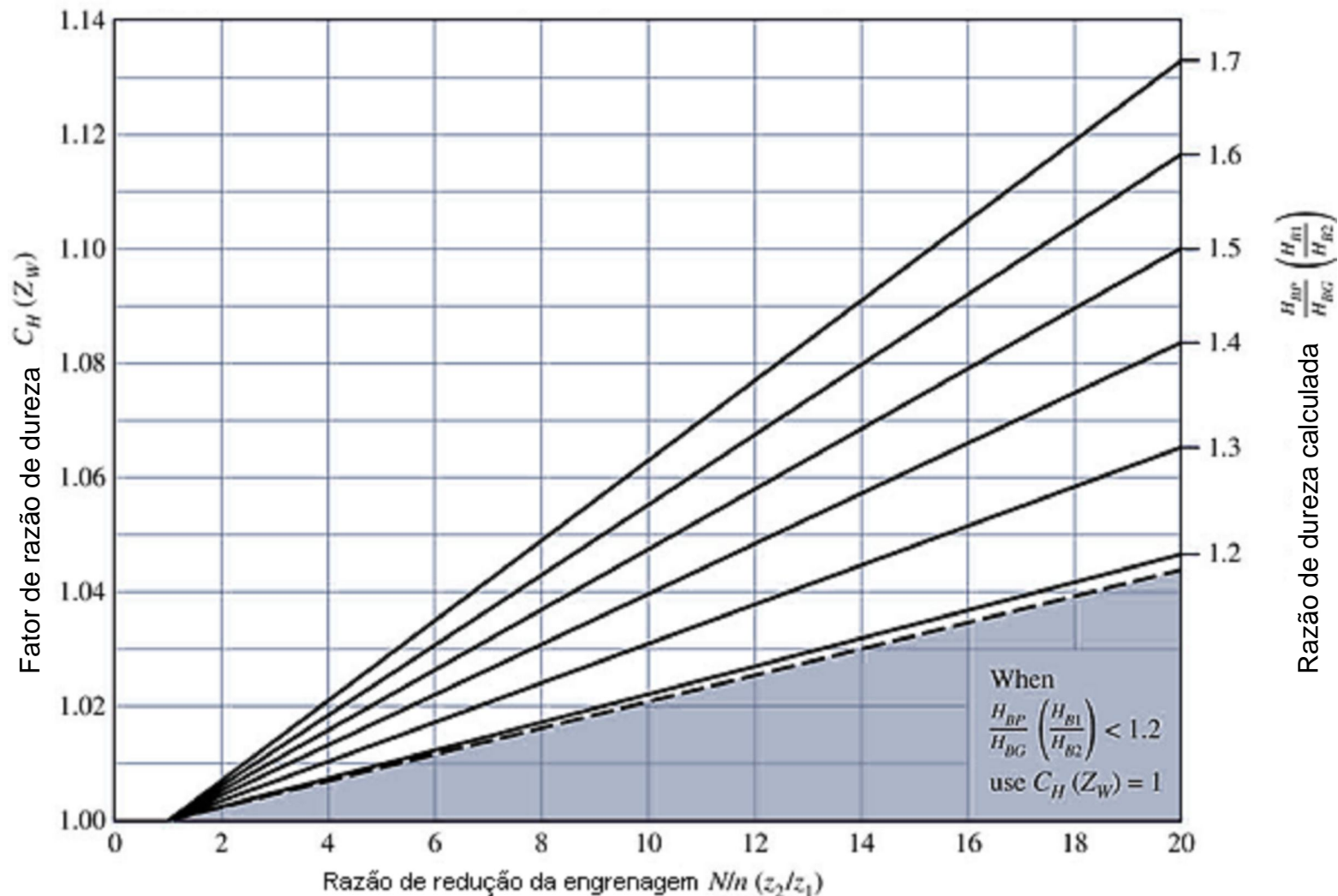
- Válidas quando, onde $N(z_1)$ é o número de dentes da coroa e $n(z_2)$ o número de dentes do pinhão:

$$1,2 \leq \frac{H_{BP}}{H_{BG}} \leq 1,7$$

$$1,2 \leq \frac{H_{B1}}{H_{B2}} \leq 1,7$$

FATORES PARA EQUAÇÃO AGMA

- Fator de Razão de Dureza $C_H (Z_W)$



Fator de razão de dureza para pinhão e coroa endurecidas por completo (Fonte ANSI/AGMA 2003-B97, Shigley)

FATORES PARA EQUAÇÃO AGMA

- Para um pinhão endurecido superficialmente (48 HRC ou mais) roda uma coroa endurecida inteiramente ($180 < H_B < 400$), um efeito de encruamento ocorre. O fator C_H (Z_W) varia com a rugosidade superficial do pinhão $f_p(R_{a1})$ e com a dureza da engrenagem par.

$$C_H = 1,0 + B_2(450 - H_{BG})$$

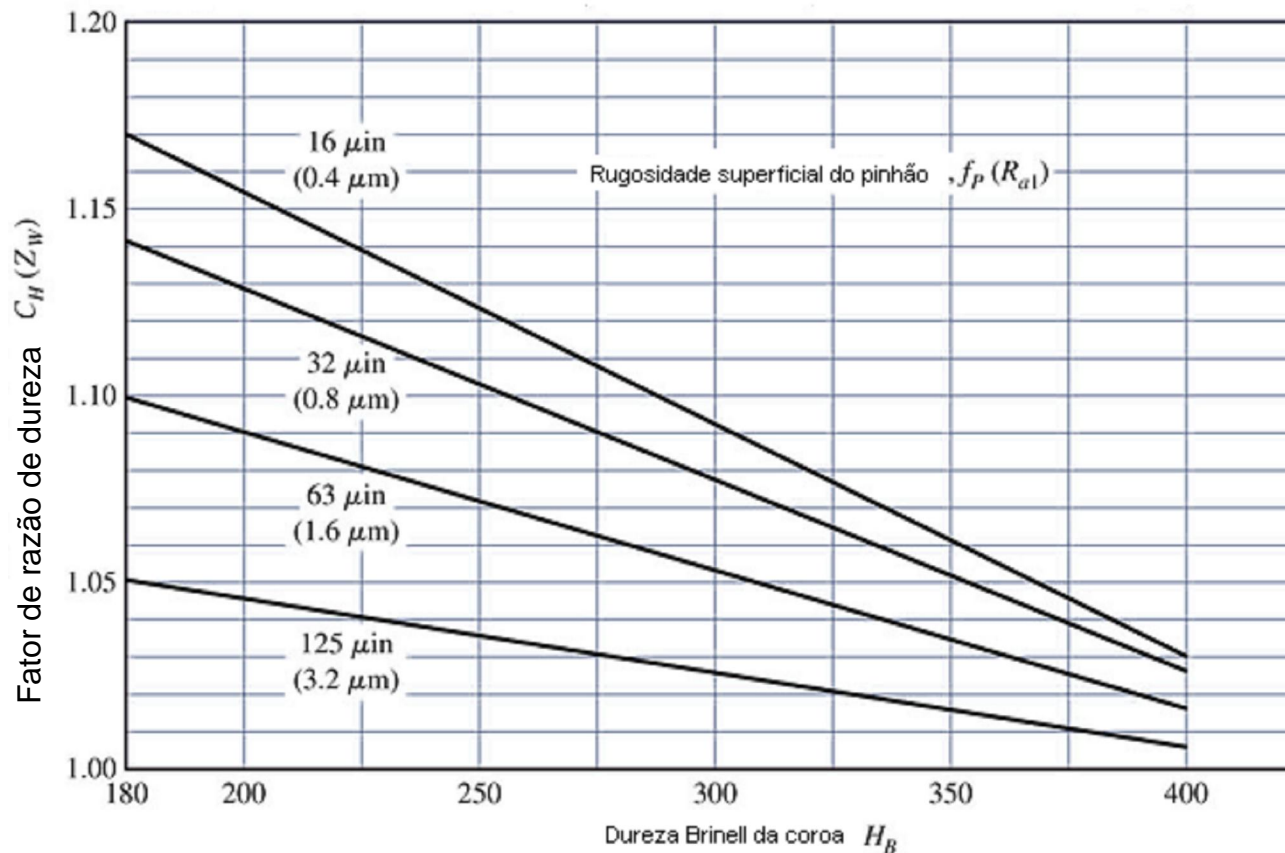
$$B_2 = 0,00075 \exp(-0,0122 f_P)$$

$$Z_W = 1,0 + B_2(450 - H_{B2})$$

$$B_2 = 0,00075 \exp(-0,52 f_P)$$

FATORES PARA EQUAÇÃO AGMA

- Para um pinhão endurecido superficialmente (48 HRC ou mais) roda uma coroa endurecida inteiramente ($180 < H_B < 400$), um efeito de encruamento ocorre. O fator C_H (Z_W) varia com a rugosidade superficial do pinhão $f_p(R_{a1})$ e com a dureza da engrenagem par.



Fator de razão de dureza para pinhão endurecidos superficialmente (Fonte ANSI/AGMA 2003-B97, Shigley)

FATORES PARA EQUAÇÃO AGMA

- Fator de Temperatura - K_T (K_θ)

$$K_T = \begin{cases} 1,0 & 32^\circ F \leq t \leq 250^\circ F \\ (460 + t) / 710 & t > 250^\circ F \end{cases}$$

Sistema inglês

$$K_\theta = \begin{cases} 1,0 & 0^\circ C \leq \theta \leq 120^\circ C \\ (273 + \theta) / 393 & \theta > 120^\circ C \end{cases}$$

SI

FATORES PARA EQUAÇÃO AGMA

- Fatores de Confiabilidade - $C_R (Z_Z)$ e $K_R (Y_Z)$

$$Y_Z = K_R = \begin{cases} 0,50 - 0,25 \log(1 - R) & 0,99 \leq R \leq 0,999 \\ 0,70 - 0,15 \log(1 - R) & 0,90 \leq R < 0,99 \end{cases}$$

$$C_R = \sqrt{K_R}$$

$$Z_Z = \sqrt{Y_Z}$$

Requerimentos da aplicação	Fatores de confiabilidade para o aço	
	$C_R(Z_Z)$	$K_R(Y_Z)$
Menos de uma falha a cada 10000	1,22	1,50
Menos de uma falha a cada 1000	1,12	1,25
Menos de uma falha a cada 100	1,00	1,00
Menos de uma falha a cada 10	0,92	0,85
Menos de uma falha a cada 2	0,84	0,70

FATORES PARA EQUAÇÃO AGMA

- Coeficiente elástico para Resistência à Formação de Cavidades - C_p (Z_E)

$$C_p = \left\{ \frac{1}{\pi \left[(1 - \nu_P^2) / E_P + (1 - \nu_G^2) / E_G \right]} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$Z_E = \left\{ \frac{1}{\pi \left[(1 - \nu_1^2) / E_1 + (1 - \nu_2^2) / E_2 \right]} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

TENSÃO DE CONTATO ADMISSÍVEL

Tabela 15-4 Valor de tensão de contato admissível para engrenagens de aço, $s_{ac}(\sigma_{H\ lim})$

Designação do material	Tratamentos térmicos	Dureza superficial mínima*	Valor admissível da tensão de contato $S_{ac}(\sigma_{H\ lim})$ lbf/in ² (N/mm ²)		Grau
			Grau 1 [†]	Grau 2 [†]	
Aço	Endurecimento completo [‡]	Figura 15-12	Figura 15-12	Figura 15-12	
	Endurecimento por chama ou indução [§]	50 HRC	175 000 (1210)	190 000 (1310)	
	Carbonização e endurecimento superficial [§]	2003-B97 Tabela 8	200 000 (1380)	225 000 (1550)	250 (172)
AISI 4140	Nitretação [§]	84,5 HR15N		145 000 (1000)	
Nitr alloy 135M	Nitretação [§]	90,0 HR15N		160 000 (1100)	

Fonte: ANSI/AGMA 2003-B97.

TENSÃO DE CONTATO ADMISSÍVEL

Tabela 15-6 Valores admissíveis de tensão de flexão para engrenagens de aço, s_{at} ($\sigma_{F\ lim}$)

Designação do material	Tratamento térmico	Dureza superficial mínima	Valor da tensão de flexão (admissível)		
			Grau 1*	s_{at} ($\sigma_{F\ lim}$) lbf/in ² (N/mm ²)	Grau 2*
Aço	Endurecimento por completo	Figura 15-13	Figura 15-13	Figura 15-13	
	Endurecimento por chama ou indução	50 HRC			
			Raízes não-endurecidas	15 000 (85)	13 500 (95)
	Raízes endurecidas		22 500 (154)		
	Carbonização e endurecimento superficial [†]	2003-B97 Tabela 8	30 000 (205)	35 000 (240)	40 000 (275)
AISI 4140	Nitretação ^{†, ‡}	84,5 HR15N		22 000 (150)	
Nitralloy 135M	Nitretação ^{†, ‡}	90,0 HR15N		24 000 (165)	

Fonte: ANSI/AGMA 2003-B97.

* Ver ANSI/AGMA 2003-B97, Tabelas 8-11, para fatores metalúrgicos para cada grau de tensão de engrenagens de aço.

[†] Os valores de tensão admissíveis indicados podem ser utilizados com as profundidades de endurecimento prescritas em 21.1, ANSI/AGMA 2003-B97.

[‡] A capacidade de sobrecarga de engrenagens nitretadas é pequena. Uma vez que a forma da curva S-N efetiva é plana, a sensibilidade a choques deve ser investigada antes de se seguir com o projeto.

TENSÃO DE CONTATO ADMISSÍVEL

Tabela 15-5 Valor da tensão de contato admissível para engrenagens de ferro, s_{ac} ($\sigma_{H\ lim}$)

Material	Designação do material ASTM	ISO	Tratamento térmico	Mínimo típico Dureza superficial	Valor da tensão de contato admissível ($\sigma_{H\ lim}$) lbf/in² (N/mm²)
Ferro fundido	ASTM A48	ISO/DR 185			
	Classe 30	Grau 200	Como fundido	175 HB	50 000 (345)
	Classe 40	Grau 300	Como fundido	200 HB	65 000 (450)
Ferro dúctil (nodular)	ASTM A536	ISO/DIS 1083			
	Grau 80-55-06	Grau 600-370-03	Temperado	180 HB	94 000 (650)
	Grau 120-90-02	Grau 800-480-02	e revenido	300 HB	135 000 (930)

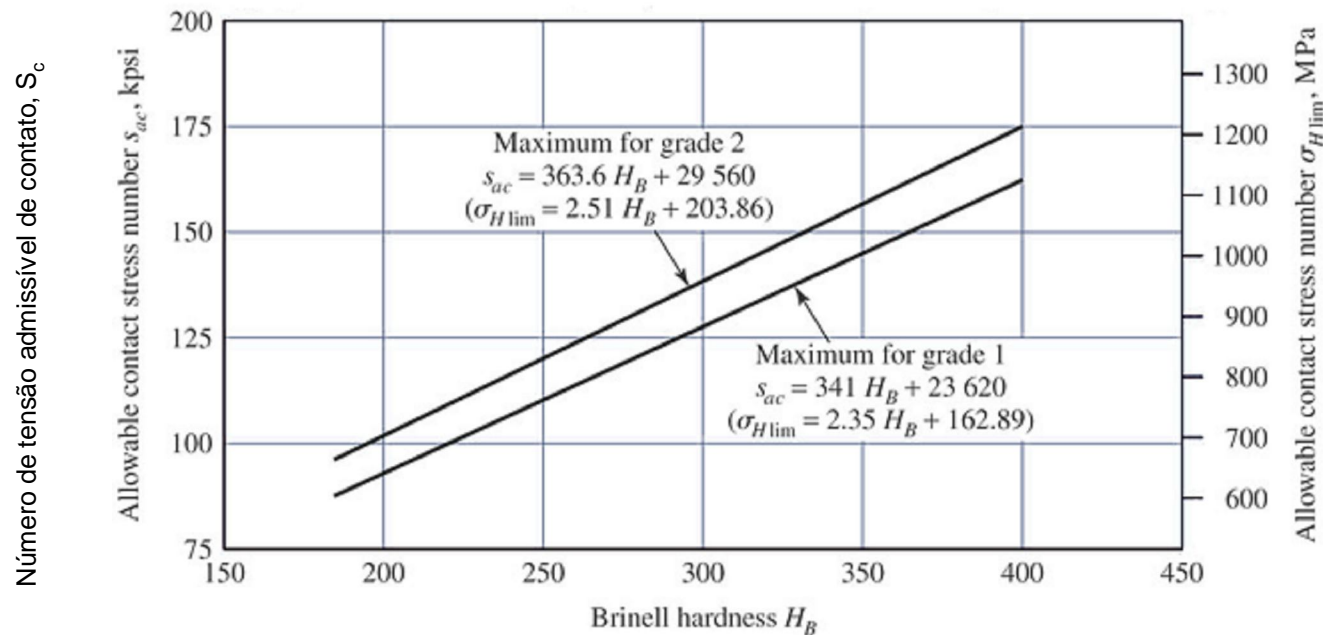
Fonte: ANSI/AGMA 2003-B97.

TENSÃO DE CONTATO ADMISSÍVEL

Valor da tensão de flexão admissível para engrenagens de ferro, s_{at} ($\sigma_{F\ lim}$)

Material	Designação do material ASTM	ISO	Tratamento térmico	Dureza superficial mínima típica	Valor da tensão de flexão (admissível), s_{at} ($\sigma_{F\ lim}$) lbf/in ² (N/mm ²)
Como fundido	ASTM A48	ISO/DR 185			
	Classe 30	Grau 200	Como fundido	175 HB	4500 (30)
	Classe 40	Grau 300	Como fundido	200 HB	6500 (45)
Temperado e revenido	ASTM A536	ISO/DIS 1083			
	Grau 80-55-06	Grau 600-370-03	Temperado	180 HB	10 000 (70)
	Grau 120-90-02	Grau 800-480-02	e revenido	300 HB	13 500 (95)

TENSÃO DE CONTATO ADMISSÍVEL



Valor da tensão de contato admissível para engrenagens de aço endurecidas por completo, S_{ac} (σ_{Hlim}) (Fonte ANSI/AGMA 2003-B97, Shigley)

$$\sigma_{Hlim} = 2,35H_B + 162,89MPa$$

grau 1

$$\sigma_{Hlim} = 2,51H_B + 203,86MPa$$

grau 2

TENSÃO DE FLEXÃO ADMISSÍVEL

Valor da tensão de flexão admissível para aços endurecidos por inteiro (Fonte ANSI/AGMA 2003-B97, Shigley)

$$s_{at} = 44H_B + 2100 \text{ psi}$$

grau 1

$$\sigma_{F \text{ lim}} = 0,30H_B + 14,48 \text{ MPa}$$

$$s_{at} = 48H_B + 5980 \text{ psi}$$

grau 2

$$\sigma_{F \text{ lim}} = 0,33H_B + 41,24 \text{ MPa}$$

CARREGAMENTO REVERSO

AGMA recomenda utilizar 70% da resistência admissível nos casos em que a carga é completamente reversa.

EXEMPLO 15.1 – Shigley – pp. 744.

Um par de engrenagens mitrais de dentes retos idênticas, têm um passo diametral de 5 na extremidade posterior, uma largura de face de 1,10 in e um ângulo de pressão normal de 20° ; as engrenagens são feitas de aço grau 1, endurecidas por inteiro, com dureza de núcleo e superfície de 180 Brinell. Tais engrenagens não tem coroamento e são pretendidas para uso industrial em geral. Elas têm um número de qualidade $Q_v=7$. É provável que a aplicação pretendida venha a requerer montagem externas das mesmas. Utilize um fator de segurança igual a 1, 10^7 ciclos de vida, com confiabilidade de 0,99.

- a) Para uma velocidade de 600 rpm, encontre a capacidade desse par de engrenagens de transmitir potência, com base na resistência à flexão AGMA;
- b) Para as mesmas condições (a), encontre a capacidade desse par de engrenagens de transmitir potência, com base na resistência ao desgaste AGMA.
- c) Para uma confiabilidade de 0,995 , uma vida da coroa de 10^9 revoluções e um fator de segurança $S_F=S_H=1,5$, determine a capacidade de transmitir potência, para esse conjunto de engrenagens, utilizando as resistências AGMA.

EXEMPLO 15.1 – Shigley – pp. 744.

Cálculo do diâmetro primitivo e da velocidade tangencial:

$$d_p = \frac{N_P}{P_D} = \frac{25}{5} = 5,0 \text{ in} = 127,0 \text{ mm}$$

$$V = v_t = \frac{\pi d_p n_p}{12} = \frac{\pi(127,0) \cdot 600}{60} = 3989,8 \text{ mm/s} = 3,99 \text{ m/s}$$

EXEMPLO 15.1 – Shigley – pp. 744.

Fator de velocidade:

$$K_v = \begin{cases} \left(\frac{A + \sqrt{v_t}}{A} \right)^B \\ \left(\frac{A + \sqrt{200v_{et}}}{A} \right)^B \end{cases}$$

$$B = 0,25(12 - Q_v)^{2/3}$$

$$B = 0,25(12 - 7)^{2/3} = 0,731$$

$$A = 50 + 56(1 - B) = 50 + 56(1 - 0,731) = 65,064$$

$$K_v = \left(\frac{65,06 + \sqrt{200 \cdot 3,99}}{65,06} \right)^{0,731} = 1,30$$

EXEMPLO 15.1 – Shigley – pp. 744.

Velocidade máxima:

$$v_{te \max} = \frac{[A + (Q_v - 3)]^2}{200} = \frac{[65,06 + (Q_v - 3)]^2}{200} = 23,84 \text{ m/s}$$

$$v_t < v_{te \max}$$

Assim, K_v é válido.

Fator de sobrecarga: carregamento uniforme-uniforme, Tabela 15-2, $K_A=1,00$;

Fator de segurança: $S_F=1,0$, $S_H=1,0$;

EXEMPLO 15.1 – Shigley – pp. 744.

- Fator de distribuição de carga - K_m ($K_{H\beta}$)

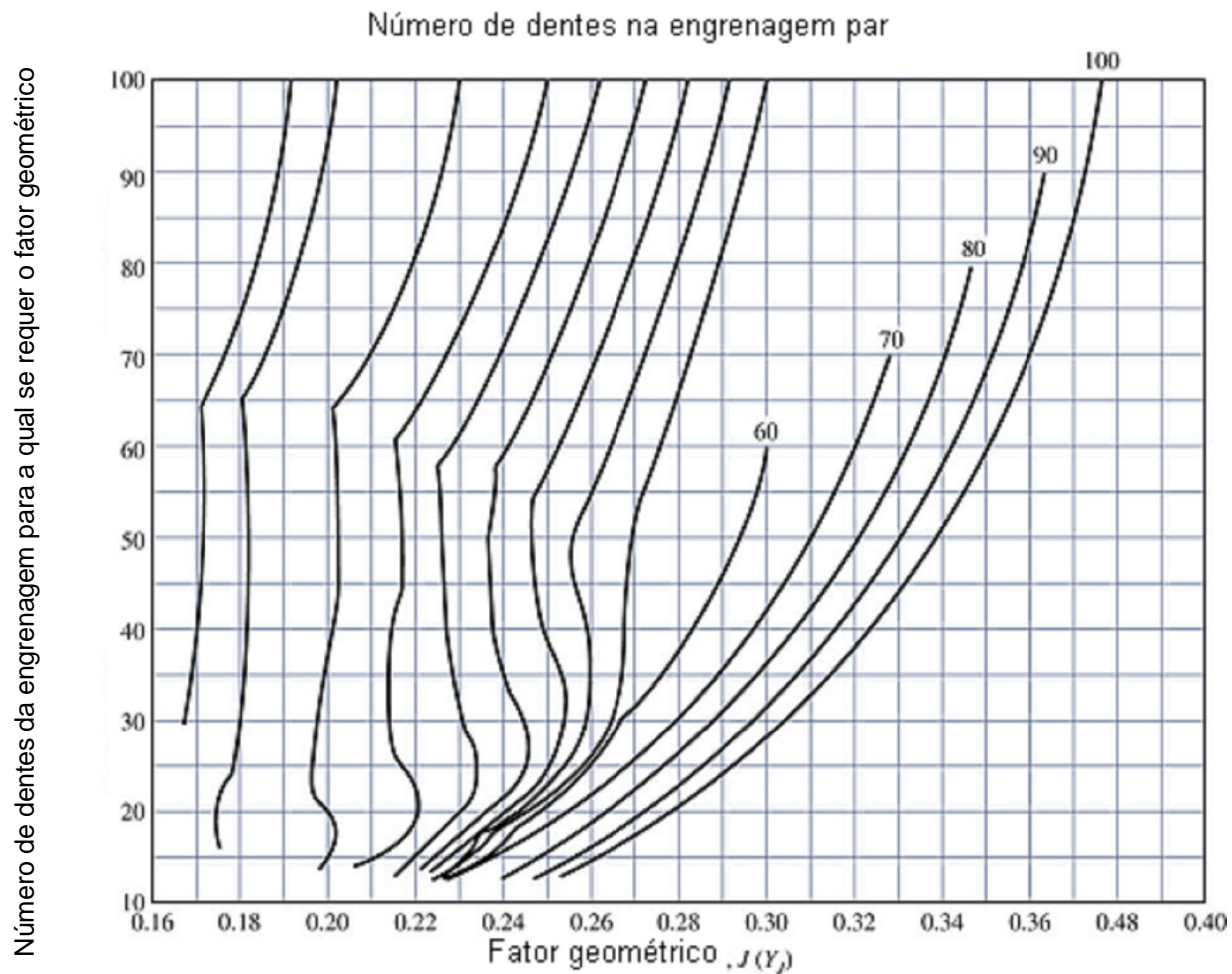
$$K_{H\beta} = K_{mb} + 5,6 \cdot 10^{-6} b^2$$

$$K_{mb} = \begin{cases} 1,0 & \text{ambos os membros montados entre mancais} \\ 1,10 & \text{um membro entre mancais} \\ 1,25 & \text{nenhum membro montado entre mancais} \end{cases}$$

$$K_{H\beta} = 1,25 + 5,6 \cdot 10^{-6} (27,94\text{mm})^2 = 1,254$$

EXEMPLO 15.1 – Shigley – pp. 744.

- Fator Geométrico para Resistência à Flexão - J (Y_J)



$$(Y_J)_P = 0,216$$

$$(Y_J)_G = 0,216$$

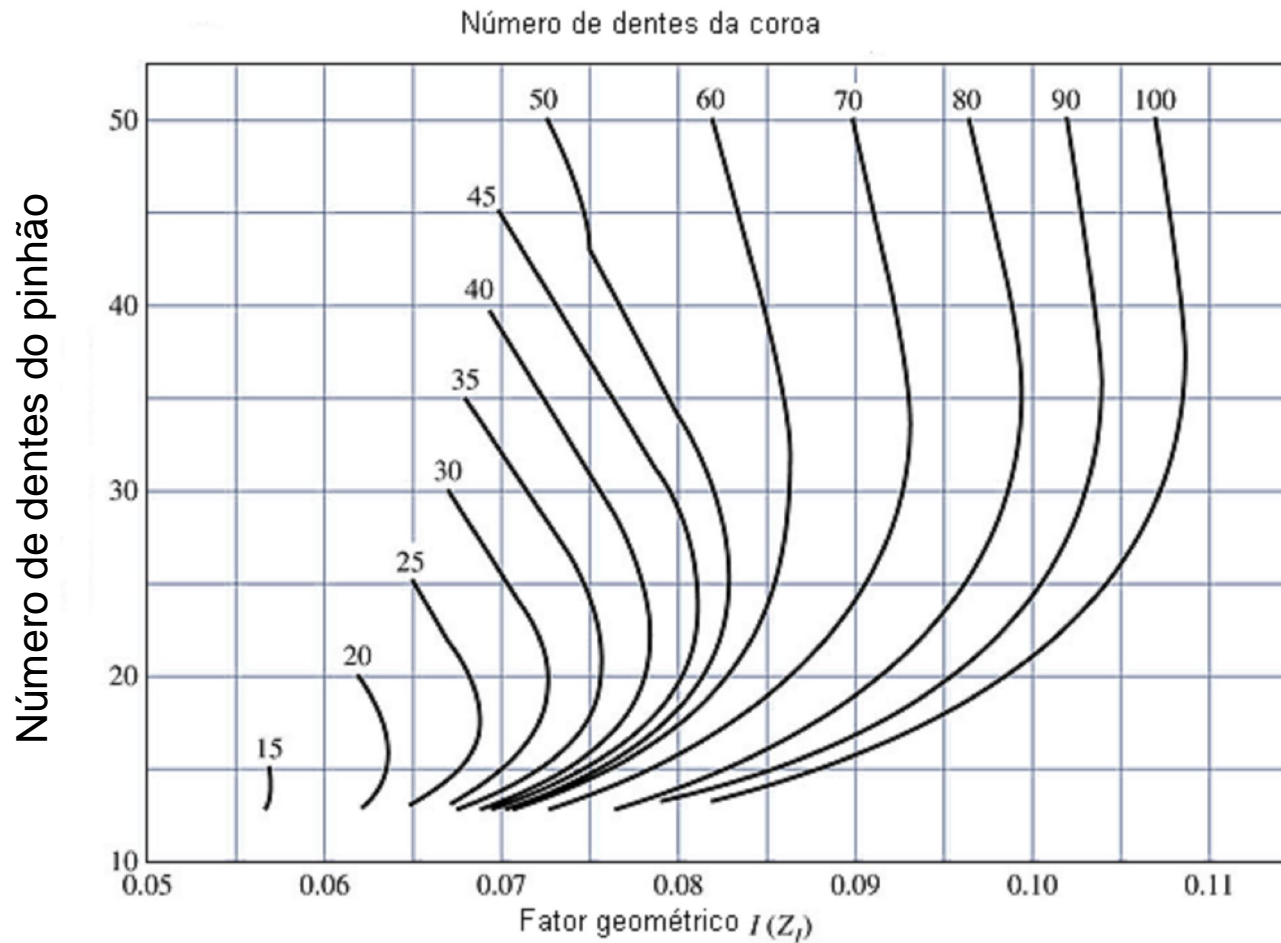
EXEMPLO 15.1 – Shigley – pp. 744.

- Fator de Curvatura ao Longo do Comprimento para Resistência à Flexão - K_x (Y_β)

$$K_x = Y_\beta = 1,0 \text{ para engrenagens cônicas de dentes retos}$$

EXEMPLO 15.1 – Shigley – pp. 744.

- Fator Geométrico para Resistência à Formação de Cavidades - I (Z_I)



$$Z_I = 0,065$$

EXEMPLO 15.1 – Shigley – pp. 744.

- Fator de Ciclagem de Tensão para Resistência à Flexão K_L (Y_{NT})

$$Y_{NT} = \begin{cases} 2,7 & 10^2 \leq n_L < 10^3 \\ 6,1514n_L^{-0,1182} & 10^3 \leq n_L < 3 \cdot 10^6 \\ 1,6831n_L^{-0,0323} & 3 \cdot 10^6 \leq n_L < 3 \cdot 10^{10} & \text{geral} \\ 1,3558n_L^{-0,0178} & 3 \cdot 10^6 \leq n_L < 3 \cdot 10^{10} & \text{crítico} \end{cases}$$

$$Y_{NT} = 1,6831(10^7)^{-0,0323} \quad 3 \cdot 10^6 \leq n_L < 3 \cdot 10^{10}$$

$$Y_{NT} = 1$$

EXEMPLO 15.1 – Shigley – pp. 744.

- Fator de Ciclagem de Tensão para Resistência à Formação de Cavidades - C_L (Z_{NT})

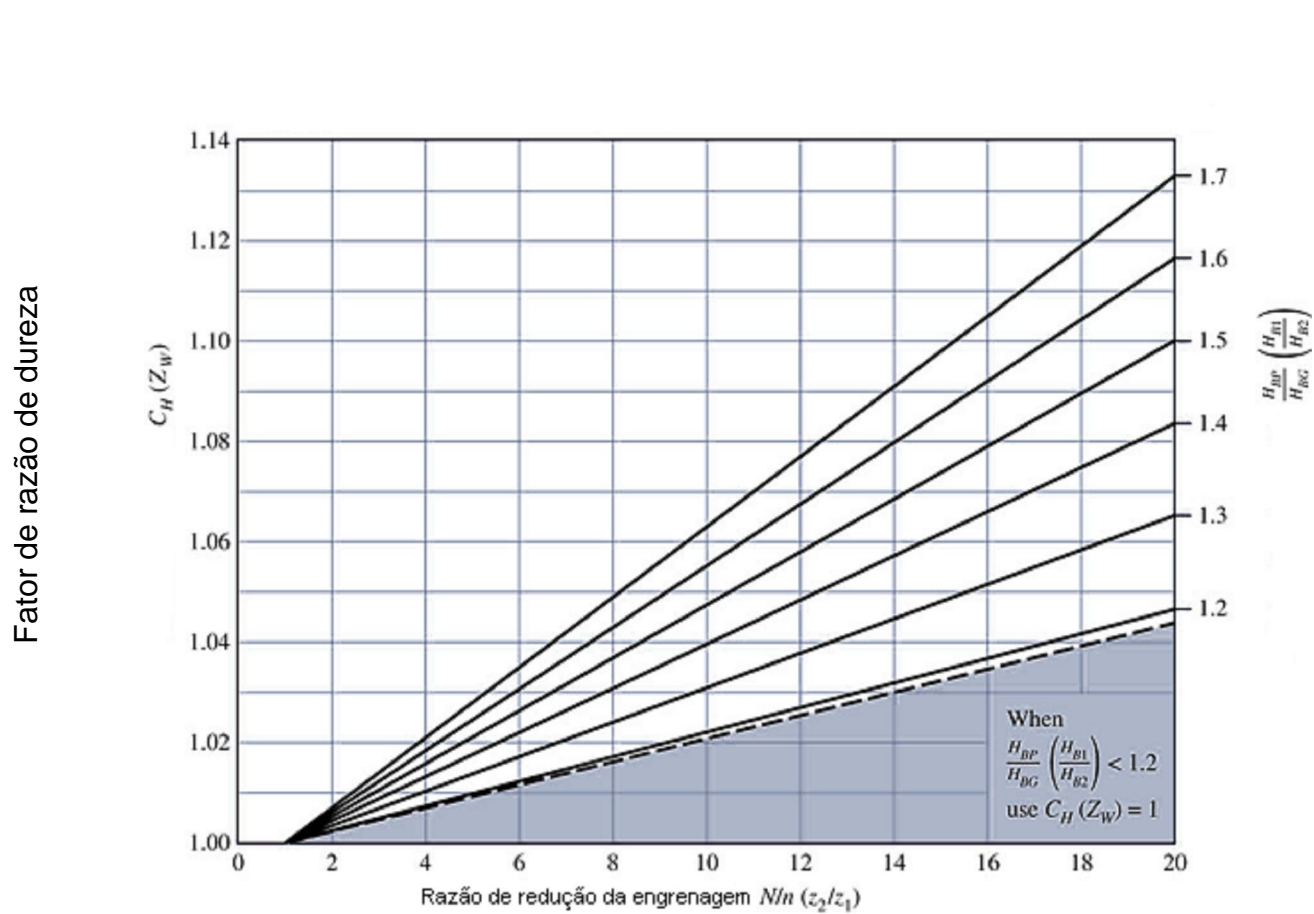
$$Z_{NT} = \begin{cases} 2,0 & 10^3 \leq n_L \leq 10^4 \\ 3,4822n_L^{-0,0602} & 10^4 \leq n_L \leq 10^{10} \end{cases}$$

$$Z_{NT} = 3,4822n_L^{-0,0602} \quad 10^4 \leq n_L \leq 10^{10}$$

$$Z_{NT} = 3,4822(10^7)^{-0,0602} = 1,32$$

EXEMPLO 15.1 – Shigley – pp. 744.

- Fator de Razão de Dureza $C_H (Z_W)$



$$Z_W = 1$$

EXEMPLO 15.1 – Shigley – pp. 744.

- Fator de Temperatura - K_T (K_θ)

$$K_\theta = \begin{cases} 1,0 & 0^\circ C \leq \theta \leq 120^\circ C \\ (273 + t)/393 & \theta > 120^\circ C \end{cases}$$

$$K_\theta = 1$$

- Fator de Curvatura ao Longo do Comprimento para Resistência à Flexão - K_x (Y_β)

$$K_x = Y_\beta = 1,0 \text{ para engrenagens cônicas de dentes retos}$$

EXEMPLO 15.1 – Shigley – pp. 744.

- Fatores de Confiabilidade - $C_R (Z_Z)$ e $K_R (Y_Z)$

$$Y_Z = \begin{cases} 0,50 - 0,25 \log(1 - R) & 0,99 \leq R \leq 0,999 \\ 0,70 - 0,15 \log(1 - R) & 0,90 \leq R < 0,99 \end{cases}$$

$$Y_Z = 0,50 - 0,25 \log(1 - 0,99) = 1$$

$$Z_Z = \sqrt{Y_Z} = 1$$

EXEMPLO 15.1 – Shigley – pp. 744.

- Fatores de Tamanho para flexão - Y_x

$$Y_x = \begin{cases} 0,50 & m_{et} \leq 1,6 \text{ mm} \\ 0,4867 + 0,008339m_{et} & 1,6 \leq m_{et} \leq 50 \text{ mm} \end{cases}$$

$$Y_x = 0,4867 + 0,008339 \left(\frac{127}{25} \right) = 0,529$$

EXEMPLO 15.1 – Shigley – pp. 744.

a) Flexão

$$\sigma_{F \text{ lim}} = 0,30(180) + 14,48 \text{ MPa} = 68,48 \text{ MPa}$$

$$\sigma_F = \frac{1000 W^t}{b} \frac{K_A K_v}{m_{et}} \frac{Y_x K_{H\beta}}{Y_\beta Y_J}$$

$$\sigma_F = \frac{1000 W^t}{27,94} \frac{1,0(1,30)}{127/25} \frac{0,529(1,254)}{1,0(0,216)} = 28,12 W^t$$

Mas

$$\sigma_{FP} = \frac{\sigma_{F \text{ lim}} Y_{NT}}{S_F K_\theta Z_Z} = \frac{68,48(1)}{1(1)1} = 68,48 \text{ MPa}$$

EXEMPLO 15.1 – Shigley – pp. 744.

Igualando-se

$$\sigma_{FP} = \sigma_F$$

$$28,12 W^t = 68,48 MPa$$

$$28,12 W^t = 68,48 MPa$$

$$W^t = 2,43 kN$$

$$W^t = \frac{60000H}{\pi d n}$$

$$H = \frac{W^t \pi d n}{60000} = \frac{2,43 \pi (127) 600}{60000} = 9,69 kW$$

EXEMPLO 15.1 – Shigley – pp. 744.

b) Desgaste

$$\sigma_{H \text{ lim}} = 2,35H_B + 162,89MPa$$

$$\sigma_{H \text{ lim}} = 2,35(180) + 162,89MPa = 585,9MPa$$

$$\sigma_c = \sigma_H = Z_E \sqrt{\frac{1000W^t}{bdZ_1}} K_A K_v K_{H\beta} Z_x Z_{xc}$$

$$\sigma_{HP} = \frac{\sigma_{H \text{ lim}}}{S_H} \frac{Z_N Z_W}{K_\theta Y_Z} = \frac{\sigma_{H \text{ lim}}}{1} \frac{1(1)}{1(1)} = 585,9MPa$$

EXEMPLO 15.1 – Shigley – pp. 744.

- Fator de tamanho para Resistência à Formação de Cavidades - C_s (Z_x)

$$Z_x = \begin{cases} 0,5 & b < 12,7 \text{ mm} \\ 0,00492b + 0,4375 & 12,7 \leq b \leq 114,3 \text{ mm} \\ 1 & b > 114,3 \text{ mm} \end{cases}$$

$$Z_x = 0,00492(27,94) + 0,4375 = 0,575$$

EXEMPLO 15.1 – Shigley – pp. 744.

$$\sigma_c = \sigma_H = 191 \sqrt{\frac{1000 W^t}{28,49(127)0,065}} 1,0(1,30)1,254(0,575)(2)$$

$$\sigma_c = \sigma_H = 191 \sqrt{7,97 \cdot W^t}$$

$$191 \sqrt{7,97 W^t} = 585,9$$

$$W^t = 1,18 \text{ kN}$$

$$H = \frac{W^t \pi d n}{60000} = \frac{1,18 \pi (127) 600}{60000} = 4,71 \text{ kW}$$

**Potência estimada para
o par de engrenagem**

$$H = \min(4,71; 9,69) \text{ kW}$$

EXEMPLO 15.1 – Shigley – pp. 744.

c) Para uma vida de 10^9 ciclos, $R=0,995$, $S_F=S_H=1,5$

• Fator de Ciclagem de Tensão para Resistência à Flexão K_L (Y_{NT})

$$Y_{NT} = \begin{cases} 2,7 & 10^2 \leq n_L < 10^3 \\ 6,1514n_L^{-0,1182} & 10^3 \leq n_L < 3 \cdot 10^6 \\ 1,6831n_L^{-0,0323} & 3 \cdot 10^6 \leq n_L < 3 \cdot 10^{10} & \text{geral} \\ 1,3558n_L^{-0,0178} & 3 \cdot 10^6 \leq n_L < 3 \cdot 10^{10} & \text{crítico} \end{cases}$$

$$Y_{NT} = 1,6831(10^9)^{-0,0323} = 0,861$$

EXEMPLO 15.1 – Shigley – pp. 744.

- Fatores de Confiabilidade - $C_R (Z_Z)$ e $K_R (Y_Z)$

$$Y_Z = \begin{cases} 0,50 - 0,25 \log(1 - R) & 0,99 \leq R \leq 0,999 \\ 0,70 - 0,15 \log(1 - R) & 0,90 \leq R < 0,99 \end{cases}$$

$$Y_Z = 0,50 - 0,25 \log(1 - 0,995) = 1,075$$

$$Z_Z = \sqrt{Y_Z} = 1,037$$

EXEMPLO 15.1 – Shigley – pp. 744.

- Fator de Ciclagem de Tensão para Resistência à Formação de Cavidades - C_L (Z_{NT})

$$Z_{NT} = \begin{cases} 2,0 & 10^3 \leq n_L \leq 10^4 \\ 3,4822n_L^{-0,0602} & 10^4 \leq n_L \leq 10^{10} \end{cases}$$

$$Z_{NT} = 3,4822n_L^{-0,0602} \quad 10^4 \leq n_L \leq 10^{10}$$

$$Z_{NT} = 3,4822(10^9)^{-0,0602} = 1,00$$

EXEMPLO 15.1 – Shigley – pp. 744.

Flexão

$$\sigma_{F \text{ lim}} = 0,30(180) + 14,48 \text{ MPa} = 68,48 \text{ MPa}$$

$$\sigma_F = \frac{1000 W^t}{b} \frac{K_A K_v}{m_{et}} \frac{Y_x K_{H\beta}}{Y_\beta Y_J}$$

$$\sigma_F = \frac{1000 W^t}{27,94} \frac{1,0(1,30)}{127/25} \frac{0,529(1,254)}{1,0(0,216)} = 28,12 W^t$$

Mas

$$\sigma_{FP} = \frac{\sigma_{F \text{ lim}} Y_{NT}}{S_F K_\theta Z_Z} = \frac{68,48(0,861)}{1,5(1)1,037} = 37,9 \text{ MPa}$$

$$28,12 W^t = 37,9 \text{ MPa}$$

$$W^t = 1,34 \text{ kN}$$

EXEMPLO 15.1 – Shigley – pp. 744.

Flexão

$$H = \frac{W^t \pi d n}{60000} = \frac{1,34\pi(127)600}{60000} = 5,37 \text{ kW}$$

Desgaste

$$\sigma_c = \sigma_H = Z_E \sqrt{\frac{1000W^t}{b d Z_1} K_A K_v K_{H\beta} Z_x Z_{xc}}$$

$$\sigma_{HP} = \frac{\sigma_{H \text{ lim}}}{S_H} \frac{Z_N Z_W}{K_\theta Y_Z} = \frac{585,9}{1,5} \frac{1(1)}{1(1,075)} = 363,34 \text{ MPa}$$

$$191\sqrt{7,97W^t} = 363,34$$

$$W^t = 0,454 \text{ kW}$$

$$H = \frac{W^t \pi d n}{60000} = \frac{0,454\pi(127)600}{60000} = 1,81 \text{ kW}$$

REFERÊNCIAS

SHIGLEY, J.E., MISCHKE, C.R., BUDYNAS, R.G., *Projeto de Engenharia mecânica, 7ª edição, Bookman.*