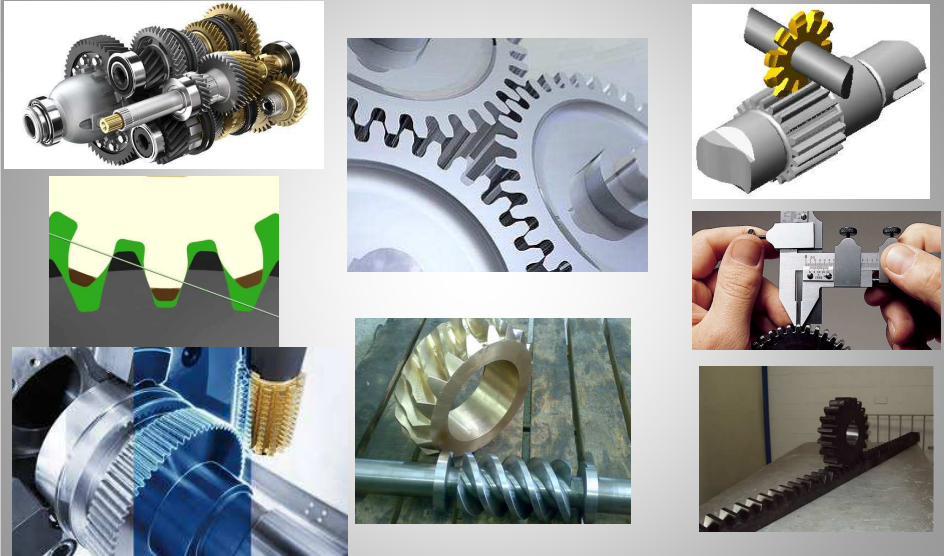


Capítulo 11 – Engrenagens Retas



Elementos de Máquinas
J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca



Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Introdução

Engrenagens são importantes dispositivos mecânicos responsáveis pela transmissão de potência entre eixos paralelos, reversos ou concorrentes.

Elementos de Máquinas
J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca



Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Introdução - Vantagens

- maior capacidade de carga e sobrecargas;
- isenção do problema do escorregamento;
- razão de velocidades constante;
- possibilidade de utilização de materiais variados para a confecção das engrenagens;
- pequena manutenção; e
- rendimentos na faixa de 98% (com exceção das coroas parafuso sem-fim).

Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Introdução - Desvantagens

- maior custo e dificuldade para fabricação;
- restrições para elevadas distâncias entre eixos;
- problemas de ruído para o caso específico das engrenagens de dentes retos; e
- presença de cargas axiais para o caso de engrenagens cônicas, helicoidais e coroa parafuso sem-fim.

Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Engrenagens – Principais tipos

Retas



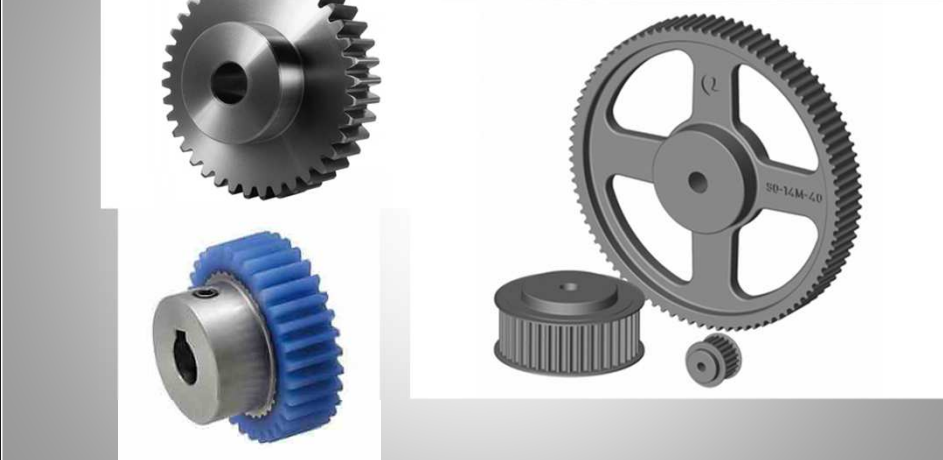
Elementos de Máquinas
J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca



Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Engrenagens – Principais tipos

Retas



Elementos de Máquinas
J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca



Capítulo 11 – Engrenagens Retas
Engrenagens – Principais tipos

Cremalheiras



The image shows two metal components: a gear with a circular hole and a rack with a long, straight profile and a series of teeth along its length.

Elementos de Máquinas
J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca

UFPR 100
ELSEVIER

Capítulo 11 – Engrenagens Retas
Engrenagens – Principais tipos

Cremalheiras



The image shows two scenes: on the left, a metal gear meshing with a metal rack; on the right, two white plastic gears meshing with a white plastic rack.

Elementos de Máquinas
J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca

UFPR 100
ELSEVIER

Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Engrenagens – Principais tipos

Helicoidais



Elementos de Máquinas
J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca



Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Engrenagens – Principais tipos

Helicoidais



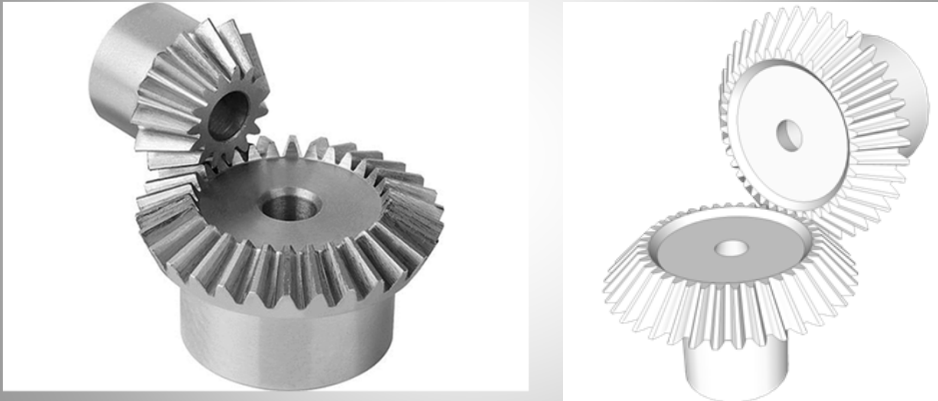
Elementos de Máquinas
J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca



Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Engrenagens – Principais tipos

Cônicas



Elementos de Máquinas
J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca



Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Engrenagens – Principais tipos

Cônicas



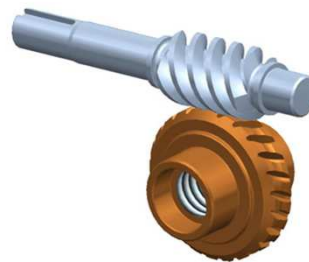
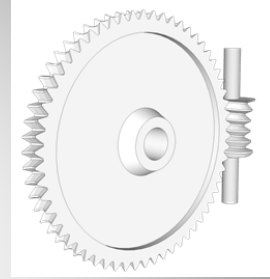
Elementos de Máquinas
J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca



Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Engrenagens – Principais tipos

Parafuso Coroa Sem-Fim



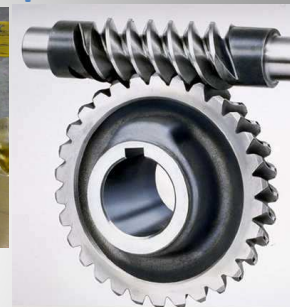
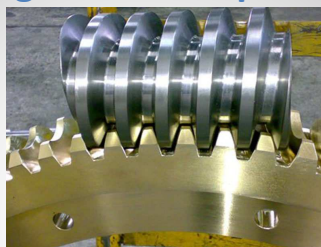
Elementos de Máquinas
J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca



Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Engrenagens – Principais tipos

Parafuso Coroa Sem-Fim

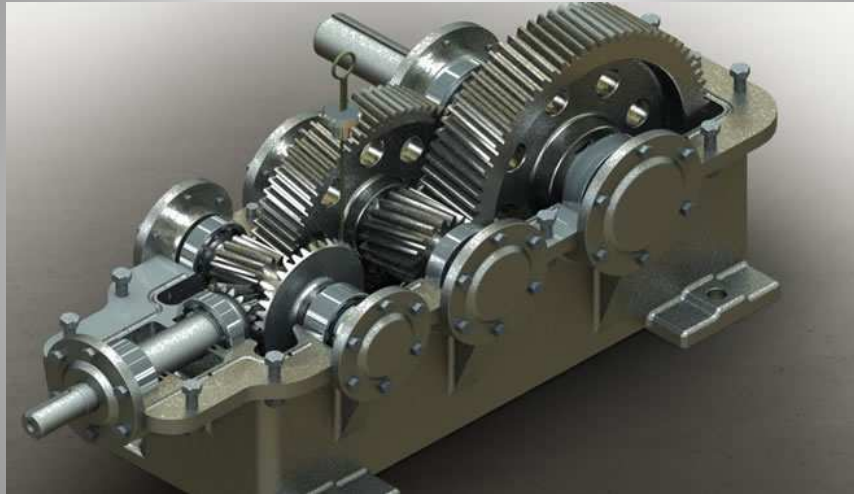


Elementos de Máquinas
J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca



Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Redutor - Exemplo



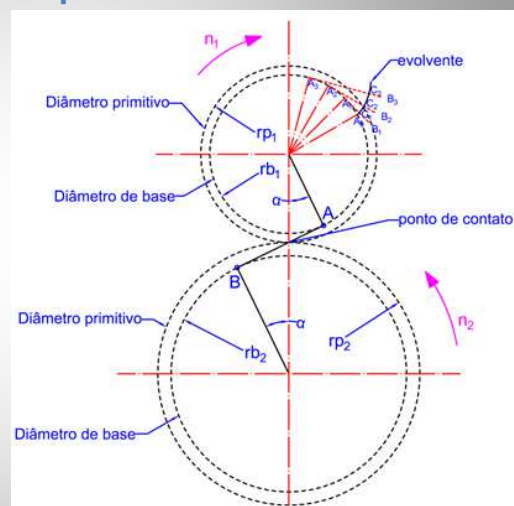
Elementos de Máquinas
J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca



Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Partes componentes

- Diâmetro ou círculo de base
= diâmetro imaginário a partir do qual se origina o perfil evolvente dos dentes da engrenagem.



Elementos de Máquinas
J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca



Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Partes componentes

- Perfil evolvental = perfil de uso universal e que apresenta usinagem facilitada, razão de velocidades constante, distância entre eixos constante e direção dos esforços atuantes sobre o dente da engrenagem também constante.

Elementos de Máquinas

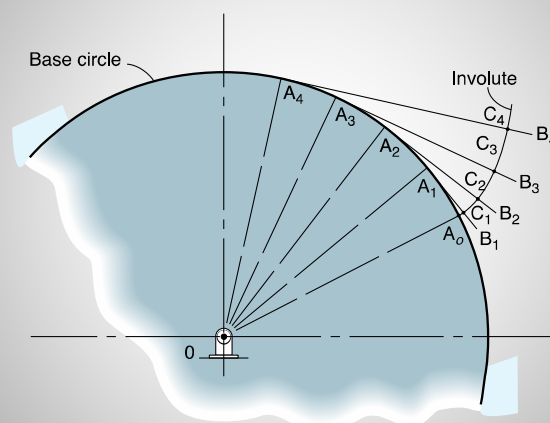
J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca



ELSEVIER

Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Perfil evolvental



Elementos de Máquinas

J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca

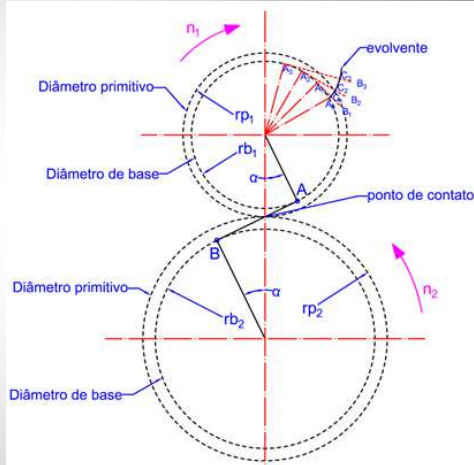


ELSEVIER

Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Partes componentes

- Diâmetro primitivo = diâmetro imaginário que relaciona o número de dentes com o módulo de fabricação da engrenagem (sistema módulo métrico).
- Diâmetro externo (ou de cabeça)
- Diâmetro interno (ou de raiz) -



Elementos de Máquinas

J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca

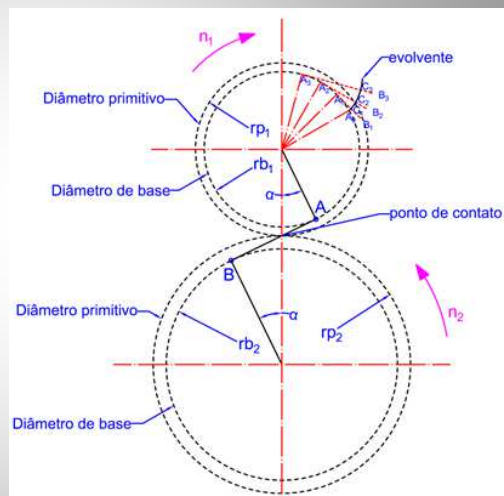


ELSEVIER

Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Partes componentes

- Linha de ação = o lugar geométrico dos pontos de contato dos dentes durante o engrenamento.



Elementos de Máquinas

J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca



ELSEVIER

Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Partes componentes

Passo frontal = distância consecutiva entre dois dentes adjacentes, medida em arco sobre o círculo primitivo.

Vão entre os dentes = distância equivalente à metade do passo.

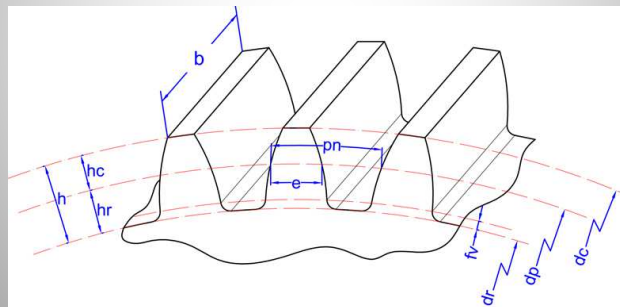


Fig. 11.3

Elementos de Máquinas

J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca



ELSEVIER

Capítulo 11 – Engrenagens Retas

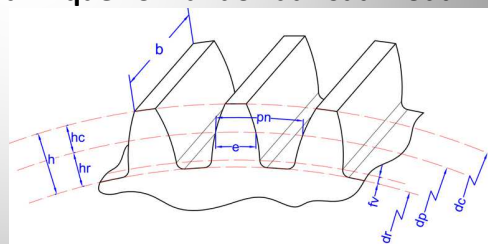
Partes componentes

Altura total do dente = distância medida entre os diâmetros ou círculos de raiz e de cabeça, com as correspondentes alturas de cabeça e de raiz (ou de pé) do dente.

Folga de fundo = distância que permite que o dente de uma engrenagem não toque ou danifique o fundo da sua roda conjugada.

Profundidade (ou largura):

$$8m \leq b \leq 16m$$



Elementos de Máquinas

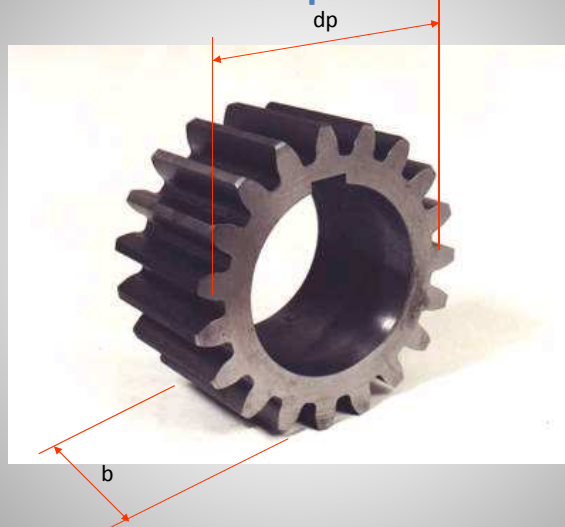
J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca



ELSEVIER

Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Partes componentes



Elementos de Máquinas

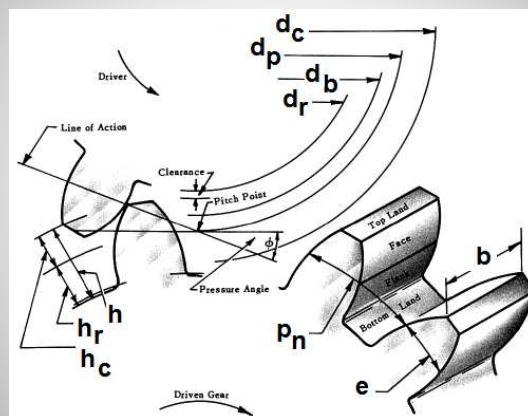
J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca



ELSEVIER

Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Partes componentes



Elementos de Máquinas

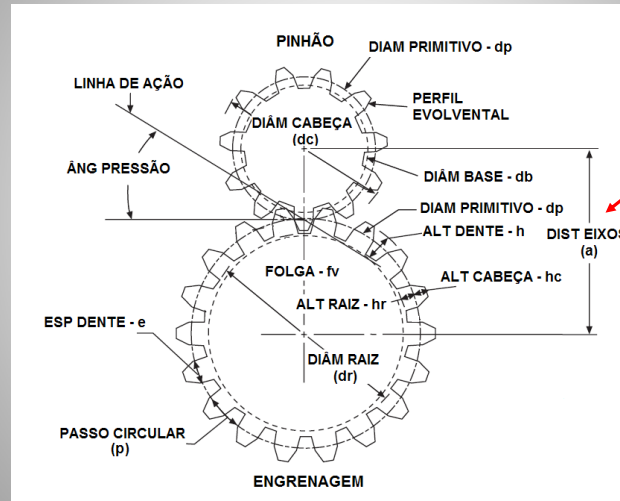
J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca



ELSEVIER

Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Partes componentes



Elementos de Máquinas

J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca



ELSEVIER

Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Módulo métrico

Parâmetro padronizado correspondente a uma referência para dimensionamento de engrenagens no sistema internacional, sendo responsável diretamente pelo tamanho do dente.

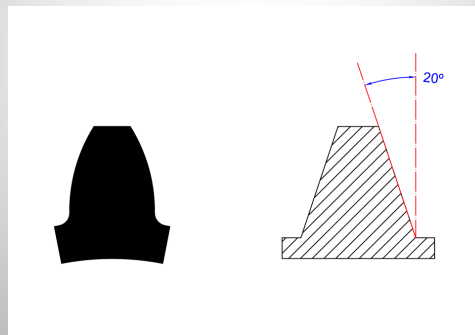


Fig. 11.4

Elementos de Máquinas

J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca

Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Módulo métrico

Medido em milímetros, é diretamente associado à ferramenta de usinagem correspondente. Tais ferramentas, normalmente designadas como cremalheiras tipo ou padrão apresentam inclinações laterais também diferenciadas e padronizadas em ângulos de 14,5°, 17,5°, 20° e 25° (ângulos de pressão).

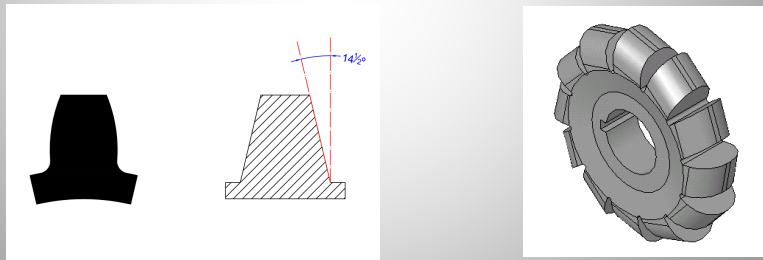


Fig. 11.4

Elementos de Máquinas

J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca



ELSEVIER

Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Módulo métrico

Tabela 11.2 Módulo métrico e diametral Pitch padronizados – valores preferenciais

Módulos (mm)

1,0; 1,25; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10,0; 12,0; 16,0; 20,0; 25,0; 32,0; 40,0; 50,0

Diametral Pitch (dentes/in)

2; 2 1/4; 2 1/2; 3; 4; 6; 8; 10; 12; 16

Módulo x Diametral Pitch

Elementos de Máquinas

J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca



ELSEVIER

Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Interferência

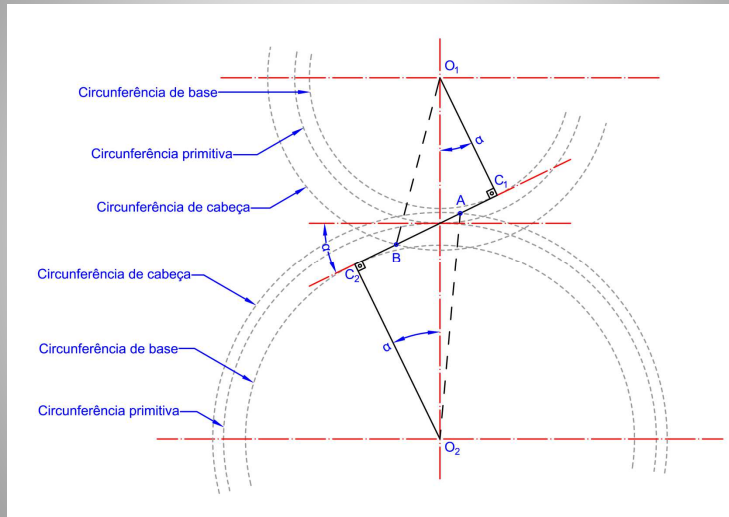


Fig. 11.5

Elementos de Máquinas

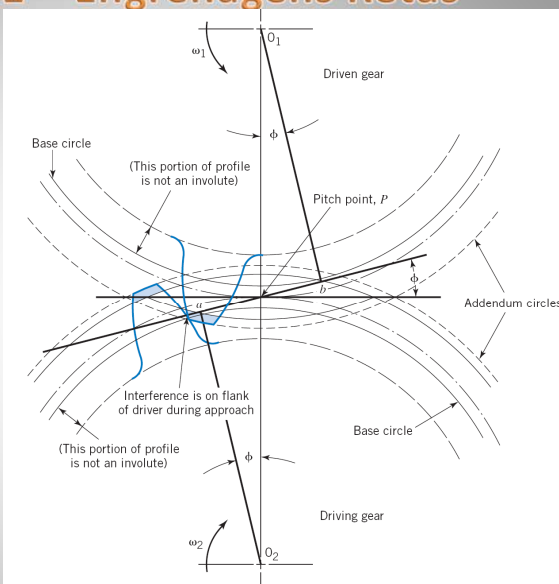
J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca



ELSEVIER

Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Interferência



Elementos de Máquinas

J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca



ELSEVIER

Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Interferência

$$z_1^2 + 2z_1z_2 = \frac{4k(z_2 + k)}{\text{sen}^2\alpha}$$

$$z_2 = \frac{z_1^2 \text{sen}^2\alpha - 4k^2}{4k - 2z_1 \text{sen}^2\alpha}$$

$$z_1 = \frac{2k}{\text{sen}^2\alpha}$$

- número mínimo de dentes para não haver interferência, quando em contato com uma determinada coroa.

- número máximo de dentes para não haver interferência, quando em contato com um determinado pinhão.

- menor número de dentes para um pinhão engrenar sem interferência, quando em contato com uma cremalheira.

Elementos de Máquinas

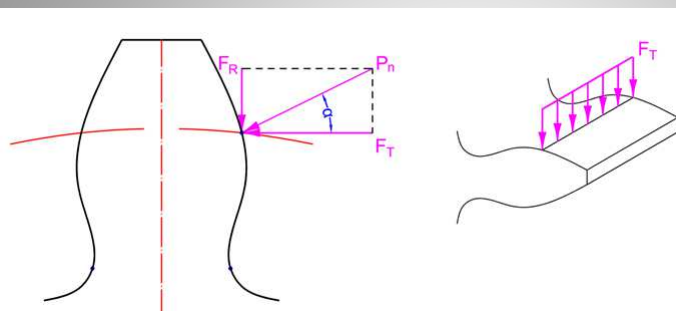
J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca



ELSEVIER

Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Esforços atuantes



$$F_R = F_T \cdot \text{tg}\alpha$$

Fig. 11.6

Elementos de Máquinas

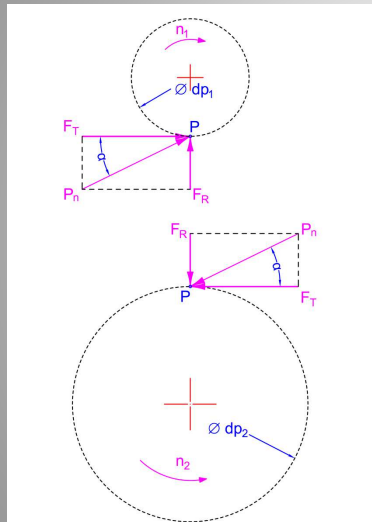
J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca



ELSEVIER

Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Esforços atuantes



(a) componente radial - estará sempre voltada para o centro da roda considerada;

(b) componente tangencial - deverá ser avaliada em termos de ação sobre a roda movida e reação sobre a roda motora do par (3ª Lei de Newton).

Fig. 11.7

Elementos de Máquinas

J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca

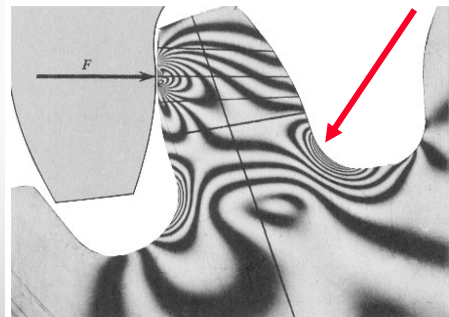


ELSEVIER

Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Tipos de falhas de engrenagens

Falha por flexão dos dentes - presente quando a tensão atuante nos dentes da engrenagem igualar-se ou exceder à resistência ao escoamento ou ao limite de resistência à fadiga por flexão. Trata-se do critério da resistência.



Elementos de Máquinas

J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca

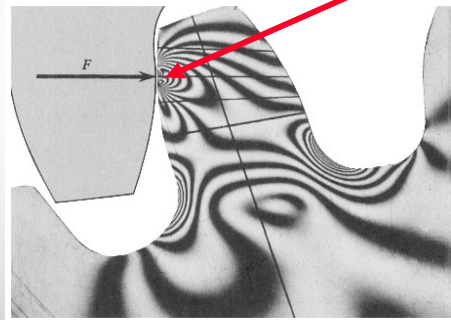


ELSEVIER

Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Tipos de falhas de engrenagens

Falha superficial por crateração - presente quando a tensão de contato igualar-se ou exceder ao limite de resistência à fadiga superficial do dente. Trata-se do critério da pressão.



Elementos de Máquinas
J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca



Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Dimensionamento

Critério da Resistência – Equação de Lewis - *Wilfred Lewis propôs no ano de 1892, o equacionamento matemático precursor para o projeto de engrenagens. Para tal, o mesmo considerou o dente de uma engrenagem reta como sendo uma viga engastada:*

$$\sigma = \frac{K_o F_T}{bYm} \leq \frac{\sigma_{esc}}{CS}$$

Y = fator de forma de Lewis

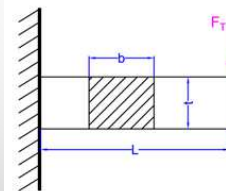
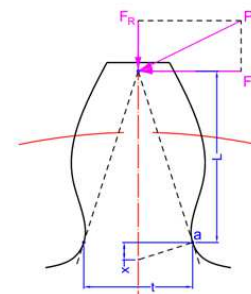


Fig. 11.8



Elementos de Máquinas
J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca



Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Tabela 11.4 Fator de forma de Lewis (Adaptado a partir de Bostongear.)

z	Y ($\alpha = 14,5^\circ$)	Y ($\alpha = 20^\circ$)	z	Y ($\alpha = 14,5^\circ$)	Y ($\alpha = 20^\circ$)
10	0,176	0,201	34	0,325	0,370
11	0,192	0,226	36	0,329	0,377
12	0,210	0,245	38	0,332	0,383
13	0,223	0,264	40	0,336	0,389
14	0,236	0,276	45	0,340	0,399
15	0,245	0,289	50	0,346	0,408
16	0,255	0,295	55	0,352	0,415
17	0,264	0,302	60	0,355	0,421
18	0,270	0,308	65	0,358	0,425
19	0,277	0,314	70	0,360	0,429
20	0,283	0,320	75	0,361	0,433
22	0,292	0,330	80	0,363	0,436
24	0,302	0,337	90	0,366	0,442
26	0,308	0,344	100	0,368	0,446
28	0,314	0,352	150	0,375	0,458
30	0,318	0,358	200	0,378	0,463
32	0,322	0,364	300	0,382	0,471
			rack	0,390	0,484

(a) para número de dentes não disponíveis na forma tabelada, considerar uma interpolação linear para obtenção dos fatores de forma correspondentes;
(b) o termo "rack" significa cremalheira.

Elementos de Máquinas

J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca



ELSEVIER

Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Dimensionamento

Crítério da Resistência – Equação AGMA -

$$\sigma_{AGMA} = K_o F_T K_V K_s \frac{1}{bm} \frac{K_m K_B}{J}$$

K_o = fator de sobrecarga ou de serviço;

K_V = fator de velocidade ou dinâmico;

K_s = fator de tamanho;

K_m = fator de distribuição de carga;

K_B = fator de borda;

J = fator geométrico AGMA.

Elementos de Máquinas

J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca



ELSEVIER

Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Dimensionamento

Fator de sobrecarga (serviço)

Tabela 11.5 Fator sobrecarga ou de serviço – K_o (Adaptado a partir de Juvinall.)

Fonte de potência (tipo de acionamento)	Equipamento acionado		
	cargas uniformes	choques moderados	choques intensos
acionamento uniforme	1,00	1,25	1,75
acionamento leve	1,25	1,50	2,00
acionamento médio	1,50	1,75	2,25

$$\sigma_{AGMA} = K_o F_T K_V K_s \frac{1}{bm} \frac{K_m K_B}{J}$$

Elementos de Máquinas

J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca



ELSEVIER

Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Dimensionamento

Fator de velocidade (dinâmico)

$$K_V = \left(\frac{A + \sqrt{200v}}{A} \right)^B$$

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

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

v = velocidade tangencial (em m/s);

Q_v = número de qualidade AGMA.

$$\sigma_{AGMA} = K_o F_T K_V K_s \frac{1}{bm} \frac{K_m K_B}{J}$$

Elementos de Máquinas

J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca



ELSEVIER

Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Dimensionamento

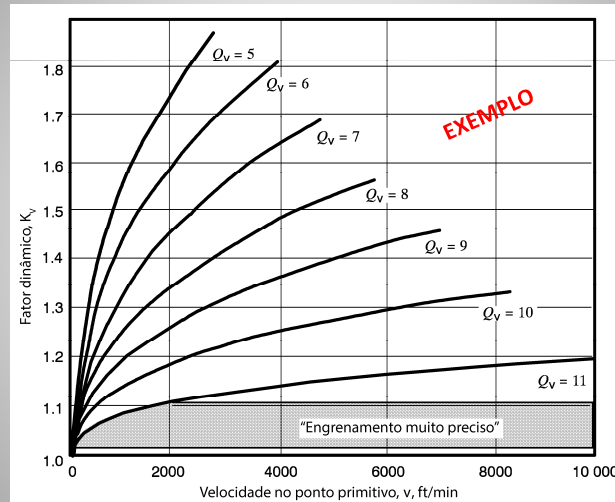


Fig. 11.9

Elementos de Máquinas

J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca



ELSEVIER

Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Dimensionamento

Fator de tamanho

$$K_s = 1,192 \left(\frac{b\sqrt{Y}}{P} \right)^{0,0525}$$

P = diametral *Pitch* (dentes/in);

b = largura da engrenagem (em in, nesse caso).

$$\sigma_{AGMA} = K_o F_T K_v K_s \frac{1}{bm} \frac{K_m K_B}{J}$$

Elementos de Máquinas

J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca



ELSEVIER

Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Dimensionamento

Fator de distribuição de carga

Tabela 11.6 Fator de distribuição de carga – K_m (Adaptado a partir de Santos Jr.)

Características da montagem do sistema	Largura da engrenagem (mm)		
	0 a 50,0	até 150	até 225
Montagens precisas, pequena folga nos mancais, deflexões mínimas e engrenagens de precisão	1,3	1,4	1,5
Média precisão, tanto na montagem quanto nas próprias engrenagens	1,6	1,7	1,8
Pouca precisão, tanto na montagem quanto nas próprias engrenagens	acima de 2,2		

$$\sigma_{AGMA} = K_o F_T K_V K_s \frac{1}{bm} \frac{K_m K_B}{J}$$

Elementos de Máquinas

J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca



ELSEVIER

Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Dimensionamento

Fator de borda

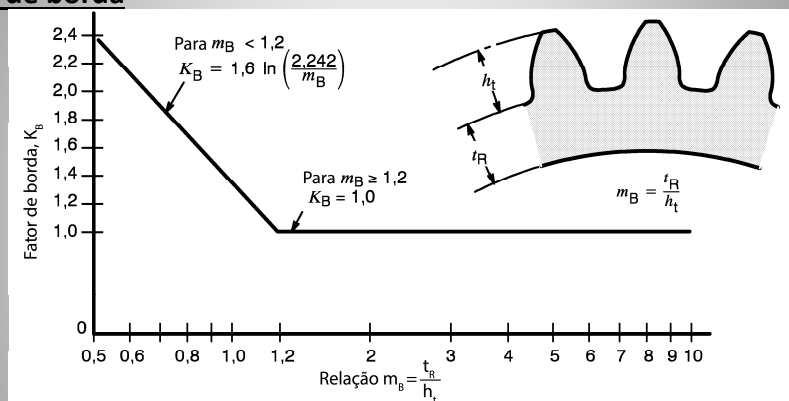


Fig. 11.10

$$\sigma_{AGMA} = K_o F_T K_V K_s \frac{1}{bm} \frac{K_m K_B}{J}$$

Elementos de Máquinas

J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca

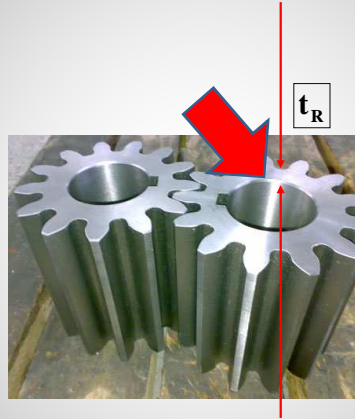


ELSEVIER

Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Dimensionamento

Fator de borda



Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Dimensionamento

Fator geométrico

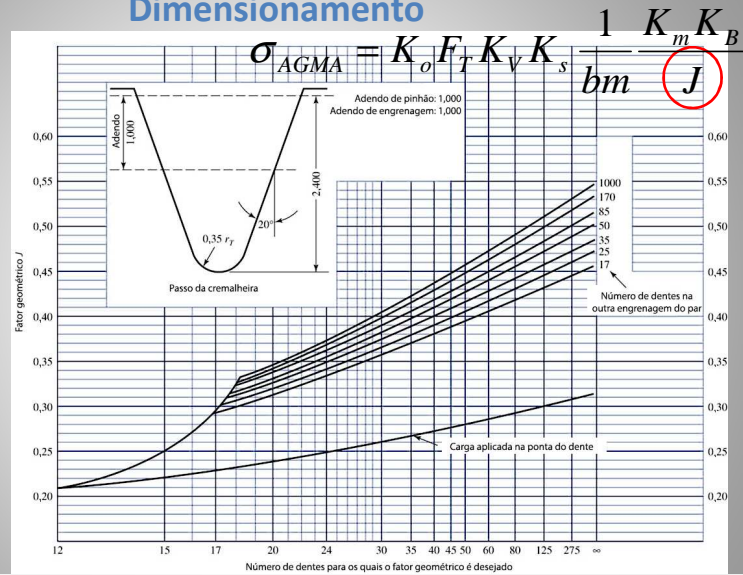


Fig. 11.11

Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Dimensionamento

Critério da Resistência – Fadiga de flexão -

$$CS_F = \frac{S_t Y_N}{Y_\theta Y_Z \sigma_{AGMA}} \geq 1,5$$

S_t = tensão admissível de flexão AGMA;

Y_N = fator de ciclos ou de ciclagem;

Y_θ = fator de temperatura;

Y_Z = fator de confiabilidade.

Elementos de Máquinas

J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca



ELSEVIER

Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Dimensionamento

Tensão admissível de flexão AGMA -

$$CS_F = \frac{S_t Y_N}{Y_\theta Y_Z \sigma_{AGMA}} \geq 1,5$$

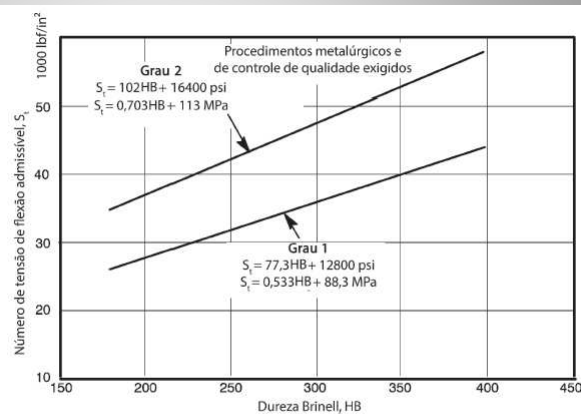


FIGURA 11.12 Tensão admissível de flexão AGMA para aços endurecidos por completo – St. Extracted from AGMA Standard ANSI/AGMA 2001-DO4, Fundamental Rating Factors and Calculation Methods for Involute Spur and Helical Gear Teeth, with permission of the publisher, the American Gear Manufacturers Association, 1001 North Fairfax Street, 5th Floor, Alexandria, Virginia 22314.

Elementos de Máquinas

J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca



ELSEVIER

Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Dimensionamento

Tensão admissível de flexão AGMA -

$$CS_F = \frac{S_t Y_N}{Y_\theta Y_Z \sigma_{AGMA}} \geq 1,5$$

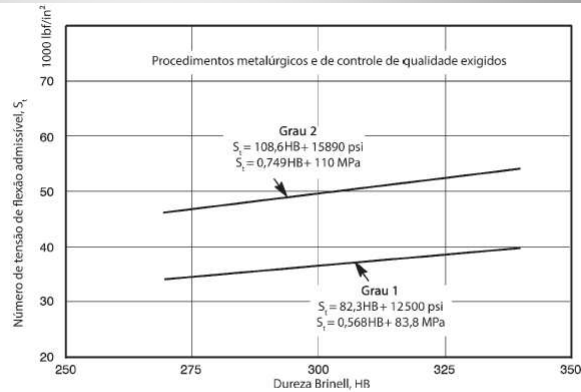


FIGURA 11.13 Tensão admissível de flexão AGMA para aços endurecidos por nitretação – St. Extracted from AGMA Standard ANSI/AGMA 2001-D04, Fundamental Rating Factors and Calculation Methods for Involute Spur and Helical Gear Teeth, with permission of the publisher, the American Gear Manufacturers Association, 1001 North Fairfax Street, 5th Floor, Alexandria, Virginia 22314.

Elementos de Máquinas

J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca



ELSEVIER

Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Dimensionamento

Tensão admissível de flexão AGMA -

$$CS_F = \frac{S_t Y_N}{Y_\theta Y_Z \sigma_{AGMA}} \geq 1,5$$

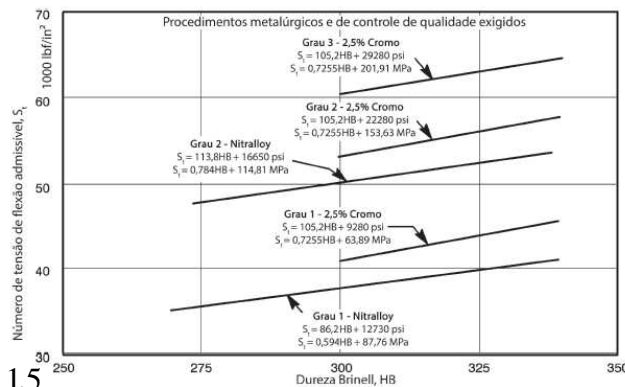


FIGURA 11.14 Tensão admissível de flexão AGMA para aços nitretados – St. Extracted from AGMA Standard ANSI/AGMA 2001-D04, Fundamental Rating Factors and Calculation Methods for Involute Spur and Helical Gear Teeth, with permission of the publisher, the American Gear Manufacturers Association, 1001 North Fairfax Street, 5th Floor, Alexandria, Virginia 22314.

Elementos de Máquinas

J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca



ELSEVIER

Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Dimensionamento

Tensão admissível de flexão AGMA -

$$CS_F = \frac{S_t Y_N}{Y_\theta Y_Z \sigma_{AGMA}} \geq 1,5$$

Tabela 11.7 Tensão admissível de flexão AGMA para aços carbono - S_t . (Extracted from AGMA Standard ANSI/AGMA 2001-D04, Fundamental Rating Factors and Calculation Methods for Involute Spur and Helical Gear Teeth, with permission of the publisher, the American Gear Manufacturers Association, 1001 North Fairfax Street, 5th Floor, Alexandria, Virginia 22314)

Designação do material	Tratamento térmico	Dureza superficial mínima	Tensão admissível de flexão AGMA (lbf/in ²)		
			Grau 1	Grau 2	Grau 3
Aço carbono	endurecido por completo	(a)	(a)	(a)	-
	endurecido por chama/indução - padrão de dureza tipo A	(e)	45000	55000	-
	endurecido por chama/indução - padrão de dureza tipo B	(e)	22000	22000	-
	carbonetado e endurecido	(f)	55000	65000 a 70000	75000
Aço para nitretação (c)	nitretado	83,5 HR 15N	(b)	(b)	-
	nitretado	87,5 HR 15N	(d)	(d)	(d)

a) consultar Figura 11.12;
 b) consultar Figura 11.13;
 c) nitralloy 134M, nitralloy N e 2,5% cromo;
 d) consultar Figura 11.14;
 e) conforme Tabela 8 da ANSI/AGMA 2001-D04;
 f) conforme Tabela 9 da ANSI/AGMA 2001-D04.

Elementos de Máquinas

J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca



ELSEVIER

Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Dimensionamento

Tensão admissível de flexão AGMA -

$$CS_F = \frac{S_t Y_N}{Y_\theta Y_Z \sigma_{AGMA}} \geq 1,5$$

Tabela 11.8 Tensão admissível de flexão AGMA para ferros fundidos e bronzes- S_t . (Extracted from AGMA Standard ANSI/AGMA 2001-D04, Fundamental Rating Factors and Calculation Methods for Involute Spur and Helical Gear Teeth, with permission of the publisher, the American Gear Manufacturers Association, 1001 North Fairfax Street, 5th Floor, Alexandria, Virginia 22314)

Material	Designação do material	Tratamento térmico	Dureza superficial mínima	Tensão admissível de contato AGMA (lbf/in ²)
Ferro fundido cinzento - ASTM A48	Classe 20	como fundido	-	5000
	Classe 30	como fundido	174HB	8500
	Classe 40	como fundido	201HB	13000
Ferro fundido dúctil - ASTM A536	Grau 60-40-18	recozido	140HB	22000 a 33000
	Grau 80-55-06	temperado/ revenido	179HB	22000 a 33000
	Grau 100-70-03	temperado/ revenido	229HB	27000 a 40000
	Grau 120-90-02	temperado/ revenido	269HB	31000 a 44000
Bronze	-	fundido em areia	(a)	5700
	ASTM B-148 liga 954	tratado termicamente	(b)	23600

a) resistência à tração mínima de 40000 psi;
 b) resistência à tração mínima de 90000 psi.

Elementos de Máquinas

J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca



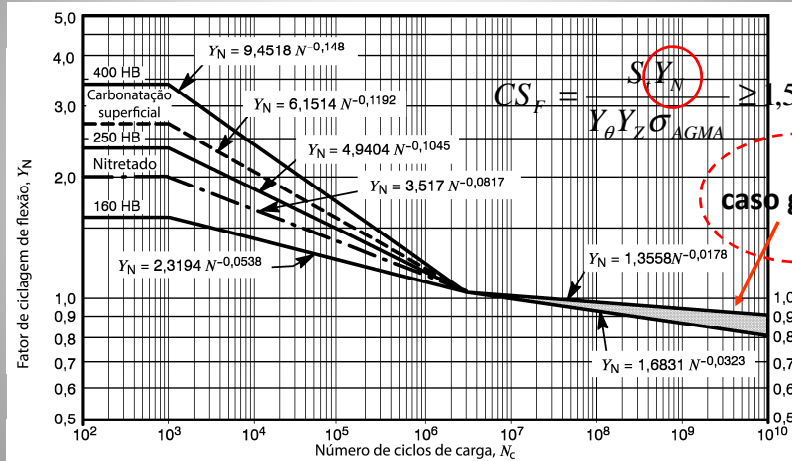
ELSEVIER

Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Dimensionamento

Fator de ciclos (ciclagem)

Fig. 11.15



Elementos de Máquinas

J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca



ELSEVIER

Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Dimensionamento

Fator de temperatura

$$Y_{\theta} = 1 \quad \rightarrow \theta \leq 120^{\circ} C$$

$$Y_{\theta} = \frac{273 + \theta}{393} \quad \rightarrow \theta > 120^{\circ} C$$

$$CS_F = \frac{S_t Y_N}{Y_{\theta} Y_Z \sigma_{AGMA}} \geq 1,5$$

Elementos de Máquinas

J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca



ELSEVIER

Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Dimensionamento

Fator de confiabilidade

$$Y_Z = 0,658 - 0,0759 \ln(1 - R) \quad \rightarrow 0,5 < R < 0,99$$

$$Y_Z = 0,5 - 0,109 \ln(1 - R) \quad \rightarrow 0,99 < R < 0,9999$$

$$CS_F = \frac{S_t Y_N}{Y_\theta Y_Z \sigma_{AGMA}} \geq 1,5$$

Elementos de Máquinas

J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca



ELSEVIER

Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Dimensionamento

Critério da Pressão – Equação AGMA -

$$\sigma_C = C_p \sqrt{K_o F_T K_V K_s \frac{K_m}{bdp_1 I}}$$

C_p = coeficiente elástico;

I = fator geométrico para resistência à formação de cavidades.

Elementos de Máquinas

J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca



ELSEVIER

Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Dimensionamento

Coefficiente elástico

$$C_p = 10^{-3} \sqrt{\frac{1}{\pi \left[\frac{(1-\nu_1^2)}{E_1} + \frac{(1-\nu_2^2)}{E_2} \right]}} \quad (\sqrt{\text{MPa}})$$

Atenção especial deve ser dada a unidade deste coeficiente, “raiz de MPa”, no caso.

$$\sigma_C = C_p \sqrt{K_o F_T K_V K_s \frac{K_m}{bdp_1 I}}$$

Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Dimensionamento

Fator geométrico para resistência à formação de cavidades

$$I = \frac{\cos \alpha \operatorname{sen} \alpha}{2} \frac{i}{i+1}$$

$$\sigma_C = C_p \sqrt{K_o F_T K_V K_s \frac{K_m}{bdp_1 I}}$$

Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Dimensionamento

Critério da Pressão – Fadiga de contato -

$$CS_C = \frac{S_C Z_N C_H}{Y_\theta Y_Z \sigma_C} \geq 1,0$$

S_C = tensão admissível de contato AGMA;

Z_N = fator de ciclos ou de ciclagem para resistência ao crateramento;

C_H = fator de razão de dureza para a resistência à formação de cavidades.

Elementos de Máquinas

J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca



ELSEVIER

Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Dimensionamento

Tensão admissível de contato AGMA -

$$CS_C = \frac{S_C Z_N C_H}{Y_\theta Y_Z \sigma_C} \geq 1,0$$

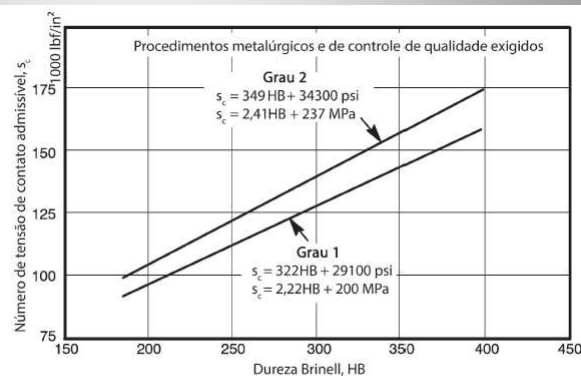


FIGURA 11.16 Tensão admissível de contato AGMA para aços endurecidos por completo – SC. Extracted from AGMA Standard ANSI/AGMA 2001-DO4, Fundamental Rating Factors and Calculation Methods for Involute Spur and Helical Gear Teeth, with permission of the publisher, the American Gear Manufacturers Association, 1001 North Fairfax Street, 5th Floor, Alexandria, Virginia 22314.

Elementos de Máquinas

J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca



ELSEVIER

Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Dimensionamento

Tensão admissível de contato AGMA -

$$CS_C = \frac{S_C Z_N C_H}{Y_\theta Y_Z \sigma_C} \geq 1,0$$

Tabela 11.9 Tensão admissível de contato AGMA para aços carbono – S_C . (Extracted from AGMA Standard ANSI/AGMA 2001-D04, Fundamental Rating Factors and Calculation Methods for Involute Spur and Helical Gear Teeth, with permission of the publisher, the American Gear Manufacturers Association, 1001 North Fairfax Street, 5th Floor, Alexandria, Virginia 22314)

Designação do material	Tratamento térmico	Dureza superficial mínima	Tensão admissível de flexão AGMA (lbf/in ²)		
			Grau 1	Grau 2	Grau 3
Aço carbono	endurecido por completo	(a)	(a)	(a)	–
	endurecido por chama/indução	50 HRC	170000	190000	–
	endurecido por chama/indução	54 HRC	175000	195000	–
	carbonetado e endurecido	(b)	180000	225000	275000
	nitretado	83,5 HR 15N	150000	163000	175000
2,5% de cromo	nitretado	84,5 HR 15N	155000	168000	180000
	nitretado	87,5 HR 15N	155000	172000	189000
Nitralloy 135M	nitretado	90,0 HR 15N	170000	183000	195000
Nitralloy N	nitretado	90,0 HR 15N	172000	188000	205000

a) consultar Figura 11.16;

b) conforme Tabela 9 da ANSI/AGMA 2001-D04.

Elementos de Máquinas

J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca



ELSEVIER

Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Dimensionamento

Tensão admissível de contato AGMA -

$$CS_C = \frac{S_C Z_N C_H}{Y_\theta Y_Z \sigma_C} \geq 1,0$$

Tabela 11.10 Tensão admissível de contato AGMA para ferros fundidos e bronzes – S_C . (Extracted from AGMA Standard ANSI/AGMA 2001-D04, Fundamental Rating Factors and Calculation Methods for Involute Spur and Helical Gear Teeth, with permission of the publisher, the American Gear Manufacturers Association, 1001 North Fairfax Street, 5th Floor, Alexandria, Virginia 22314)

Material	Designação do material	Tratamento térmico	Dureza superficial mínima	Tensão admissível de contato AGMA (lbf/in ²)
Ferro fundido cinzento - ASTM A48	Classe 20	como fundido	–	50000 a 60000
	Classe 30	como fundido	174	65000 a 75000
	Classe 40	como fundido	201	75000 a 85000
	Grau 60-40-18	recozido	140	77000 a 92000
	Grau 80-55-06	temperado/ revenido	179	77000 a 92000
Ferro fundido dúctil - ASTM A536	Grau 100-70-03	temperado/ revenido	229	92000 a 112000
	Grau 120-90-02	temperado/ revenido	269	103000 a 126000
	–	fundido em areia	(a)	30000
Bronze	ASTM B-148	tratado	(b)	65000
	liga 954	termicamente		

a) resistência à tração mínima de 40000 psi;

b) resistência à tração mínima de 90000 psi.

Elementos de Máquinas

J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca

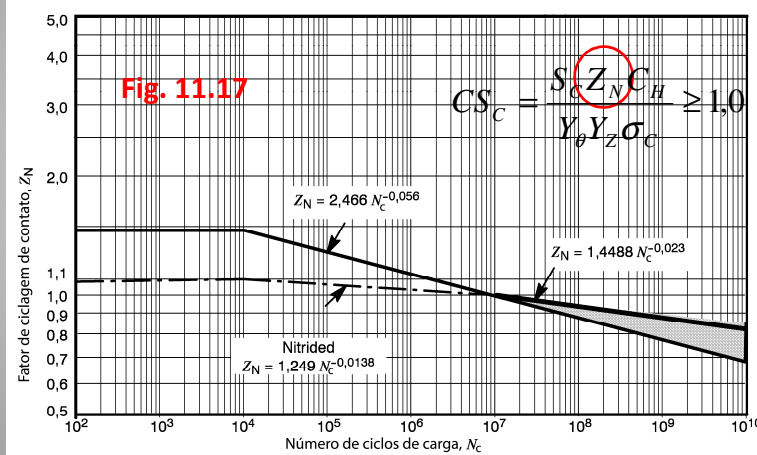


ELSEVIER

Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Dimensionamento

Fator de ciclos (ciclagem) para resistência ao crateramento



Elementos de Máquinas

J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca



ELSEVIER

Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Dimensionamento

Fator de razão de dureza para resistência à formação de cavidades

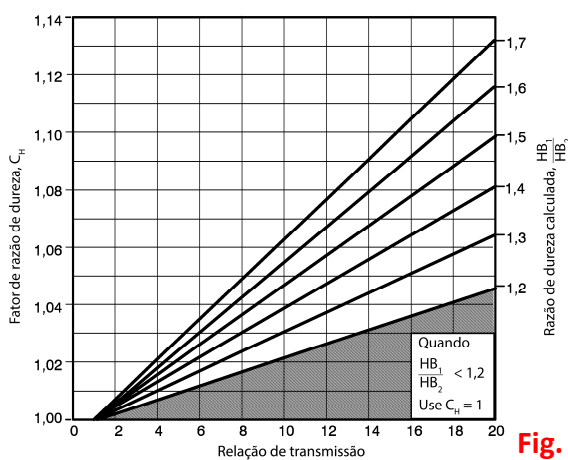


Fig. 11.18

$$CS_C = \frac{S_C Z_N C_H}{Y_\theta Y_Z \sigma_C} \geq 1,0$$

aplicável apenas para o caso da coroa!

Elementos de Máquinas

J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca



ELSEVIER

Capítulo 11 – Engrenagens Retas

Referências bibliográficas

ANSI/AGMA 2001-D04– *Fundamental Rating Factors and Calculation Methods for Involute Spur and Helical Gear Teeth* , American National Standard.

Budynas RG, Nisbett JK. *Shigley's – Mechanical Engineering Design*. 8a ed. McGraw Hill; 2008 .

Budynas RG, Nisbett JK. *Elementos de Máquinas de Shigley*. 8a ed. AMGH Editora Ltda; 2011.

Hamrock BJ, Schmid SR. *Fundamentals of Machine Elements* . 2ª ed. McGraw Hill; 2004.

Juvinall, R.C. and Marshek, K.M., 2007. *Fundamentos do Projeto de Componentes de Máquinas* , Livros Técnicos e Científicos – LTC, Rio de Janeiro, RJ.

Santos Jr AA. *Engrenagens cilíndricas de dentes retos - Apostila para os cursos Sistemas Mecânicos e Elementos de Máquinas* . Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP; 2003 .

www.bostongear.com

Elementos de Máquinas

J.C. Almeida, R. Barbieri, K. Fonseca



ELSEVIER