

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

**Sistema para Dimensionamento de
Engrenagens Cilíndricas de Dentes Retos
e Helicoidais Através da Norma BSI 436 -
Parte 3**

por CELSO AUGUSTO RUGGIERO DE OLIVEIRA

**Sistema para Dimensionamento de Engrenagens Cilíndricas de Dentes Retos e
Helicoidais Através da Norma BSI 436 - Parte 3**

Trabalho orientado pelo professor Ricardo Matone

ESCOLA POLITÉCNICA. SERVIÇO DE BIBLIOTECAS
Biblioteca de Engenharia Mecânica

Este trabalho é dedicado
aos meus pais Ana e Hermógenes,
meu irmão Ricardo e
minha namorada Carla.

Sem o seu apoio, incentivo, compreensão e carinho,
nada seria possível.

Prefácio

Tudo é impossível até que se prove o contrário.

Tenho vivido isto isto nos últimos anos, mas agora sinto a recompensa de todo o trabalho, bem ou mau feito, dos últimos anos.

Pensando agora nas noites de sono perdidas, das vezes em que deixamos amigos, parentes e namoradas angustiados pelas nossas frustrações medos e inseguranças, tenho a certeza de que nada foi em vão. Tudo teve sua razão de ser, mesmo que na maioria das vezes não tivéssemos plena noção disto.

Foram momentos difíceis, felizes, assustadores, decepcionantes e gratificantes, numa sucessão alucinante.

Não foi fácil!

Mas não foi impossível, e provamos isto.

Várias vezes nos passou pela cabeça as mais cruéis dúvidas. Será este o caminho certo? Isto tudo é realmente necessário?

Só o tempo poderá responder a estas perguntas.

Celso Augusto Ruggiero de Oliveira
São Paulo, 10 de dezembro de 1992.

Índice

Capítulo 1 - Conceitos básicos	1
1.1 Lei do engrenamento	2
1.2 Linha de engrenamento	4
Capítulo 2 - Engrenagens cilíndricas de dentes retos	5
2.1 Características geométricas	6
2.2 Correção de engrenagens	8
2.3 Grau de recobrimento	11
Capítulo 3 - Engrenagens cilíndricas de dentes helicoidais	12
3.1 Características geométricas	13
Capítulo 4 - Verificação das tensões de contato e flexão através da norma BS 436 part 3	14
4.1 Introdução	15
4.2 Escopo e campo de aplicação	15
4.3 Definições e símbolos	17
4.3.1 Símbolos	18
4.3.2 Índices	24
4.4 Procedimento de cálculo	25
4.5 Lubrificação	25
4.6 Dinâmica do sistema	25
4.7 Fatores de segurança	26
4.8 Equações básicas para os cálculos da tensão de contato	26
4.8.1 Tensão de contato admissível (sHP)	26
4.8.2 Tensão de contato atual calculada (sH)	26
4.8.3 Capacidade de potência e torque admissíveis baseados na tensão de contato (PHP e THP)	26
4.8.4 Capacidade de torque máxima para tensões de contato (THmax)	27
4.8.5 Força tangencial nominal para tensão de contato (FHt)	27

4.8.6 Fator de região para tensão de contato (ZH).....	28
4.8.7 Fator do coeficiente de contato para tensão de contato (Ze).....	29
4.8.8 Fator de elasticidade para tensão de contato (ZE).....	30
4.8.9 Limite de resistência básico para tensão de contato (SHlim).....	30
4.8.10 Fator de qualidade do material para tensão de contato (ZM).....	33
4.8.11 Fatores de influência do lubrificante, rugosidade e velocidade (ZL,ZR e Zv).....	33
4.8.12 Fator de endurecimento pelo trabalho para tensão de contato (ZW).....	34
4.8.13 Fator de tamanho para tensão de contato (ZX).....	36
4.8.14 Fator de vida para tensão de contato (ZN).....	36
4.8.15 Fator de aplicação (KA).....	37
4.8.16 Fator dinâmico (Kv).....	40
4.8.17 Valores do parâmetro auxiliar Qv.....	43
4.8.18 Fatores de carregamento da face e carregamento transversal para tensão de contato (KHb e KHa).....	43
4.8.19 Fatores de segurança mínimo e atual para tensão de contato (SHmin e SH).....	51
4.9 Equações básicas para tensão de flexão na raiz do dente.....	51
4.9.1 Tensão de flexão admissível (sFP).....	51
4.9.2 Tensão de flexão atual calculada (sF).....	51
4.9.3 Capacidade de potência e torque admissíveis baseados na tensão de flexão (PFP e TFP).....	52
4.9.4 Flexão abaixo da superfície em engrenagens com tratamento térmico superficial.....	52
4.9.5 Capacidade de torque máxima para tensão de flexão (TFmax).....	53
4.9.6 Força tangencial nominal para tensão de flexão (FFt).....	53
4.9.7 Fator de forma, de correção de tensão e de ângulo de hélice (YF, YS, e Yb).....	53
4.9.8 Fator de forma do dente (YF).....	56
4.9.9 Fator de correção de tensão (YS).....	56
4.9.10 Fator de correção de hélice (Yb).....	56
4.9.11 Limite de resistência básico para tensão de flexão (sFO).....	57

4.9.12 Fator de qualidade do material para tensão de flexão (YM).....	58
4.9.13 Fator de sensibilidade para tensão de flexão (Ydelta)	58
4.9.14 Fator de condição de superfície para tensão de flexão (YR).....	59
4.9.15 Fator de tamanho para tensão de flexão (YX)	60
4.9.16 Fator de vida para tensão de flexão (YN)	60
4.9.17 Fatores de carregamento para tensão de flexão (KF _a e KF _b).....	61
4.9.18 Fatores de segurança mínimo e atual para tensão na raiz do dente (SF _{min} e SF)	62
Capítulo 5 - Sistema para dimensionamento automático de engrenagens.....	64
5.1 Introdução	65
5.2 Dados de entrada	65
5.3 Dados de saída	66
5.4 Desenho	66
Apêndice I - Graus de Precisão de manufatura	67
Apêndice II - Graus de qualidade de materiais	69
II.1 Introdução	70
II.2 Especificações de qualidade	70
II.3 Comentários básicos sobre cada grau de qualidade.....	70
II.3.1 Qualidade C	70
II.3.2 Qualidade B	71
II.3.3 Qualidade A	71
Apêndice III - Tensões residuais típicas	72
III.1 Introdução	73
III.2 Cementação e têmpera	73
III.3 Aflação da engrenagem	73
III.4 Shot peening	73
Apêndice IV - Guia de projeto para modificações nos dentes.....	75

IV.1 Introdução.....	76
IV.2 Alívio das extremidades.....	76
IV.3 Correção de hélice.....	76
IV.4 Arredondamento.....	77
Apêndice V - Módulos normalizados.....	78
Apêndice VI - Equações dos gráficos do capítulo 4.....	80
VI.1 Equações para o gráfico da figura 4.1.....	81
VI.2 Equações para o gráfico da figura 4.2.....	81
VI.3 Equações para o gráfico da figura 4.3.....	81
VI.4 Equações para o gráfico da figura 4.4.....	82
VI.5 Equações para o gráfico da figura 4.5.....	82
VI.6 Equações para os gráficos da figura 4.6.....	82
VI.7 Equações para os gráficos da figura 4.7.....	82
VI.8 Equações para os gráficos da figura 4.8.....	82
VI.9 Dados para o gráfico da figura 4.10.....	84
VI.10 Dados para o gráfico da figura 4.11.....	84
VI.11 Equação para o gráfico da figura 4.13.....	85
VI.12 Equações para o gráfico da figura 4.16.....	85
VI.13 Equações para o gráfico da figura 4.17.....	85
VI.14 Equações para o gráfico da figura 4.18.....	86
VI.15 Equações para o gráfico da figura 4.19.....	86
VI.16 Equações para o gráfico da figura 4.20.....	86
VI.17 Equação para o gráfico da figura 4.21.....	87
Apêndice VII - Bibliografia.....	88
VIII.1 Bibliografia.....	89
Apêndice VIII - Listagem do programa.....	90

Capítulo 1
Conceitos básicos

1.1 Lei do engrenamento

A relação entre as velocidades angulares ω_1 e ω_2 das rodas 1 e 2 é chamada de relação de transmissão (i), onde:

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

sendo n_1 e n_2 as rotações dos eixos do pinhão e da coroa, respectivamente.

Essas rodas dentadas giram em torno dos centros O_1 e O_2 , de tal forma que seus flancos se tocam continuamente (figura 1.1).

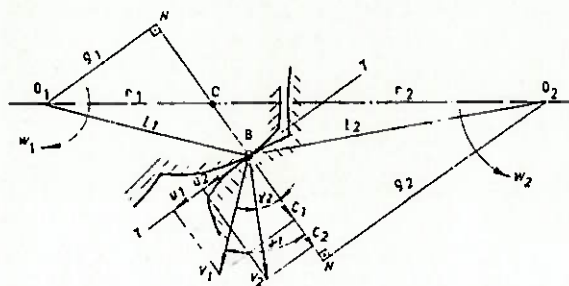


figura 1.1

O pinhão 1 gira com velocidade angular ω_1 e, no ponto de contato B dos flancos, transfere à coroa uma velocidade angular instantânea ω_2 .

Chamando de TT a tangente comum aos flancos no ponto B, NN a normal comum também em B, e, respectivamente l_1 e l_2 as distâncias de B a O_1 e O_2 e g_1 e g_2 as normais a NN desde O_1 e O_2 , a velocidade instantânea do pinhão e da coroa em B serão:

$$V_1 = \omega_1 \cdot l_1$$

e

$$V_2 = \omega_2 \cdot l_2$$

Projetando-se nas direções da tangente e normal comuns, teremos:

$$\frac{C_1}{V_1} = \frac{g_1}{l_1}$$

e

$$\frac{C_2}{V_2} = \frac{g_2}{l_2}$$

Sendo admitido que o pinhão e a coroa se tocam continuamente, deve-se fazer $C_1 = C_2$.

Portanto:

$$V_1 \cdot \frac{g_1}{l_1} = V_2 \cdot \frac{g_2}{l_2}$$

$$\omega_1 \cdot l_1 \cdot \frac{g_1}{l_1} = \omega_2 \cdot l_2 \cdot \frac{g_2}{l_2}$$

$$\omega_1 \cdot g_1 = \omega_2 \cdot g_2$$

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{g_1}{g_2}$$

Por semelhança de triângulos, temos:

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{g_1}{g_2}$$

Com isto, conclui-se que a relação de transmissão i é dada por:

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{r_1}{r_2} = \frac{g_1}{g_2}$$

Portanto, a lei do engrenamento pode ser enunciada da seguinte forma:

"Duas curvas quaisquer podem ser admitidas como flancos de dentes sempre que a normal comum às curvas em um ponto de contato qualquer passe continuamente por um ponto fixo, chamado de polo, que divide o segmento que une os centros na relação inversa das velocidades angulares".

Uma das curvas que atende a esta lei é a envolvente.

1.2 Linha de engrenamento

Auxiliado pela lei do engrenamento, pode-se afirmar que um ponto qualquer do flanco de um determinado dente do pinhão (E_1) entrará em contato com um outro ponto (E_2) do flanco do dente da coroa quando a normal comum a esses flancos passar por C (figura 1.2).

A linha de engrenamento é o lugar geométrico de todos os pontos de engrenamento de um par de flancos em contato.

De acordo com essa afirmação, é possível, dado um dos flancos e mais os círculos primitivos 1 e 2, construir geometricamente (por sucessão de pontos) a linha de engrenamento e o contra flanco (2). (figura 1.2)

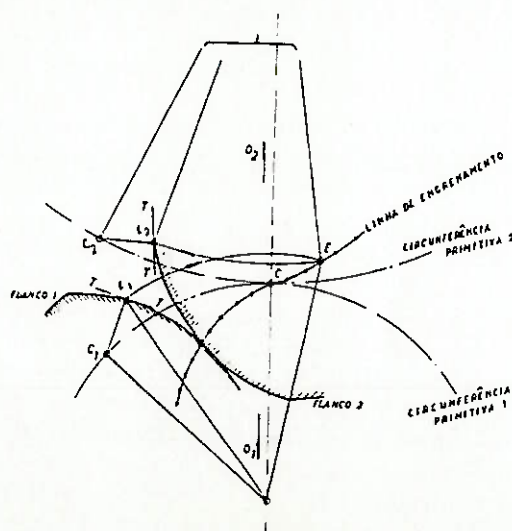


figura 1.2

Capítulo 2

Engrenagens cilíndricas de dentes retos

2.1 Características geométricas

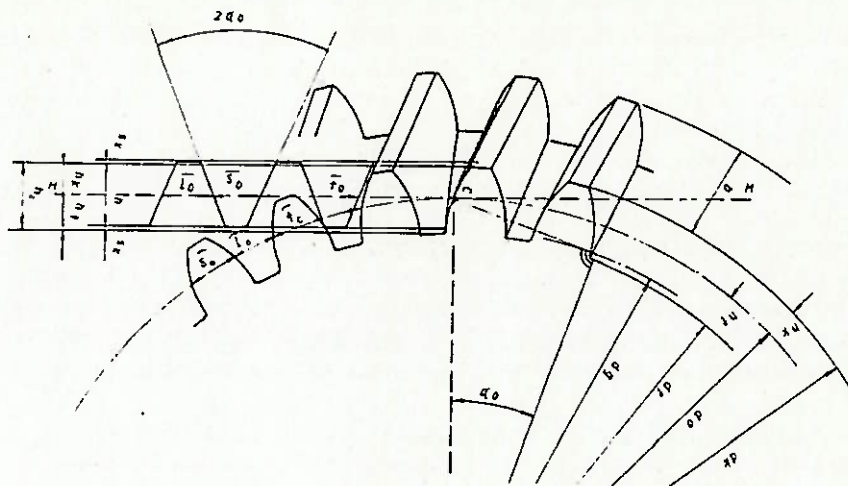


figura 2.1 Engrenagem normal de perfil envolvente

Para engrenagens cilíndricas de dentes retos, podemos definir, como se segue, algumas características geométricas.

- número de dentes:

$$z = \frac{d_0}{m}$$

- módulo:

$$m = \frac{p_0}{\pi} = \frac{d_0}{z}$$

- passo:

$$p_0 = m \cdot \pi$$

- espessura do dente no diâmetro primitivo:

$$s_0 = \frac{p_0}{2}$$

- vão entre os dentes no diâmetro primitivo:

$$l_0 = \frac{p_0}{2}$$

- diâmetro primitivo:

$$d_0 = m \cdot z \quad \text{ou} \quad d_{01} = \frac{2 \cdot a_0}{(i + 1)}$$

- distância entre centros:

$$a_0 = \frac{(d_{01} + d_{02})}{2} = \frac{(z_1 + z_2)}{2} \cdot m$$

- altura do dente:

$$h = 2.25 \cdot m$$

- adendo:

$$h_a = m$$

- dedendo:

$$h_f = 1.25 \cdot m$$

- folga da cabeça:

$$S_k = 0.25 \cdot m$$

- diâmetro de cabeça:

$$d_a = d_0 + 2 \cdot h_a = (z + 2) \cdot m$$

- diâmetro de pé:

$$d_f = d_0 - 2 \cdot h_f$$

- diâmetro de base:

$$d_b = d_o \cdot \cos(\alpha)$$

- ângulo de pressão:

$$\alpha = 20^\circ$$

- relação de transmissão:

$$i = \frac{z_2}{z_1} = \frac{d_{o2}}{d_{o1}} = \frac{n_1}{n_2}$$

- largura do dente:

$$b$$

- passo na linha de engrenamento:

$$p = p_o \cdot \cos(\alpha)$$

- grau de recobrimento:

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{r_{k1}^2 - r_{s1}^2} + \sqrt{r_{k2}^2 - r_{s2}^2} - a_o \cdot \cos(\alpha)}{p_o \cdot \cos(\alpha)}$$

2.2 Correção de engrenagens

Observando a figura 2.2, vemos o efeito que os deslocamentos da cremalheira geradora do perfil causam na forma geométrica do dente.

A notação positiva (+x.m) e a negativa (-x.m) determinam o recuo da ferramenta e o seu avanço, respectivamente. Este procedimento causará, naturalmente, as formas apresentadas na figura 2.2, e tem vital importância sob o ponto de vista do dimensionamento da engrenagem.

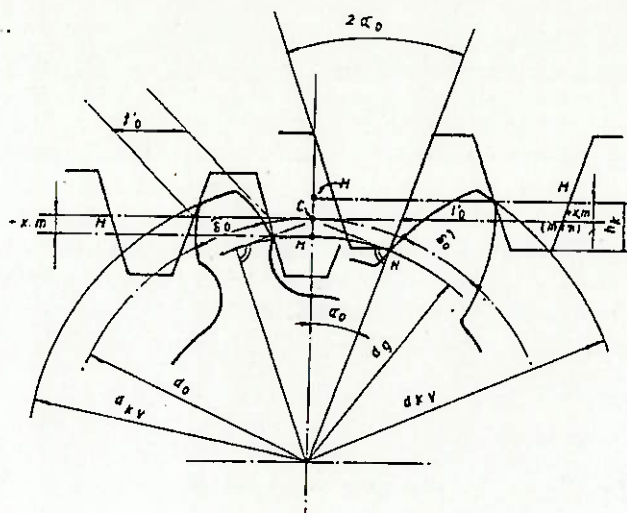


figura 2.2 Caracterização das correções positivas e negativas

Existem 3 possibilidades de engrenamento:

- engrenamento 0;
- engrenamento V0;
- engrenamento V.

No engrenamento 0 ocorre a condição de identidade entre a distância entre centros teórica e a distância entre centros de trabalho, admitida folga de flanco nula.

No engrenamento V0 ocorre que no par engrenado, o pinhão e a coroa serão corrigidos de tal forma que, a soma algébrica das correções será nula. Estas condições são justificadas para atender às condições de projeto e dimensionamento.

No engrenamento V, a distância entre centros calculada não confere com a de trabalho. Nesse caso, haverá a necessidade de se compensar essa diferença positiva ou negativa corrigindo-se somente o pinhão, somente a coroa, ou ambos.

Convém lembrar que existirá uma limitação no valor dessa correção em função do número de dentes. Sabemos que, independentemente da existência ou não da correção, existem limitações

geométricas e de geração de perfis que nos impõe um número mínimo de dentes para os engrenamentos em que o perfil do dente é uma curva envolvente.

As equações envolvidas na correção são:

- número mínimo de dentes do pinhão: 17;
- número mínimo de dentes levando-se em conta a correção: 7;
- ângulo de pressão corrigido:

$$\alpha_w = \arccos\left(\frac{a_0}{a_w} \cdot \cos(\alpha)\right)$$

- soma das correções:

$$x_1 + x_2 = \frac{(z_1 + z_2) \cdot (ev_{\alpha_w} - ev_{\alpha})}{2 \cdot \tan \alpha}$$

- folga:

$$folga = \alpha_w - \alpha$$

- diâmetro de base:

$$db = m \cdot z \cdot \cos(\alpha)$$

- diâmetro de cabeça:

$$da = 2 \cdot \left(m \cdot \left(\frac{z}{2} + 1 + x\right) - folga\right)$$

- diâmetro de pé:

$$df = 2 \cdot \left(m \cdot \left(\frac{z}{2} - 1.25 + x\right) - folga\right)$$

- adendo:

$$ha = m \cdot (1 + x) - folga$$

- dedendo:

$$hf = m \cdot (1.25 - x)$$

2.3 Grau de recobrimento

O grau de recobrimento é o número que expressa quantos pares de dentes estão engrenados simultaneamente, e deverá ser sempre maior ou igual a um, para não prejudicar a continuidade do engrenamento.

Capítulo 3

Engrenagens cilíndricas de dentes helicoidais

3.1 Características geométricas

Para as engrenagens cilíndricas de dentes helicoidais, podemos definir as seguintes características geométricas, além das definidas para as engrenagens cilíndricas de dentes retos:

- módulo transversal:

$$m_t = \frac{m}{\cos(\beta)}$$

- número de dentes:

$$z = \frac{d_o}{m_t}$$

- passo transversal:

$$p_t = m_t \cdot \pi$$

- passo normal:

$$p_n = m \cdot \pi$$

- espessura transversal do dente:

$$s_t = \frac{p_t}{2}$$

- espessura do dente normal:

$$s_n = \frac{p}{2}$$

- vão entre os dentes:

$$l = s$$

Capítulo 4

Verificação das tensões de contato e flexão através da norma BS 436 part 3

4.1 Introdução

A parte 3 da norma BS 436 da BSI (British Standards Institution) foi preparada sob a direção do Comitê de Normas para Maquinário de Componentes (Machinery and Components Standards Committee) da Inglaterra. É uma norma de aplicação geral para engrenagens cilíndricas de dentes retos e engrenagens cilíndricas de dentes helicoidais.

A norma segue os princípios desenvolvidos pela Organização Internacional para Normalização - ISO (International Organization for Standardization) nos quais os níveis de tensão na raiz e no flanco dos dentes das engrenagens são calculados e comparados com os índices de tensão admissíveis derivados de testes em corpos de prova simples.

Os fatores de correção usados para calcular os níveis de tensão são baseados nas propostas da ISO mas foram ajustados para evitar as funções de passo que aparecem nestas propostas.

Alguns procedimentos de cálculo de alguns fatores foram extraídos da Norma Internacional de Desenho ISO/DIS/6336/1, 2 e 3 (Draft International Standard ISO/DIS/6336/1, 2 and 3) - 'Cálculo de capacidade de carregamento em engrenagens cilíndricas de dentes retos e engrenagens cilíndricas de dentes helicoidais' (Calculation of load capacity of spur and helical gears).

4.2 Escopo e campo de aplicação

A parte 2 da norma BS 436 é uma norma de aplicação geral para engrenagens cilíndricas de dentes retos e engrenagens cilíndricas de dentes helicoidais com graus de precisão de manufatura entre 3 e 10, operando em qualquer velocidade na linha primitiva. Os cálculos incluídos nesta norma não são aplicáveis à determinação de falha de engrenagens por atrito, uso, soldagem ou fratura do anel, flange ou do cubo das engrenagens. Para informações sobre os graus de precisão de manufatura, consultar o apêndice I.

A norma cobre os métodos para a determinação das tensões de contato admissíveis e atuais e tensões de flexão em um par de engrenagens com perfil envolvente. Os níveis de tensão no flanco e na raiz dos dentes são calculados e comparados com os índices de tensão admissíveis derivados de testes em corpos de prova simples. Os fatores de correção são utilizados para levar em conta:

- os efeitos das variações dimensionais decorrentes da manufatura e da montagem;
- as vibrações decorrentes de fatores internos e externos ao engrenamento;
- o efeito do filme de lubrificante da rugosidade dos flancos das engrenagens;
- os efeitos de concentração de tensões na raiz dos dentes;

- os efeitos das diferentes profundidades de casca ou endurecimento superficial das engrenagens;
- os efeitos das tensões residuais de flexão no ciclo de tensão do flanco dos dentes;

Os tipos de engrenagens e suas qualificações a nível de projeto são as seguintes:

- (a) Tipos de engrenagens: engrenagens cilíndricas de dentes retos e engrenagens cilíndricas de dentes helicoidais.
- (b) Limites de velocidades: não existem restrições, mas notar que para velocidades inferiores a 1 m/s na linha primitiva, a capacidade de carregamento é limitada pelo desgaste.
- (c) Precisão de manufatura: são os graus de 3 a 10 da parte 2 da norma BS 436. Os cálculos dos fatores de correção de carregamento são baseados no maior desvio permitido para um particular grau de precisão de manufatura. Para informações sobre os graus de precisão de manufatura, consultar o apêndice I.
- (d) Limite do coeficiente de contato transversal: $1.2 \leq \epsilon_{\alpha} \leq 1.9$.
- (e) Limites do ângulo de hélice: $\beta \leq 45^{\circ}$.
- (f) Cremalheira básica: sem restrições.
- (g) Pinhão e eixo do pinhão: pinhão sólido ou vazado com $d_{f1}/d_{f1} \leq 0.5^{(1)}$.
- (h) Blank e aro da engrenagem: Blank sólido e volante fabricado ou fundido com espessura do aro abaixo da raiz maior que $3.5 m_n^{(1)}$.
- (i) Materiais:
 - (1) aços com tratamento térmico total;
 - (2) Aços com tratamento térmico superficial;
 - (3) Ferros fundidos;
 - (4) Bronze.

São ainda especificados 3 graus de qualidade do material e de sua produção. Para maiores detalhes consultar o apêndice II.

(1) Se as dimensões das engrenagens estiverem fora deste limite serão necessários cálculos adicionais para a verificação dos níveis de tensão na raiz dos dentes.

As tensões admissíveis são reduzidas pelo fator Z_M nas tensões de contato e Y_M nas tensões de flexão para materiais de baixa qualidade.

O efeito das tensões residuais na raiz dos dentes está incluído nesta norma. Os processos de endurecimento superficial, como por exemplo cementação, nitrificação e têmpera por indução, induzem a uma redução benéfica das tensões residuais na superfície balanceadas pelas tensões residuais na região de junção entre a casca e o núcleo. Afiação a superfície dos dentes após o endurecimento pode reduzir o nível redução de tensões, podendo deixar uma tensão residual na superfície. Uma redução das tensões residuais pode ser introduzida (ou re-introduzida após a afiação) através de um "shot peening" controlado.

Alguns valores típicos de tensões residuais resultantes de tratamentos térmicos adequados podem ser encontrados no apêndice III.

4.3 Definições e símbolos

- Profundidade efetiva de casca (c_{eff}). É a profundidade na qual a dureza cai abaixo de 500 HV para os casos de nitrificação e cementação ou 400 HV para o caso de têmpera por indução.
- Limite de resistência para tensões de contato (σ_{Hlim}). É a tensão de contato máxima que pode ser suportada durante um número infinito de ciclos sem a ocorrência de pitting.
- Profundidade limite de casca (c_{lim}). É a profundidade efetiva de casca além da qual qualquer acréscimo na profundidade de casca não produz nenhum aumento da resistência à falhas.
- Força tangencial nominal para tensões de flexão (F_F). É a força tangencial ao círculo primitivo e perpendicular aos seus geradores diretos.
- Força tangencial nominal para tensões de contato (F_H). É a força tangencial ao círculo primitivo e perpendicular aos seus geradores diretos.
- Capacidade de torque máximo para tensões de flexão (T_{Fmax}). É o torque que pode ser transmitido por até 1000 ciclos dos dentes durante a vida de projeto das engrenagens sem causar falhas por tensões de flexão.
- Capacidade de torque máximo para tensões de contato (T_{Hmax}). É o torque que pode ser transmitido por até 1000 ciclos dos dentes durante a vida de projeto das engrenagens sem causar falhas por tensões de contato.
- Constante de dureza do dente (c' e c_γ). É a força que deformará em $1\mu m$ um ou vários pares de dentes engrenados com uma largura de 1 mm.

4.3.1 Símbolos

Para os propósitos desta norma, os seguintes símbolos são utilizados:

Símbolo	Designação	Unidade
a	distância entre centros	mm
b	largura da engrenagem	mm
c_{eff}	profundidade efetiva de casca	mm
c'	dureza máxima do dente para um par de dentes na seção normal	N/(mm.μm)
c_y	valor médio de duraza total do dente para uma largura unitária	N/(mm.μm)
d	diâmetro primitivo	mm
d_a	diâmetro de cabeça	mm
d_{an}	diâmetro de cabeça virtual	mm
d_b	diâmetro de base	mm
d_{bn}	diâmetro de base virtual	mm
d_{en}	diâmetro virtual do ponto de contato mais alto de um simples par engrenado	mm
d_f	diâmetro de pé	mm
d_i	diâmetro interno	mm
d_m	diâmetro médio	mm
d_n	diâmetro primitivo virtual	mm
f	desvio individual	μm
f_f	tolerância do perfil (máximo entre o pinhão e a coroa)	μm
f_{ma}	desalinhamento do engrenamento devido à tolerância de manufatura	μm
f_p	desvio admissível de passo	μm

Símbolo	Designação	Unidade
f_{pe}	tolerância no passo	μm
f_{sh}	desalinhamentos devido à deflexão do eixo	μm
g	afiação permitida	mm
g_{α}	comprimento do caminho de contato	mm
h	altura do dente	mm
h_{a0}	adendo da cremalheira básica da ferramenta	mm
h_{fp}	adendo da cremalheira básica do engrenamento	mm
h_{pr}	altura da protuberância	mm
h_f	braço do momento de flexão	mm
l	vão entre os rolamentos	mm
l_c	comprimento do alívio das extremidades por flanco	mm
m	módulo	mm
m_n	módulo normal	mm
n	rotação	rpm
p	passo	mm
P_{bn}	passo de base normal	mm
P_{bt}	passo de base transversal	mm
P_r	protuberância da ferramenta	mm
q	flexibilidade combinada de um par de dentes	mm, $\mu m/N$
q_s	parâmetro de corte	-
q_y	fator de redução do desalinhamento devido ao teste de funcionamento inicial do motor	
s_{Fn}	espessura do dente virtual na seção crítica	mm
s_{pr}	rebaixo residual deixado pela protuberância	mm
i	relação de transmissão	
v	velocidade na linha primitiva	m/s

Símbolo	Designação	Unidade
w	carregamento específico	N/mm
w_m	intensidade média de carregamento	N/mm
x	correção	
y	tolerância para teste inicial do motor (apenas com os índices α ou β)	μm
y_α	tolerância para teste inicial do motor para $K_{H\alpha}$	μm
z	número de dentes	
z_v	número de dentes virtual	
B	parâmetro para o efeito do carregamento	
C_a	altura do alívio de topo ou de pé	μm
C_b	altura do alívio das extremidades	μm
C_c	altura do arredondamento	μm
D	diâmetro da ferramenta	mm
E	módulo de elasticidade	MN/m^2
F_m	força tangencial média	N
F_t	força tangencial nominal no círculo de referência	N
F_{Ft}	força tangencial nominal para tensões de flexão	N
F_{Ht}	força tangencial nominal para tensões de contato	N
$F_{\beta x}$	desalinhamento do engrenamento anterior ao teste inicial do motor	μm
$F_{\beta y}$	desalinhamento efetivo do engrenamento	μm
(HV)	valor da dureza Vickers	
I	momento polar de inércia	kg.m^2
K_v	fator dinâmico	
K_{v350}	fator dinâmico para $F_t.K_A/b=350$	
$K_{v350\alpha}$	fator dinâmico para engrenagens cilíndricas de dentes retos	

Símbolo	Designação	Unidade
$K_{v350\beta}$	fator dinâmico para engrenagens cilíndricas de dentes helicoidais com $\epsilon > 1$	
K_A	fator de aplicação	
$K_{F\alpha}$	fator de carregamento transversal para tensões de flexão	
$K_{F\beta}$	fator de carregamento da face para tensões de flexão	
$K_{H\alpha}$	fator de carregamento transversal para tensões de contato	
$K_{H\beta}$	fator de carregamento da face para tensões de contato (pressão Hertziana)	
M_{red}	massa por comprimento unitário da largura da face do par engrenado referida à linha de ação	kg/mm
PF	capacidade atual de potência baseada em tensões de flexão	kW
PFP	capacidade de potência admissível baseada em tensões de flexão	kW
PH	capacidade atual de potência baseada em tensões de contato	kW
PHP	capacidade de potência admissível baseada em tensões de contato	kW
R	rugosidade	μm
R_a	média aritmética das rugosidades	μm
R_z	rugosidade média	μm
S	fator de segurança	
S_F	fator de segurança atual baseado para tensões de flexão	
S_{Fmin}	mínimo fator de segurança requerido para tensões de flexão (contra a ruptura)	
S_H	fator de segurança atual baseado para tensões de contato	
S_{Hmin}	mínimo fator de segurança requerido para tensões de contato (contra a ruptura)	
T	torque	N.m
T_F	torque atual baseado nas tensões de flexão	N.m

Símbolo	Designação	Unidade
T_{Fmax}	capacidade de torque para tensões de flexão	N.m
T_{FP}	torque admissível baseado em tensões de flexão	N.m
T_H	torque atual baseado nas tensões de contato	N.m
T_{Hmax}	capacidade de torque para tensões de contato	N.m
T_{HP}	torque admissível baseado em tensões de contato	N.m
Y_F	fator de forma do dente para tensões de flexão	
Y_M	fator de qualidade do material para tensões de flexão	
Y_N	fator de vida para tensões de flexão	
Y_R	fator de condição de superfície para tensões de flexão	
Y_S	fator de correção de tensão para tensões de flexão	
Y_X	fator de tamanho para tensões de flexão	
Y_β	fator de ângulo de hélice para tensões de flexão	
Y_δ	fator de sensibilidade para tensões de flexão	
Z_C	fator de profundidade de casca para tensões de contato	
Z_V	fator de velocidade para tensões de contato	
Z_E	fator de elasticidade para tensões de contato	
Z_G	fator de correlação disco/engrenagem para tensões de contato	
Z_H	fator de região para a pressão Hertziana no ponto de passo para tensões de contato	
Z_L	fator de lubrificação para tensões de contato	
Z_M	fator de qualidade do material para tensões de contato	
Z_N	fator de vida para tensões de contato	
Z_R	fator de rugosidade para tensões de contato	
Z_W	fator de endurecimento durante o trabalho para tensões de contato	
Z_X	fator de tamanho para tensões de contato	

Símbolo	Designação	Unidade
Z_ϵ	fator do coeficiente de contato para tensões de contato	
α_{en}	ângulo de pressão no ponto de contato mais alto de um par engrenado	rad
α_n	ângulo de pressão normal no círculo de referência	rad
α_t	ângulo de pressão transversal no círculo de referência	rad
α_{tw}	ângulo de pressão transversal no círculo primitivo	rad
α_{Fen}	ângulo para a aplicação do carregamento no ponto de contato mais alto de um par engrenado	rad
β	ângulo de hélice (quando estiver sem índice se refere ao círculo de referência)	rad
β_b	ângulo de hélice base	rad
ϵ	coeficiente de contato	
ϵ_α	coeficiente de contato transversal	
$\epsilon_{\alpha n}$	coeficiente de contato transversal virtual	
ϵ_β	coeficiente de sobreposição	
ϵ_γ	coeficiente de contato total	
ν	coeficiente de Poisson	
ρ_{a0}	raio de topo da cremalheira básica da ferramenta	mm
ρ_f	raio do filete da raiz do dente	mm
ρ_{fp}	raio do filete da raiz da cremalheira básica da ferramenta	mm
ρ_{rel}	raio de curvatura relativo	mm
ρ_F	raio do filete da raiz na seção crítica	mm
σ_B	tensão máxima	MN/m ²
σ_F	tensão de flexão atual na raiz do dente	MN/m ²
σ_{F0}	limite de resistência básico de um corpo de provas polido sob carregamento de flexão alternado	MN/m ²

Símbolo	Designação	Unidade
σ_{FP}	tensão de flexão admissível na raiz do dente	MN/m ²
σ_{FY}	tensão elástica para tensões de flexão	MN/m ²
σ_H	tensão de contato atual (pressão Hertziana)	MN/m ²
σ_{Hlim}	limite de resistência para tensões de contato em engrenagens	MN/m ²
σ_{HD}	limite de resistência para tensões de contato em discos	MN/m ²
σ_{HP}	tensão de contato admissível (pressão Hertziana admissível)	MN/m ²
σ_{HY}	tensão elástica para tensões de contato	MN/m ²
σ_R	tensão residual	MN/m ²

4.3.2 Índices

Para os propósitos desta norma, os seguintes índices são utilizados:

Índice	Designação
1	pinhão
2	coroa
core	propriedades do material do núcleo para aços com tratamento superficial
eff	valores efetivos, tensões reais
est	valores estimados
lim	valores de limite de resistência
min	mínimo
max	máximo
red	reduzido
sh	eixos
stat	carregamento estático

4.4 Procedimento de cálculo

O procedimento de cálculo é usado para calcular a capacidade de carregamento das engrenagens em termos de tensões e de potência.

No caso de cálculos em termos de tensões, a tensão admissível é calculada pelos limites de resistência do material corrigidos pelos fatores de correção de tensões. Esta tem que exceder às tensões atuais que são calculadas a partir da força tangencial nominal, corrigidas pelos fatores de correção do carregamento e pela geometria da engrenagem.

Quando os cálculos forem em termos de potência, a capacidade de potência do par de engrenagens é calculada a partir da tensão admissível, dos fatores de correção do carregamento e da geometria das engrenagens. Esta tem que exceder a potência requerida do par de engrenagens.

Em ambos os casos, o cálculo é feito separadamente para quatro casos:

- tensão de contato do pinhão;
- tensão de contato da coroa;
- tensão de flexão do pinhão;
- tensão de flexão da coroa.

4.5 Lubrificação

Este procedimento é válido para engrenamentos onde ocorre uma lubrificação adequada⁽¹⁾.

4.6 Dinâmica do sistema

Os valores dos fatores de aplicação fornecidos para as necessidades de projeto não são válidos se o maquinário motor ou movido causar uma excitação em uma frequência próxima ou igual à alguma das frequências naturais do sistema⁽²⁾.

⁽¹⁾ Em baixas velocidades, um cuidado especial deve ser tomado para garantir um fornecimento adequado de lubrificante ao par engrenado. Deve ser também assegurado que o lubrificante não causará corrosão das engrenagens ou de quaisquer outras partes do conjunto. A corrosão não está descrita neste procedimento de cálculo.

⁽²⁾ Nestes casos, recomenda-se que o projetista do sistema forneça os valores dos fatores de aplicação, baseado em cálculos ou medições em sistemas semelhantes.

4.7 Fatores de segurança

O uso deste procedimento de cálculo requer uma avaliação realista dos fatores de influência. Quando se tiver experiência pelo uso de outras engrenagens similares em ambientes similares, esta experiência pode ser usada na escolha de um fator de segurança adequado.

4.8 Equações básicas para os cálculos da tensão de contato

4.8.1 Tensão de contato admissível (σ_{HP})

A tensão de contato admissível é calculada separadamente para o pinhão e para a coroa pela equação:

$$\sigma_{HP} = \frac{\sigma_{H \lim} \cdot Z_L \cdot Z_V \cdot Z_R \cdot Z_M \cdot Z_W \cdot Z_X \cdot Z_N}{S_{H \min}} \quad (1)$$

4.8.2 Tensão de contato atual calculada (σ_H)

A tensão de contato atual é calculada separadamente para o pinhão e para a coroa pela equação:

$$\sigma_H = Z_H \cdot Z_E \cdot Z_F \cdot \sqrt{\frac{F_{Ht}}{b \cdot d_1} \cdot \frac{(i+1)}{i} \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{H\alpha} \cdot K_{H\beta}} \quad (2)$$

onde o valor de F_{Ht} é a força tangencial nominal nos círculos de referência apropriados para o pinhão e para a coroa, calculada pelas equações (4.6) ou (4.7).

4.8.3 Capacidade de potência e torque admissíveis baseados na tensão de contato (P_{HP} e T_{HP})

A capacidade de potência admissível baseada na tensão de contato é calculada separadamente para o pinhão e para a coroa pela equação:

$$P_{HP} = \frac{b \cdot d_1^2 \cdot \pi \cdot n_1 \cdot i \cdot \sigma_{HP}^2}{60 \cdot 10^6 \cdot (i+1) \cdot Z_H^2 \cdot Z_E^2 \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{H\alpha} \cdot K_{H\beta} \cdot Z_B^2} \quad (3)$$

O torque admissível baseado na tensão de contato é calculado separadamente para a coroa e para o pinhão pela equação:

$$T_{HP} = \frac{60 \cdot 10^3 \cdot P_{HP}}{2 \cdot \pi \cdot n_1} \quad (4)$$

4.8.4 Capacidade de torque máxima para tensões de contato (T_{Hmax})

A capacidade de torque máxima para tensão de contato é expressa como sendo um múltiplo de T_{HP} , e é calculada pela equação:

$$\frac{T_{Hmax}}{T_{HP}} = \frac{K_A \cdot K_V \cdot (\sigma_{HT} \cdot Z_M)^2}{(\sigma_{HP} \cdot S_{Hmin})^2} \quad (5)$$

onde σ_{HT} é dado pela figura 4.1⁽¹⁾.

4.8.5 Força tangencial nominal para tensão de contato (F_{HT})

A força tangencial nominal para tensão de contato é calculada pelas equações (4.6) ou (4.7):

$$F_{HT} = \frac{2000 \cdot T_{H1}}{d_1} \quad (6)$$

$$F_{HT} = \frac{1000 \cdot P_H}{v} \quad (7)$$

(1) As linhas para aços com tratamento superficial na figura 4.1 devem ser estendidas para baixo até as linhas de σ_B correspondentes às condições do núcleo.

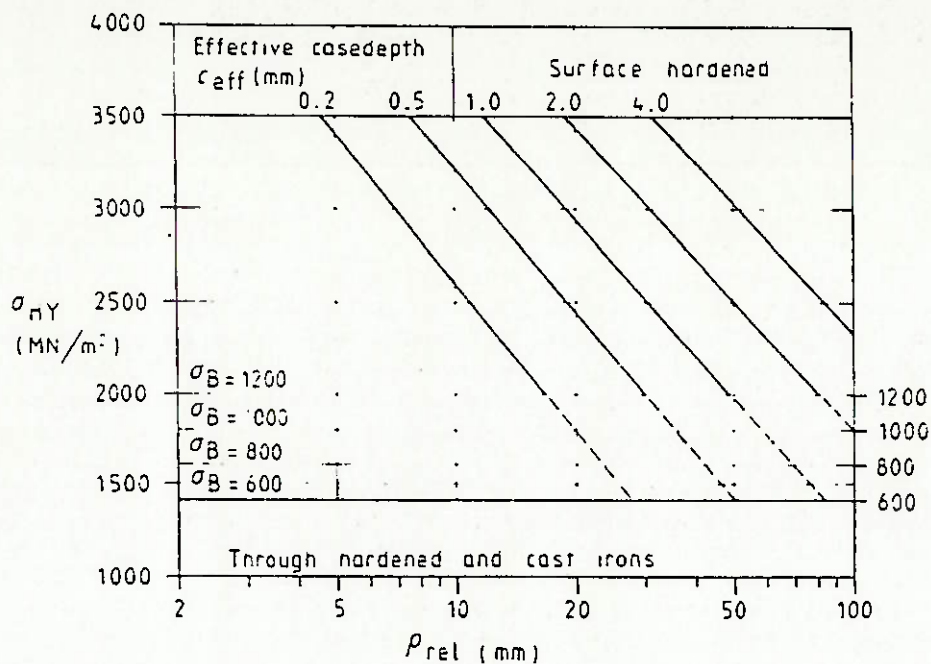


figura 4.1 Tensão elástica para tensão de contato (σ_{HY})

4.8.6 Fator de região para tensão de contato (Z_H)

O fator de região leva em conta a influência da curvatura do flanco do dente no ponto de passo sobre a tensão Hertziana e converte a força tangencial no cilindro de referência em uma força normal no cilindro primitivo.

É calculado pela equação:

$$Z_H = \sqrt{\frac{2 \cdot \cos(\beta_b) \cdot \cos(\alpha_w)}{\cos^2(\alpha) \cdot \sin(\alpha_w)}} \quad (8)$$

onde

$$d_1 = \frac{m_n \cdot z_1}{\cos \beta} \quad (8a)$$

$$g_\alpha = 0.5 \cdot (\sqrt{d_{a1}^2 - d_{b1}^2} + \sqrt{d_{a2}^2 - d_{b2}^2}) - a \cdot \sin(\alpha_w) \quad (8b)$$

$$p_{bt} = \frac{m_n \cdot \pi \cdot \cos \alpha}{\cos \beta} \quad (8c)$$

$$v = \frac{d_1 \cdot n_1}{19098} \quad (8d)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \alpha_n}{\cos \beta} \right) \quad (8e)$$

$$\alpha_{tw} = \cos^{-1} \left(\frac{d_1 \cdot \cos \alpha}{d_{w1}} \right) \quad (8f)$$

$$\beta_b = \sin^{-1} (\cos \alpha_n \cdot \sin \beta) \quad (8g)$$

$$\varepsilon_\alpha = \frac{g_\alpha}{p_{bt}} \quad (8h)$$

$$\varepsilon_\beta = \frac{b \cdot \sin \beta}{m_n \cdot \pi} \quad (8i)$$

$$\varepsilon_\gamma = \varepsilon_\alpha + \varepsilon_\beta \quad (8j)$$

$$\rho_{au} = \frac{d_1}{2} \cdot \frac{i}{(i+1)} \cdot \frac{\cos \alpha \cdot \tan \alpha_{tw}}{\cos \beta_b} \quad (8k)$$

$$z_v = \frac{z}{\cos^3 \beta} \quad (8l)$$

4.8.7 Fator do coeficiente de contato para tensão de contato (Z_E)

O fator do coeficiente de contato leva em conta a influência da divisão de carregamento entre o coeficiente de contato transversal e do coeficiente de sobreposição no carregamento específico.

Para engrenagens cilíndricas de dentes retos, é calculado pela equação:

$$Z_E = \sqrt{\frac{4 - \varepsilon_\alpha}{3}} \quad (9)$$

Para engrenagens cilíndricas de dentes helicoidais com $\varepsilon_\beta < 1$, é calculado pela equação:

$$Z_E = \sqrt{\frac{(4 - \varepsilon_\alpha) \cdot (1 - \varepsilon_\beta) + \frac{\varepsilon_\beta}{\varepsilon_\alpha}}{3}} \quad (10)$$

Para engrenagens cilíndricas de dentes helicoidais com $\varepsilon_\beta \geq 1$, é calculado pela equação:

$$Z_E = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_\alpha}} \quad (11)$$

4.8.8 Fator de elasticidade para tensão de contato (Z_E)

O fator de elasticidade leva em conta a influência das propriedades específicas do material, que são o módulo de elasticidade E e o coeficiente de Poisson ν na tensão Hertziana.

É calculado pela equação:

$$Z_E = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)}} \quad (12)$$

Para alguns pares de materiais, este valor é apresentado na tabela 4.1⁽¹⁾.

4.8.9 Limite de resistência básico para tensão de contato (σ_{Hlim})

O limite de resistência básico para tensão de contato é calculado separadamente para a coroa e para o pinhão pela equação:

$$\sigma_{Hlim} = \sigma_{HTD} \cdot Z_G \cdot Z_c \quad (13)$$

(1) Para se obter as propriedades do bronze, consultar a norma BS 1400.

onde

σ_{HD} é obtido pela figura 4.2;

$Z_C = 1.0$ (aços com tratamento térmico total);

Z_C é obtido pela figura 4.4 para aços com tratamento térmico superficial (o valor da profundidade limite da casca, c_{lim} , é obtido da tabela 4.2);

Z_{G2} é obtido da figura 4.3;

Z_{G1} é maior valor entre:

$$Z_{G1} = (1.02 - 0.002 \cdot |z|) \cdot Z_{G2} \quad (14)$$

$$Z_{G1} = 0.9 \cdot Z_{G2} \quad (15)$$

Materials das engrenagens	Z_E
Aço / aço	189
Aço / ferro fundido SG	181
Ferro fundido SG / ferro fundido SG	174
Ferro fundido cinzento / ferro fundido cinzento	146

tabela 4.1. Valor de Z_E para algumas combinações de materiais

Processo de endurecimento	Profundidade limite da casca (c_{lim})
Cementação e têmpera	$0.16 m_n$
Nitirificação	$0.16 m_n$
Têmpera por indução	$0.32 m_n$

tabela 4.2 Profundidade limite da casca

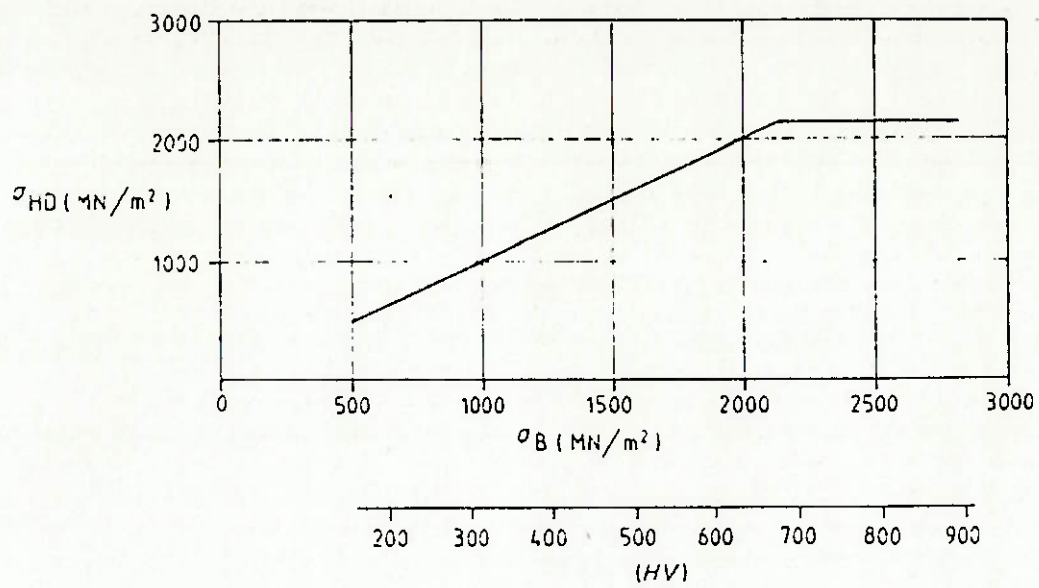


figura 4.2 Valores de σ_{HD}

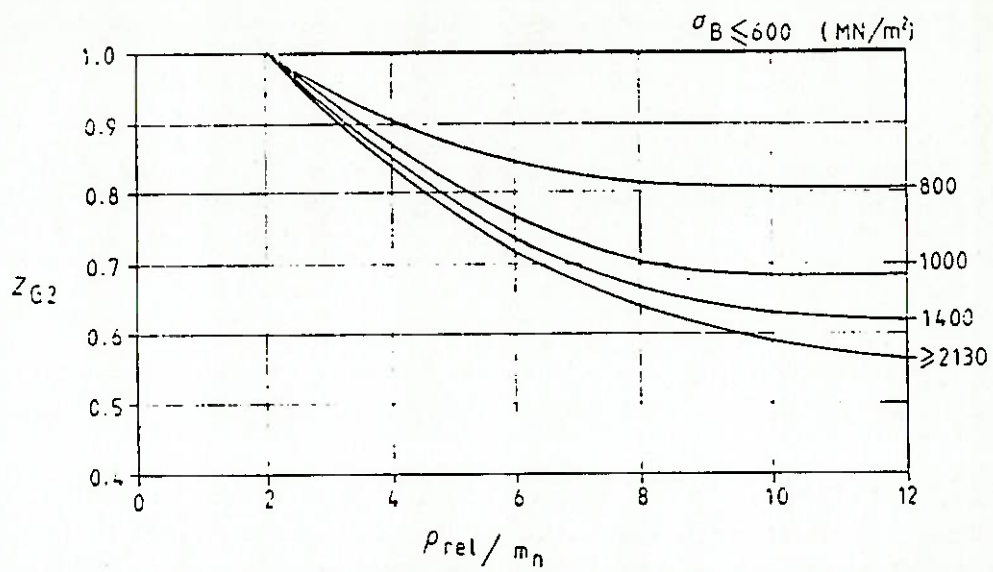


figura 4.3 Valores de Z_{G2}

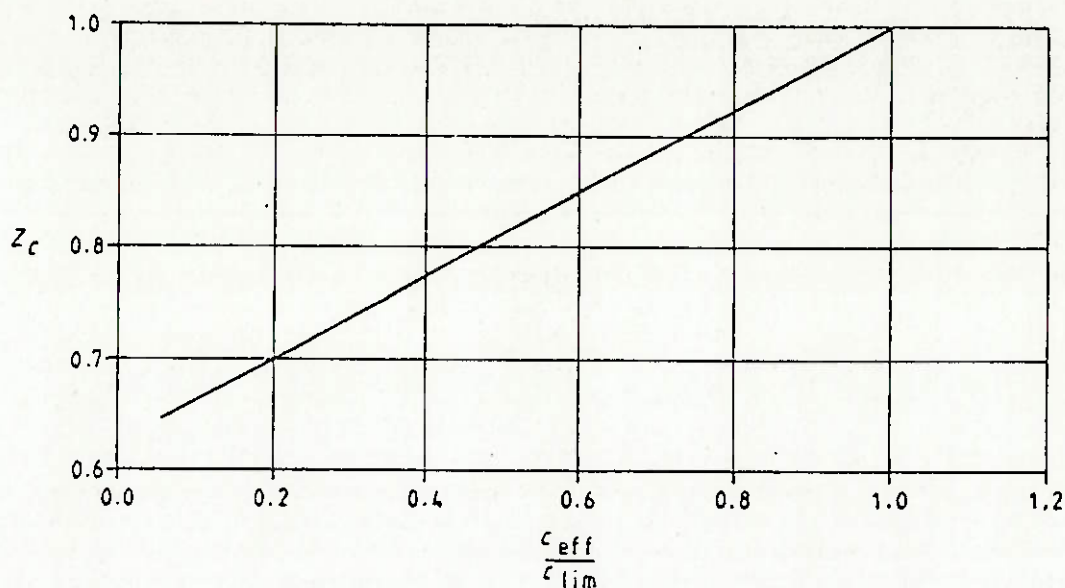


figura 4.4 Fator de profundidade de casca (Z_C)

4.8.10 Fator de qualidade do material para tensão de contato (Z_M)

Um controle de qualidade melhor sobre a manufatura de um material resulta em uma menor dispersão das propriedades mecânicas do material final. Assim, materiais de qualidade melhor possuem uma tensão admissível maior e materiais de qualidade menor, tensões admissíveis menores. As qualidades dos materiais estão definidas no apêndice II.

Os valores de Z_M são obtidos pela tabela 4.3.

4.8.11 Fatores de influência do lubrificante, rugosidade e velocidade (Z_L, Z_R e Z_V)

A viscosidade do lubrificante, a rugosidade da superfície e a velocidade na linha de passo afetam a espessura do filme de lubrificante que, por sua vez, afeta a componente Hertziana da tensão total no cilindro primitivo.

O valor do produto $Z_L Z_V$ é obtido pela figura 4.5.

O fator de rugosidade é obtido pela figura 4.6. Se as rugosidades do pinhão e da coroa forem diferentes, então:

$$R_a = \frac{(Ra_1 + Ra_2)}{2} \quad (16)$$

Se a rugosidade for medida em termos de Z_R , então o valor de R_a é calculado pela equação:

$$R_a = \frac{Rz}{6} \quad (17)$$

Material	Z_M		
	Qualidade A	Qualidade B	Qualidade C
Aços com tratamento térmico superficial	1.0	0.9	0.8
Aços com tratamento térmico total ou normalizados	1.0	0.9	0.8
Aços fundidos com tratamento térmico total ou normalizados e bronze	0.9	0.8	0.7
Ferro fundido nodular	0.9	0.8	0.7
Outro ferros fundidos	0.7	0.5	0.5

tabela 4.3. Valores de Z_M

4.8.12 Fator de endurecimento pelo trabalho para tensão de contato (Z_W)

O Fator de endurecimento pelo trabalho leva em conta o acréscimo da durabilidade da superfície devido ao engrenamento entre uma coroa de aço com tratamento térmico total e um pinhão com tratamento térmico superficial. Em todos os outros casos, $Z_W = 1.0$.

Para coroas com dureza menor que 400 HV, o valor de Z_W é obtido pela figura 4.7.

Se a rugosidade for medida em termos de R_z , então R_a deve ser calculado pela equação (4.17).

Para coroas com dureza maior ou igual a 400 HV, então $Z_W = 1.0$.

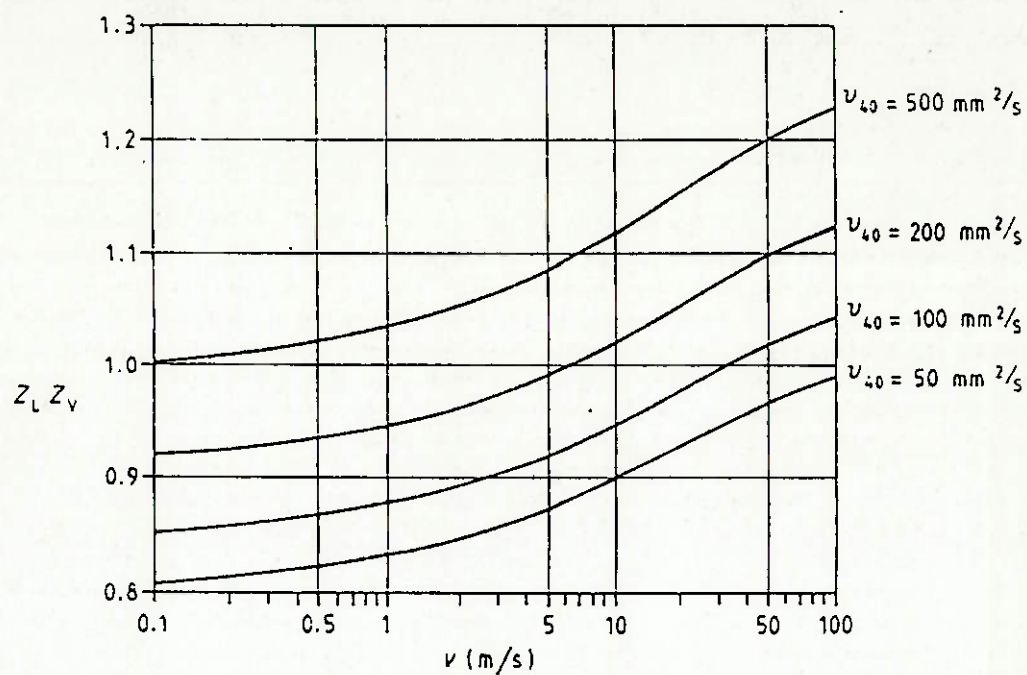


figura 4.5 Fatores de velocidade e lubrificação combinados ($Z_L Z_V$)

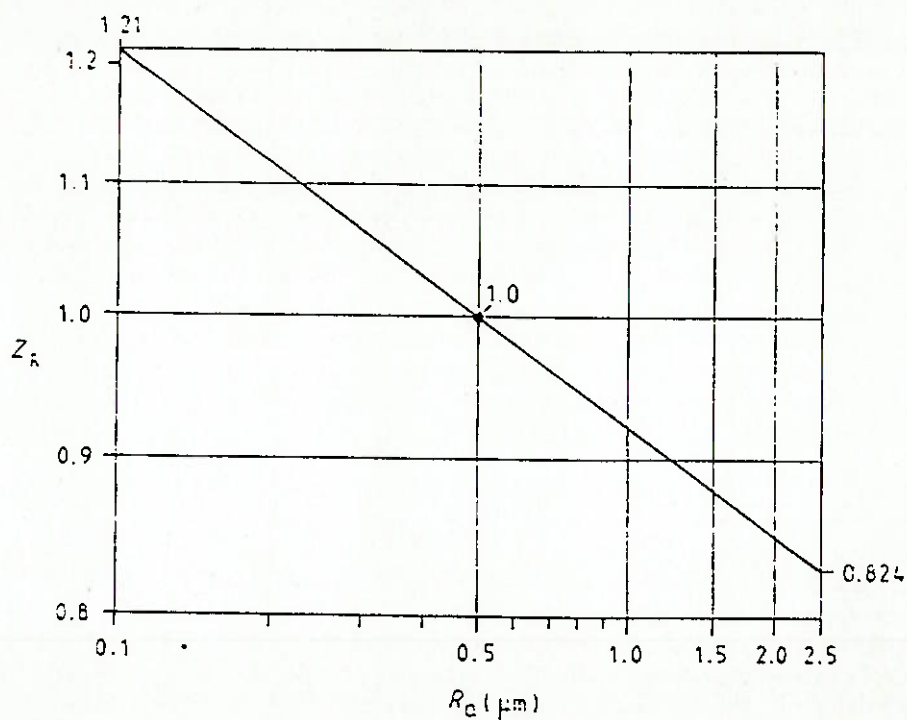


figura 4.6 Fator de rugosidade (Z_R)

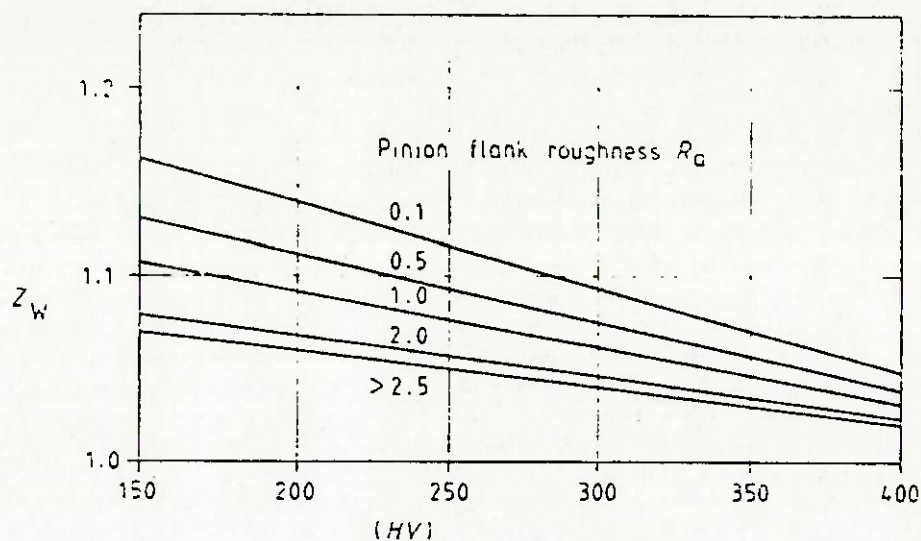


figura 4.7 Valores de Z_W

4.8.13 Fator de tamanho para tensão de contato (Z_X)

O fator de tamanho é incluído para levar em conta possíveis influências do tamanho na qualidade do material e seu comportamento face o tratamento superficial ou processo de manufatura.

O valor de Z_X é considerado como sendo 1.0.

4.8.14 Fator de vida para tensão de contato (Z_N)

O fator de vida para tensão de contato leva em conta o acréscimo na tensão admissível se o número de ciclos de operação for menor que a vida de resistência.

O valor de Z_N pode ser obtido pela curva S-N do material se disponível. Caso contrário, deve-se usar a figura 4.8.

O número de ciclos de carregamento do dente (N) são os apropriados para o pinhão e para a coroa, respectivamente, levando em conta a relação de transmissão e o número de dentes engrenados do pinhão e da coroa.

A classificação de material do tipo 1 se aplica a aços com tratamento térmico total, aços com tratamento térmico superficial onde a profundidade de casca é maior ou igual à profundidade limite

de casca⁽¹⁾ e ferros fundidos que não sejam os cinzentos quando algum pitting é permitido (ver curva 1 da figura 4.8).

A classificação de material do tipo 2 se aplica a aços com tratamento térmico total e ferros fundidos que não sejam os cinzentos quando pitting não é permitido (ver curva 2 da figura 4.8).

A classificação de material do tipo 3 se aplica a aços com tratamento térmico superficial onde a profundidade de casca é maior ou igual à profundidade limite de casca⁽¹⁾ quando pitting não é permitido (ver curva 3 da figura 4.8).

A classificação de material do tipo 4 se aplica a aços com tratamento térmico superficial onde a profundidade de casca é menor que a profundidade limite de casca⁽¹⁾, bronze e ferro fundido cinzento (ver curva 4 da figura 4.8).

A classificação de material do tipo 5 se aplica a aços nitrificados (ver curva 5 da figura 4.8).

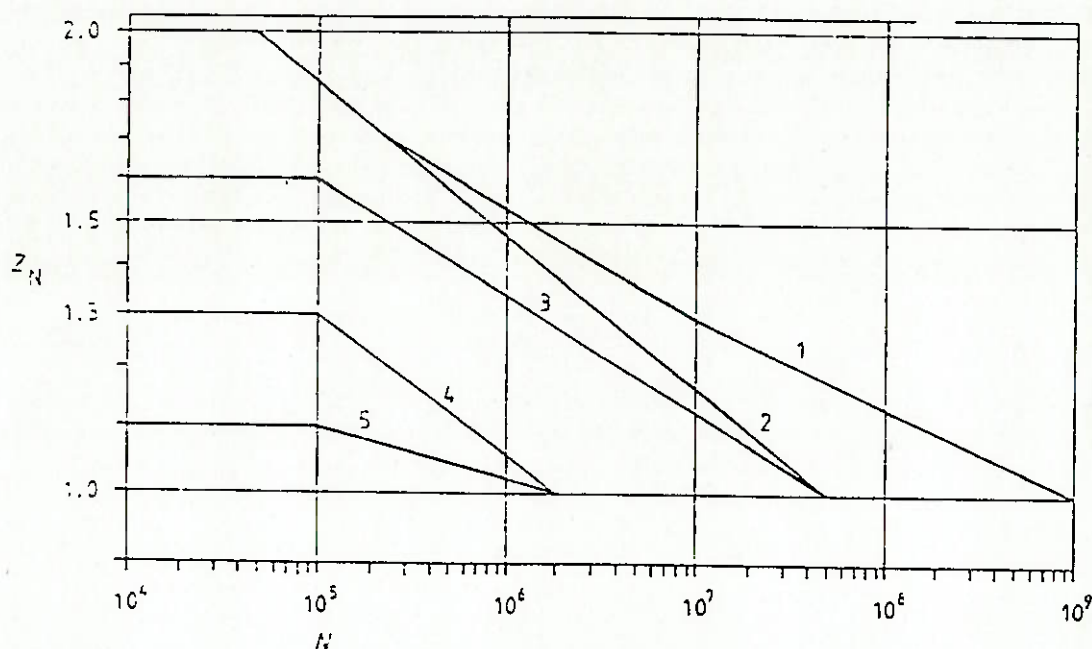


figura 4.8 Fator de vida para tensão de contato (Z_N)

4.8.15 Fator de aplicação (K_A)

O fator de aplicação leva em conta as flutuações de carregamento do carregamento médio ou do diagrama de carregamento causadas por fontes internas ou externas do engrenamento.

(1) Ver tabela 2 para obter os valores das profundidades limites de casca.

As flutuações dependem das características do equipamento motor, do equipamento movido e do comportamento da vibração do sistema com relação às condições de trabalho.

Um carregamento total típico de um engrenamento é mostrado na figura 4.9 subdividido em componentes individuais incluindo o fator de aplicação.

O fator de aplicação é conseguido através de medições em sistema similares existentes ou, caso estas informações não estejam disponíveis, através de informações empíricas fornecidas pelas tabelas 4.4, 4.5 e 4.6.

Característica de carregamento do equipamento motor	Carregamento no equipamento movido			
	Uniforme	Choque moderado	Choque médio	Choque pesado
Uniforme	1.00	1.25	1.50	1.75
Choque leve	1.10	1.35	1.60	1.85
Choque moderado	1.25	1.50	1.75	2.00
Choque pesado	1.50	1.75	2.00	2.25

tabela 4.4. Valores para o fator de aplicação K_A

Característica de operação	Equipamento motor
Uniforme	Motor elétrico
Choque leve	Turbinas a gás e a vapor
Choque moderado	Motores a combustão com vários cilindros
Choque pesado	Motores a combustão com um único cilindro

tabela 4.5. Exemplos de equipamentos motores com diferentes características de trabalho

Característica	Equipamento movido
Uniforme	Gearadores, transportadores de correia ou plataforma uniformemente carregados, elevadores, transportadores de rosca, máquinas de empacotamento, engrenagens de alimentação para ferramentas em máquinas, ventiladores, centrífugas leves, bombas centrífugas, misturadores para fluidos leves ou materiais de densidade constante, engrenagens de movimentação, de corte, estampagem, punção, tornos
Choque moderado	Transportadores de correia ou plataforma com carregamento não uniforme (por exemplo vários materiais diferentes sendo transportados simultaneamente), árvore principal de máquinas de usinagem, elevadores pesados, engrenagens com inversão de rotação em quindastes, ventiladores industriais e de minas, centrífugas pesadas, bombas centrífugas, misturadores para materiais de alta viscosidade ou densidade variável, bombas de pistão com vários cilindros, bombas de alimentação, extrusoras em geral, calândras, fornos rotativos, laminadores rotativos (bobinas contínuas de zinco e alumínio, bem como arames e barras)
Choque médio	Extrusores para borracha, misturadores com operação descontínua para borrachas e plásticos, trabalhos em madeira, engrenagens de elevação, bombas de pistão de um único cilindro
Choque pesado	Escavadoras, britadores, máquinas metalúrgicas, bombas de alimentação pesadas, equipamentos de brocas rotativas, prensas de moldagem de tijolos, trefiladoras

tabela 4.6 Exemplos de equipamentos movidos com diferentes características de trabalho

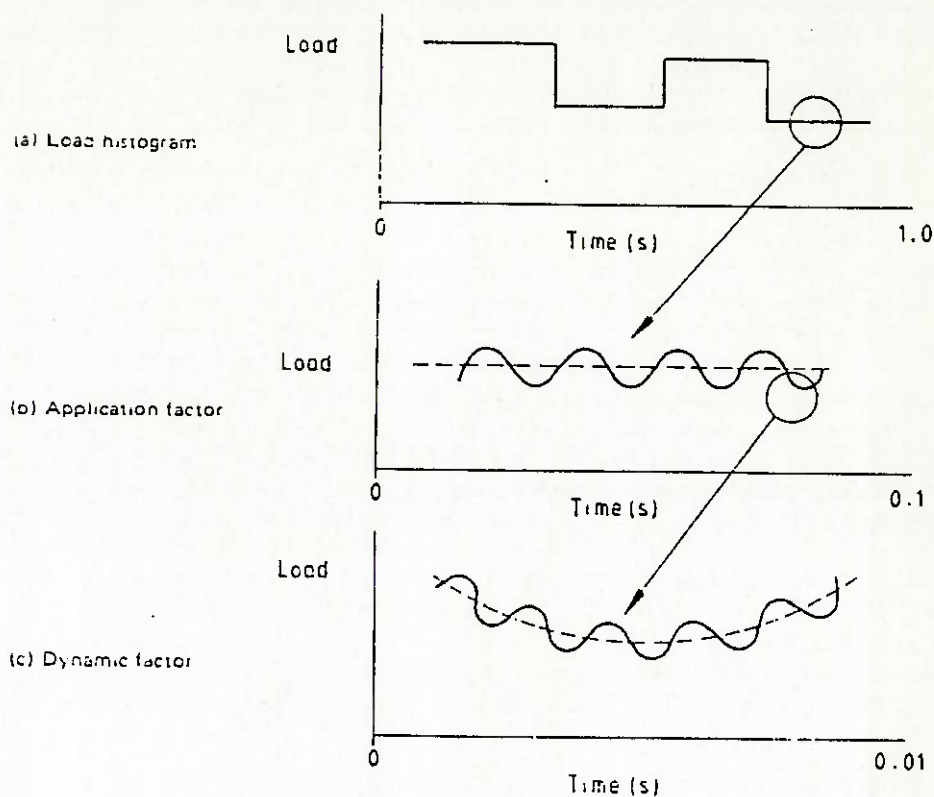


figura 4.9 Partes integrantes de um carregamento típico de engrenagens

4.8.16 Fator dinâmico (K_v)

O fator dinâmico leva em conta as flutuações de carregamento derivadas das condições de contato do engrenamento. As maiores influências são:

- a precisão do dente da engrenagem;
- a frequência de contato do dente dividida pela frequência natural das oscilações torcionais devido à ação das inércias do pinhão e da coroa atuando contra a rigidez do engrenamento.

A parte de um carregamento de engrenagens levando-se em conta o fator dinâmico está ilustrada na figura 4.9.

Os valores incluídos nesta norma são apropriados⁽¹⁾.

(1) Sob um carregamento baixo, o valor de K_v pode ser maior do que aquele fornecido por esta norma, mas a tensão não irá exceder as tensões no valor máximo estimado nos quais os valores de K_v se baseiam. Se um par

O valor de K_v é calculado pela equação:

$$K_v = 1 + (K_{v350} - 1) \cdot B \quad (18)$$

Para engrenagens cilíndricas de dentes helicoidais com coeficiente de sobreposição ≥ 1 , K_{v350} é obtido pela figura 4.10.

Para engrenagens cilíndricas de dentes retos, K_{v350} é obtido da figura 4.11.

Para engrenagens cilíndricas de dentes helicoidais com coeficiente de sobreposição < 1 :

$$K_{v350} = K_{v350\beta} - \varepsilon_\beta \cdot (K_{v350\beta} - K_{v350\alpha}) \quad (19)$$

onde

$K_{v350\beta}$ é o valor de K_{v350} da figura 4.10;

$K_{v350\alpha}$ é o valor de K_{v350} da figura 4.11.

O valor de B é calculado pela equação:

$$B = \left(\frac{350}{F_t \cdot K_A / b} \right)^X \quad (20)$$

onde

X é obtido pela tabela 4.7.

Grau	$F_t \cdot K_A / b \leq 350$	$F_t \cdot K_A / b > 350$
3	0.4736	0.2931
4	0.6110	0.4211
5	0.7153	0.5402
6	0.8017	0.6361
7	0.8635	0.7303
8	0.9005	0.7954
9	0.9334	0.8687
10	0.9530	0.8954

tabela 4.7. Valores de X

Se o valor de $F_t \cdot K_A / b$ for menor que 100, então considerar $F_t \cdot K_A / b = 100$.

engrenado está trabalhando próximo ou na velocidade de ressonância (particularmente o segundo e o terceiro harmônicos e sub-harmônicos, respectivamente), então uma completa análise dinâmica deve ser efetuada. Isto está além do escopo desta norma.

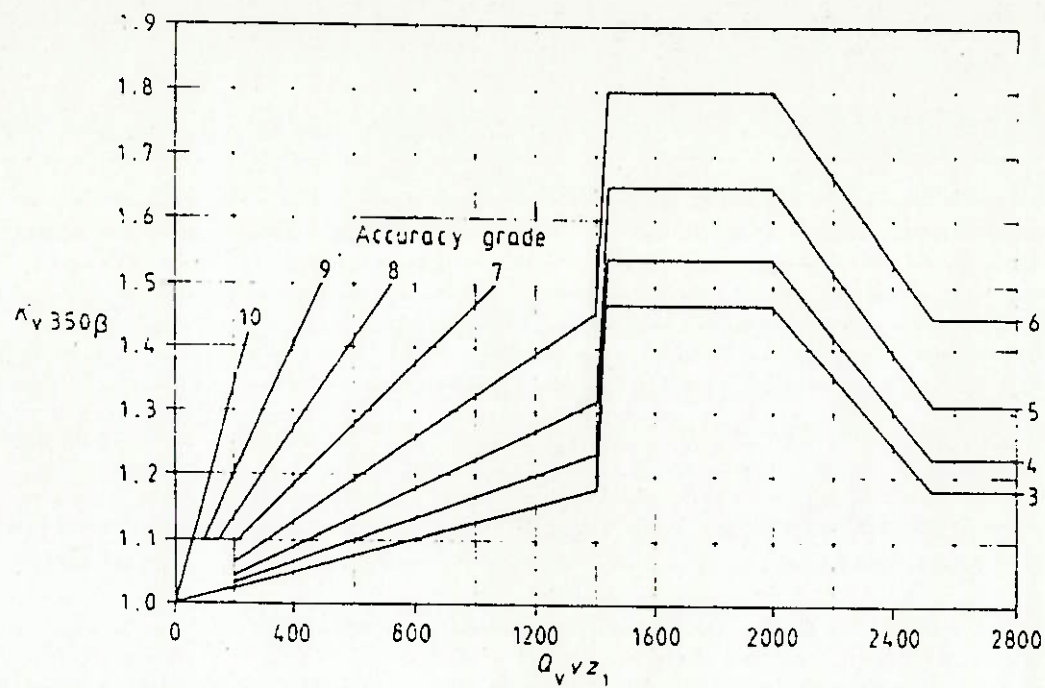


figura 4.10 Valor de $K_{v350\beta}$ para engrenagens cilíndricas de dentes helicoidais, $s\beta \geq 1$

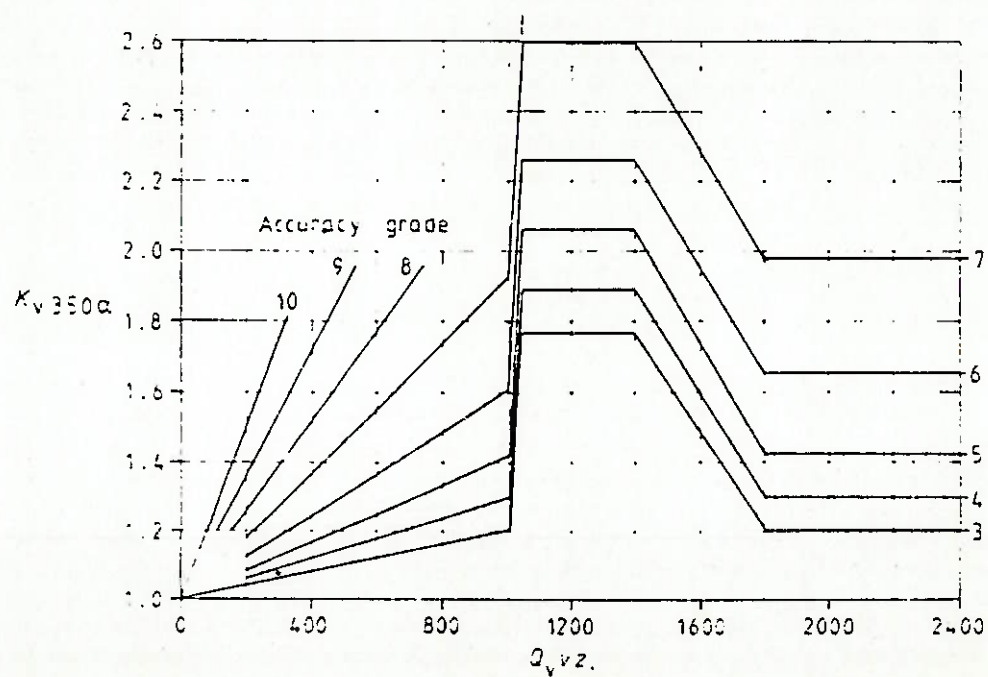


figura 4.11 Valores de $K_{v350\alpha}$ para engrenagens cilíndricas de dentes retos

4.8.17 Valores do parâmetro auxiliar Q_v

O parâmetro auxiliar Q_v leva em conta o degrau na frequência de ressonância do par engrenado quando o pinhão e a coroa não são engrenagens sólidas.

A equação geral para Q_v é:

$$Q_v = \sqrt{\frac{M_{red0}}{M_{red}}} \quad (21)$$

onde M_{red0} é o valor de M_{red} para o exemplo particular de pinhão e coroa sólidos e:

$$M_{red} = \frac{M_1 \cdot M_2}{M_1 + M_2} \quad (22)$$

onde

M_1 é o momento de inércia do pinhão e vale:

$$M_1 = \frac{4 \cdot I_1}{b \cdot d_{b1}^2} \quad (23)$$

M_2 é o momento de inércia da coroa e vale:

$$M_2 = \frac{4 \cdot I_2}{b \cdot d_{b2}^2} \quad (24)$$

No caso de um pinhão sólido engrenado com uma coroa sólida, temos $Q_v=1.0$.

4.8.18 Fatores de carregamento da face e carregamento transversal para tensão de contato ($K_{H\beta}$ e $K_{H\alpha}$)

O fator de carregamento da face é o carregamento específico máximo dividido pelo carregamento específico médio.

Ele leva em conta o incremento do carregamento local devido à mal distribuição do carregamento através da face da engrenagem causado por deflexões, tolerâncias de alinhamento e modificações de hélice. Isto inclui:

- flexão do eixo do pinhão;
- torção do eixo do pinhão;
- desalinhamento devido às tolerâncias de manufatura;

- alívio das extremidades⁽¹⁾;
- correção de hélice⁽¹⁾;
- arredondamento⁽¹⁾.

O cálculo do fator de carregamento da face envolve:

- determinação da intensidade do carregamento médio (w_m);
- determinação do desalinhamento do engrenamento devido às deflexões e tolerâncias de manufatura corrigidas pelo efeito do teste inicial do motor e da correção de hélice ($F_{\beta y}$);
- determinação da dureza do engrenamento (c_y);
- cálculo do fator de carregamento da face ($K_{H\beta}$).

O valor de b_{eff} é calculado pela equação:

$$b_{eff} = b - \frac{l_c}{2} \quad (25)$$

Se o carregamento tangencial nas engrenagens é conhecido e o procedimento está sendo usado para o cálculo de fatores de segurança, então w_m é calculado pela equação:

$$w_m = \frac{F_t \cdot K_A \cdot K_v}{b_{eff}} \quad (26)$$

Caso o valor calculado de w_m seja inferior a 100 N/mm, então considerar $w_m = 100$ N/mm.

Se:

- as engrenagens sofreram correções de hélice ou;
- o layout do engrenamento não está de acordo com a figura 4.12 ou;
- forças substanciais além do torque no eixo são aplicadas ou;
- o eixo da coroa possui uma deflexão significativa,

então a correção de hélice é calculado através de uma análise completa de todos os componentes do desalinhamento do engrenamento.

Caso contrário, a correção de hélice é calculada como se segue.

Os valores de K , l e s estão definidos na figura 4.12 e A é obtido pela tabela 4.8. Se o valor de s for maior que 0.3 l então considerar $s=0.3$ l.

⁽¹⁾ Recomendações no projeto de alívios das extremidades, correção de hélice e arredondamento são dadas no apêndice IV.

O valor de f_{sh} é calculado pela equação:

$$f_{sh} = w_m \cdot A \left[\left| 1 + K \cdot l_r \cdot d_1^4 / (d_1^2 \cdot d_{sh}^4) - 0.3 \right| + 0.3 \right] \cdot (b / (2 \cdot d_1)^2) \quad (27)$$

Pares engrenados sem arredondamento ou alívio das extremidades	Pares engrenados com arredondamento adequado	Pares engrenados com alívio das extremidades adequado
0.023 mm.µm/N	0.012 mm.µm/N	0.016 mm.µm/N

tabela 4.8. Valores para o parâmetro auxiliar A

O valor de f_{ma} depende da tolerância de manufatura das engrenagens, da caixa e dos rolamentos.

Para engrenagens sem correções de hélice e sem ajustes na montagem, usar:

$$f_{ma} = f_H \beta \quad (28)$$

onde $f_H \beta$ é o maior valor entre as tolerâncias de alinhamento do pinhão e da coroa obtidas pela tabela 4.9.

Grau	Tolerância de alinhamento (µm)
3	$0.50\sqrt{b} + 2.5$
4	$0.63\sqrt{b} + 3.15$
5	$0.80\sqrt{b} + 4.0$
6	$1.0\sqrt{b} + 5.0$
7	$1.25\sqrt{b} + 6.3$
8	$2.0\sqrt{b} + 10.0$
9	$3.15\sqrt{b} + 16.0$
10	$12.5\sqrt{b} + 25.0$

tabela 4.9. Limites de tolerância para alinhamentos de dentes

Para engrenagens com arredondamento ou aquelas onde o contato é ajustado na montagem:

$$f_{ma} = 0.5 f_H \beta \quad (29)$$

assegurando que isto é verificado por inspeção da marca de contato sobre carregamento leve.

		Factor K	
		Shrink fit	Key fit
(a)		0.0 ($s = 0$)	0.0 ($s = 0$)
(b)		0.0 ($s = 0$)	0.0 ($s = 0$)
(c)		0.48	0.8
(d)		-0.48	-0.8
(e)		1.33	1.33
(f)		-0.36	-0.6
(g)		-0.6	-1.0

figura 4.12 Valor da constante K para o cálculo de f_{sh}

Para engrenagens com alívio de extremidades adequado:

$$f_{ma}=0.7f_{H\beta} \quad (30)$$

O valor de $F_{\beta x}$ é calculado pela equação:

$$F_{\beta x} = |1.33 \cdot f_{sh} \pm f_{ma}| \quad (31)$$

O valor negativo é usado apenas quando as engrenagens são ajustadas na montagem e se o contato é inspecionado para garantir esta adoção de valor.

O valor de $f_{\beta x}$ é o máximo entre:

- o valor da equação (45);
- $0.005 w_m$;
- metade da tolerância atual de manufatura (o valor mais alto entre o pinhão e a coroa).

O valor de q_y é obtido pela figura 4.13.

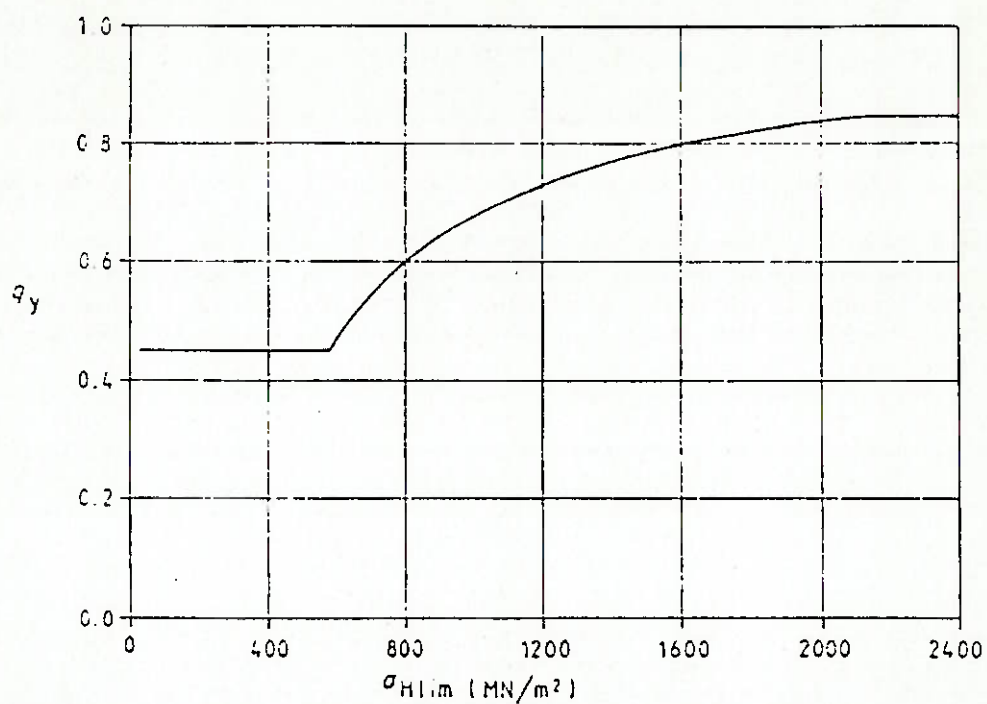


figura 4.13 Valores de q_y

Se os materiais da coroa e do pinhão forem diferentes, então:

$$q_y = \frac{(q_{y1} + q_{y2})}{2} \quad (32)$$

O valor de $F_{\beta y}$ é calculado pela equação:

$$F_{\beta y} = q_y F_{\beta x} \quad (33)$$

Para engrenagens com o perfil da cremalheira básica definido com o da figura 4.14 e com $1.2 \leq s_a \leq 1.9$, os valores médios para c_y são:

$c_y = 20 \text{ N/(mm} \cdot \mu\text{m)}$ para pares de engrenagens aço/aço;

$c_y = 18.2 \text{ N/(mm} \cdot \mu\text{m)}$ para pares de engrenagens aço/ferro fundido SG;

$c_y = 16.8 \text{ N/(mm} \cdot \mu\text{m)}$ para pares de engrenagens ferro fundido SG/ferro fundido SG;

$c_y = 14.8 \text{ N/(mm} \cdot \mu\text{m)}$ para pares de engrenagens aço/ferro fundido cinzento;

$c_y = 11 \text{ N/(mm} \cdot \mu\text{m)}$ para pares de engrenagens ferro fundido cinzento/ferro fundido cinzento;

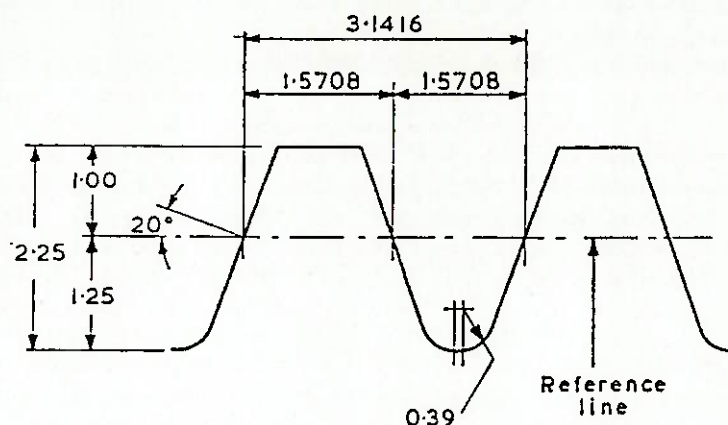


figura 4.14 Perfil da cremalheira básica por unidade de módulo normal

Para $\frac{c_r \cdot F_{\beta y}}{w_m} \geq 2$, temos:

$$K_{H\beta} = \sqrt{\frac{2 \cdot c_r \cdot F_{\beta y}}{w_m}} \quad (34)$$

Caso contrário:

$$K_{H\beta} = 1 + \frac{c_r \cdot F_{\beta\gamma}}{2 \cdot w_m} \quad (35)$$

O fator de carregamento transversal para tensão de contato leva em conta a má distribuição do carregamento abaixo do flanco de dente devido aos desvios do passo e perfil e às correções dos dentes.

Para engrenagens com $\varepsilon_\gamma > 2$, então:

$$K_{H\alpha} = \frac{\varepsilon_\gamma}{2} \cdot [0.9 + 0.4 \cdot c_r \cdot (f_{pa} - y_\alpha) / (w_m \cdot K_{H\beta})] \quad (36)$$

onde f_{pe} é a tolerância do passo obtida pela tabela 4.10.

Grau	Tolerância do passo (μm)
3	$0.63\sqrt{l} + 1.6$
4	$1.0\sqrt{l} + 2.5$
5	$1.6\sqrt{l} + 4.0$
6	$2.5\sqrt{l} + 6.3$
7	$3.55\sqrt{l} + 9.0$
8	$5.0\sqrt{l} + 12.5$
9	$7.1\sqrt{l} + 18.0$
10	$10.0\sqrt{l} + 25.0$

tabela 4.10. Limites de tolerância para o passo

onde l é qualquer comprimento de arco (em mm) menor que $p_d/2$.

Para engrenagens com $\varepsilon_\gamma \geq 2$, então:

$$K_{H\alpha} = 0.9 + 0.4 \cdot \sqrt{2 \cdot (\varepsilon_\gamma - 1) / \varepsilon_\gamma} \cdot c_r \cdot (f_{pa} - y_\alpha) / (w_m \cdot K_{H\beta}) \quad (37)$$

Tipo de engrenagens	Valor mínimo de $K_H\alpha$	Valor mínimo de $K_H\alpha$
engrenagens cilíndricas de dentes retos	1.0	$1/Z_E^2$
engrenagens cilíndricas de dentes helicoidais	1.15	$s\alpha/\cos^2 \beta_b$

tabela 4.11. Valores mínimos e máximos para $K_H\alpha$

O valor de y_α para aços com tratamento térmico total e para aços fundidos é calculado pela equação:

$$y_\alpha = \frac{160}{\sigma_{Hlim}} \cdot f_{ps} \quad (38)$$

quando

$v \leq 5$: sem limite;

$5 < v \leq 10$: $y_\alpha \leq 12800/\sigma_{Hlim}$;

$v > 10$: $y_\alpha \leq 6400/\sigma_{Hlim}$.

O valor de y_α para ferros fundidos e bronze é calculado pela equação:

$$y_\alpha = 0.275 \cdot f_{ps} \quad (39)$$

quando

$v \leq 5$: sem limite;

$5 < v \leq 10$: $y_\alpha \leq 22$

$v > 10$: $y_\alpha \leq 11$

Para aços com tratamento térmico superficial, o valor de y_α é calculado pela equação:

$$y_\alpha = 0.075 f_{pe} \quad (40)$$

com $y_\alpha \leq 3$ em qualquer velocidade.

Se o pinhão e a coroa são de materiais diferentes, então:

$$y_\alpha = \frac{(y_{\alpha 1} + y_{\alpha 2})}{2} \quad (41)$$

4.8.19 Fatores de segurança mínimo e atual para tensão de contato (S_{Hmin} e S_H)

O valor para o fator de segurança mínimo deve ser decidido de comum acordo entre o produtor da engrenagem e seu cliente⁽¹⁾.

O valor de S_H é calculado pela equação:

$$S_H = \frac{S_{Hmin} \cdot \sigma_{HP}}{\sigma_H} \quad (42)$$

4.9 Equações básicas para tensão de flexão na raiz do dente

4.9.1 Tensão de flexão admissível (σ_{FP})

A tensão de flexão admissível é calculado separadamente para o pinhão e para a coroa pela equação⁽²⁾:

$$\sigma_{FP} = \frac{2 \cdot \sigma_{F0} \cdot (\sigma_B - \sigma_X) \cdot Y_N \cdot Y_R \cdot Y_X \cdot Y_M \cdot Y_S}{(\sigma_B + \sigma_{F0} \cdot Y_N \cdot Y_R \cdot Y_X) \cdot S_{Fmin}} \quad (43)$$

4.9.2 Tensão de flexão atual calculada (σ_F)

A tensão de flexão atual é calculada separadamente para o pinhão e para a coroa pela equação:

$$\sigma_F = \frac{F_t \cdot Y_F \cdot Y_S \cdot Y_\beta \cdot K_A \cdot K_v \cdot K_{Fa} \cdot K_{F\beta}}{(b \cdot m_n)} \quad (44)$$

(1) O valor deve refletir a realidade das condições de operação e das propriedades do material. Quando o histograma de carregamento não é conhecido ao certo ou quando altos carregamentos do dente podem ocorrer devido a circunstâncias fora do escopo desta norma, um fator apropriadamente alto do fator de segurança mínimo deve ser escolhido. Os limites para S_{Hmin} recomendados são:

- $S_{Hmin}=1.0$ até 1.2 para aplicações industriais normais;
- $S_{Hmin}=1.3$ até 1.6 para aplicações que exijam alta confiabilidade ou aplicações críticas (aquelas que possam causar ferimentos graves, morte, etc.)

(2) A tensão residual (σ_R) é usada algebricamente, isto é, negativa para compressão e positiva para tração. Alguns valores típicos de σ_R resultantes de um bom tratamento térmico são mostrados no apêndice III. Quando for requisitado pelo usuário, o projetista deve informar, justificando, o valor da tensão residual assumida para os cálculos.

4.9.3 Capacidade de potência e torque admissíveis baseados na tensão de flexão (PFP e TFP)

A capacidade de potência admissível baseada na tensão de flexão é calculada separadamente para o pinhão e para a coroa pela equação:

$$P_{FP} = \frac{b \cdot d_1^2 \cdot \pi \cdot n_1 \cdot m_n \cdot \sigma_{FP}}{60 \cdot 10^6 \cdot Y_P \cdot Y_S \cdot Y_\beta \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{Fa} \cdot K_{F\beta}} \quad (45)$$

O torque admissível baseado na tensão de flexão é calculado separadamente para o pinhão e a coroa pela equação:

$$T_{FP} = \frac{60 \cdot 10^3}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{P_{FP}}{n_1} \quad (46)$$

4.9.4 Flexão abaixo da superfície em engrenagens com tratamento térmico superficial

Devido à possibilidade de uma falha por flexão abaixo da superfície, especialmente quando a casca endurecida é fina, uma checagem é feita na região de junção da casca com o núcleo. Nestes cálculos, as tensões admissíveis são calculadas pela equação (4.47) na qual os valores das propriedades dos materiais estão relacionados aos materiais do núcleo.

$$\sigma_{FPcore} = \frac{(\sigma_{Bcore} - \sigma_{Lcore}) \cdot Y_M \cdot Y_N \cdot Y_X}{(1 + 0.5 \cdot Y_N \cdot Y_X) \cdot S_{Fmin}} \quad (47)$$

Para permitir uma pequena tensão de flexão abaixo da superfície, a tensão de flexão atual é calculada pela equação (4.48), na qual o valor de σ_F é obtido pela equação (4.44).

$$\sigma_{FPcore} = \sigma_F \cdot (1 - 2 \cdot c/m_n) \cdot \frac{Y_{Sred}}{Y_S} \quad (48)$$

onde Y_{Sred} é o máximo entre:

$$Y_{Sred} = Y_S - c \cdot (Y_S - 1) / (0.16 \cdot m_n) \quad (49)$$

ou 1.

A capacidade de potência baseada na tensão de flexão é calculada pela equação:

$$P_{FPcore} = \frac{P_{FP} \cdot \sigma_F \cdot \sigma_{FPcore}}{\sigma_{FPcore} \cdot \sigma_{FP}} \quad (50)$$

4.9.5 Capacidade de torque máxima para tensão de flexão (T_{Fmax})

A capacidade de torque máxima para tensão de flexão é expressa como sendo um múltiplo de T_{FP} pela equação:

$$\frac{T_{Fmax}}{T_{FP}} = \frac{K_A \cdot K_V \cdot \sigma_{FY} \cdot Y_M \cdot Y_S \cdot Y_{\Delta \sigma}}{\sigma_{FP} \cdot S_{Fmin}} \quad (51)$$

Para engrenagens com tratamento térmico superficial, deve-se ainda calcular a capacidade de torque do material do núcleo. Neste cálculo, o valor de σ_{FY} na equação (4.51) é substituído pelo valor de σ_{FYcore} , calculado pela equação:

$$\sigma_{FYcore} = \frac{\sigma_{Bcore} \cdot Y_X}{(1 - (2 \cdot C / m_n))} \quad (52)$$

4.9.6 Força tangencial nominal para tensão de flexão (F_{Ft})

A força tangencial nominal para tensão de contato é calculada pela equação (4.53) ou pela equação (4.54).

$$F_{Ft} = \frac{2000 \cdot T_{F1}}{d_1} \quad (53)$$

$$F_{Ft} = \frac{1000 \cdot P_H}{v} \quad (54)$$

4.9.7 Fator de forma, de correção de tensão e de ângulo de hélice (Y_F , Y_S , e Y_β)

O fator de forma leva em consideração a influência da forma do dente sobre a tensão de flexão nominal para aplicações de carregamentos no ponto de contato mais alto de um único par engrenado.

O fator de correção de tensão leva em consideração o efeito do aumento da tensão do filete e a proximidade do braço de momento de flexão na tensão de flexão nominal para aplicações de carregamento no ponto de contato mais alto de um único par engrenado.

O fator de ângulo de hélice para tensão de flexão leva em conta o fato de que as condições para tensão na raiz do dente para engrenagens cilíndricas de dentes helicoidais são mais favoráveis pelo fato da linha de contato ser inclinada do que pela engrenagem cilíndrica de dentes retos virtual na qual os cálculos são baseados.

Os parâmetros usados para o cálculo dos parâmetros auxiliares que se seguem são calculados pelas equações (4.55) até (4.60).

$$\beta_b = \arccos \sqrt{1 - (\sin(\beta) \cdot \cos(\alpha_n))^2} \quad (55)$$

$$\varepsilon_{\text{con}} = \frac{\varepsilon_{\alpha}}{(\cos \beta_b)^2} \quad (56)$$

$$d_n = \frac{d}{(\cos \beta_2)^2} = m_n \cdot z_v \quad (57)$$

$$d_{bn} = d_n \cdot \cos(\alpha_n) = m_n \cdot z_v \cdot \cos(\alpha_n) \quad (58)$$

$$d_{an} = d_n + d_a - d = m_n \cdot z_v + (d_a - d) \quad (59)$$

$$d_n = d_n + d_f - d = m_n \cdot z_v + (d_f - d) \quad (60)$$

Os parâmetros auxiliares θ , G , H e q_s para o cálculo de Y_F , Y_S e Y_B são calculados pelas equações de (4.61) a (4.71).

Para o cálculo destes parâmetros, as dimensões da cremalheira básica do engrenamento, h_{fp} e p_{fp} , definidos na figura 4.15, devem ser introduzidos. A forma nominal do dente é tomada como base.

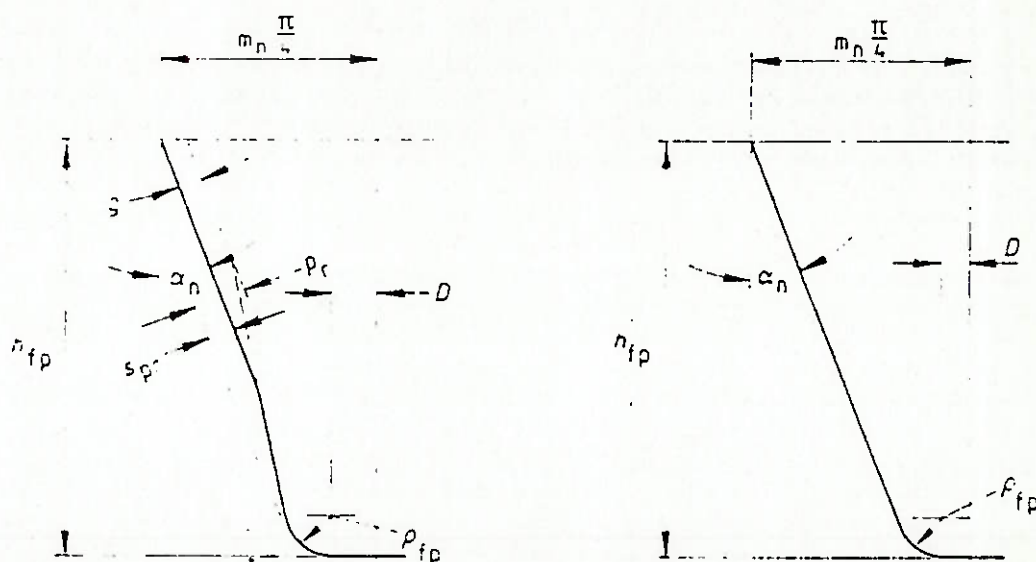


figura 4.15 Dimensões da cremalheira básica do engrenamento

$$\theta = \frac{2 \cdot G}{z_v} \cdot \tan(\theta) - H^{(1)} \quad (61)$$

onde

$$G = \frac{\rho_D}{m_n} - \frac{h_D}{m_n} + x \quad (62)$$

$$H = \frac{2}{z_v} \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \frac{D}{m_n} \right) - \frac{\pi}{3} \quad (63)$$

$$D = \frac{\pi}{4} \cdot m_n - h_D \cdot \tan(\alpha_n) + \frac{s_{pr}}{\cos(\alpha_n)} - (1 - \sin(\alpha_n)) \cdot \frac{\rho_D}{\cos(\alpha_n)} \quad (64)$$

Para ferramentas sem protuberância, usar $s_{pr}=0$.

$$\frac{s_{pr}}{m_n} = z_v \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right) + \sqrt{3} \cdot \left(\frac{G}{\cos \theta} - \frac{\rho_D}{\cos \alpha_n} \right) \quad (65)$$

$$\frac{\rho_F}{m_n} = \frac{\rho_D}{m_n} + \frac{2 \cdot G^2}{\cos \theta \cdot (z_v \cdot \cos^2 \theta - 2 \cdot G)} \quad (66)$$

$$d_{an} = 2 \cdot \frac{z}{|z|} \sqrt{(\sqrt{(d_{an}/2)^2 - (d_{bn}/2)^2} - (\frac{\pi \cdot d \cdot \cos \beta \cdot \cos \alpha_n}{|z|} \cdot (\varepsilon_{an} - 1)))^2 + (d_{bn}/2)^2} \quad (67)$$

$$\alpha_n = \arccos(d_{bn}/d_{an}) \quad (68)$$

$$\gamma_n = \frac{\frac{\pi}{2} + 2 \cdot \tan \alpha_n}{z_v} + ev(\alpha_n) - ev(\alpha_{an}) \quad (69)$$

$$\alpha_{an} = \alpha_n - \gamma_n \quad (70)$$

$$\frac{h_F}{m_n} = \frac{1}{2} \cdot ((\cos(\gamma_n) - \sin(\gamma_n) \cdot \tan(\alpha_{an})) \cdot \frac{d_{an}}{m_n} - z_v \cdot \cos\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right) - \frac{G}{\cos \theta} + \frac{\rho_D}{m_n}) \quad (71)$$

(1) $\theta = \pi/6$ rad pode ser usado como ponto de partida para as iterações de solução da equação (4.61).

4.9.8 Fator de forma do dente (Y_F)

O valor de Y_F é calculado pela equação:

$$Y_F = \frac{6 \cdot \frac{h_F}{m_n} \cdot \cos \alpha_{Fn}}{\frac{S_{Fn}^2}{m_n^2} \cdot \cos \alpha_n} \quad (72)$$

O pinhão 1 gira com velocidade angular ω_1 e, no ponto de contato B dos flancos, transfere à coroa uma velocidade angular instantânea ω_2 .

4.9.9 Fator de correção de tensão (Y_S)

O valor do parâmetro de correção de tensão é calculado pela equação:

$$Y_S = (1.2 + 0.13 \cdot L) \cdot q_s^{\left(\frac{1}{1.21 + \frac{2.3}{L}}\right)} \quad (73)$$

onde

$$L = \frac{S_{Fn}}{h_F} \quad (74)$$

O parâmetro de corte é calculado pela equação:

$$q_s = \frac{S_{Fn}}{2 \cdot \rho_F} \quad (75)$$

4.9.10 Fator de correção de hélice (Y_β)

O valor do fator de correção de hélice é calculado pela equação:

$$Y_\beta = 1 - \varepsilon_\beta \cdot \frac{\beta}{120} \quad (76)$$

Caso $\varepsilon_\beta > 1$, então considere $\varepsilon_\beta = 1$. Caso $\beta > 30^\circ$, considere $\beta = 30^\circ$.

4.9.11 Limite de resistência básico para tensão de flexão (σ_{F0})

O limite de resistência básico para tensão de flexão utilizado nesta norma é baseado no limite de resistência à flexão de um corpo de provas de 7.62 mm, com um nível de precisão de 99%.

Esta tensão tem que ser corrigida para os efeitos das condições de carregamento, tamanho, acabamento superficial, qualidade e vida antes de que ele possa ser usado como tensão admissível para os cálculos de flexão da raiz dos dentes das engrenagens. Estes fatores estão incluídos na equação (4.43).

O limite de resistência básico é obtido pelo gráfico da figura 4.16

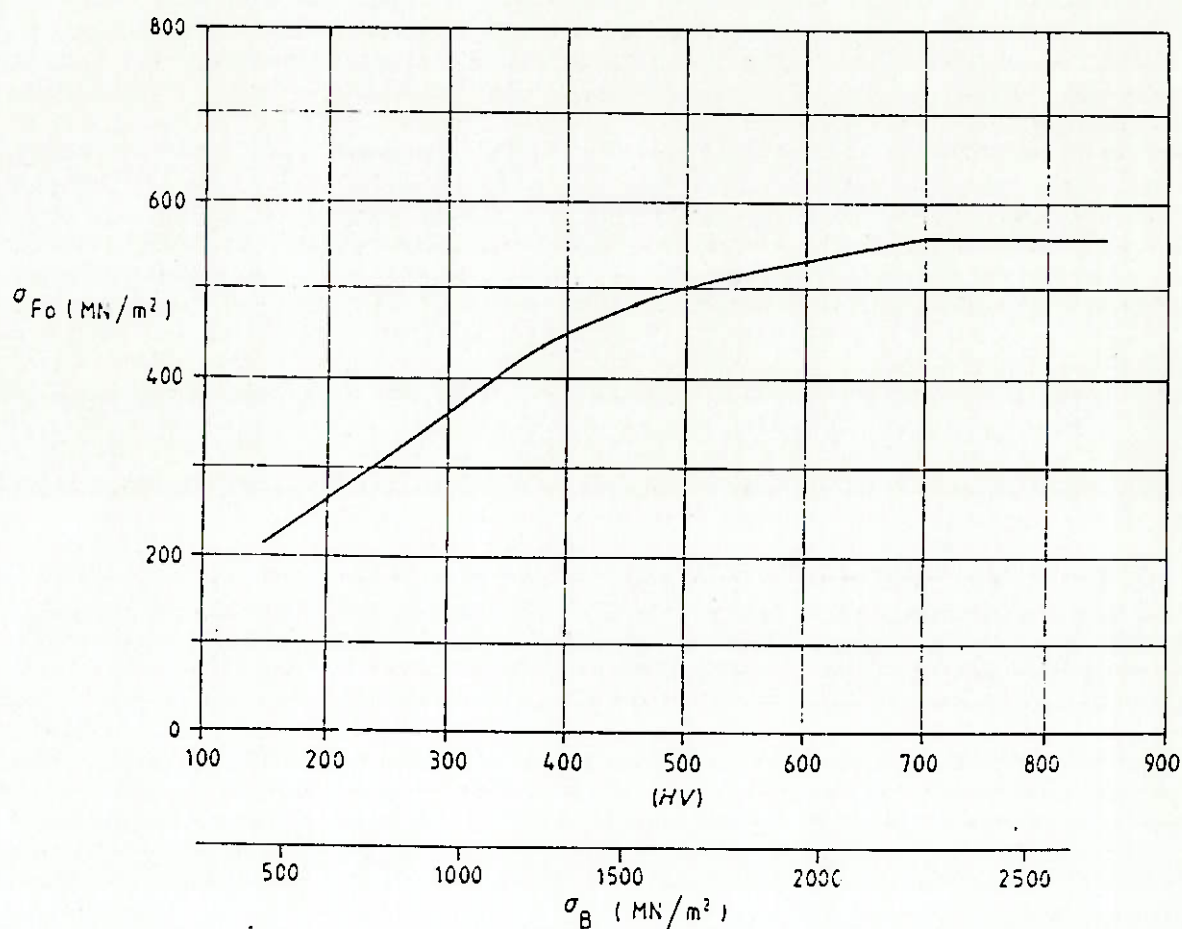


figura 4.16 Valores de σ_{F0}

4.9.12 Fator de qualidade do material para tensão de flexão (Y_M)

Um controle de qualidade melhor sobre a manufatura de um material resulta em uma menor dispersão das propriedades mecânicas do material final. Assim, materiais de qualidade melhor possuem uma tensão admissível maior e materiais de qualidade menor, tensões admissíveis menores. As qualidades dos materiais estão definidas no apêndice II.

O valor de Y_M é obtido pela tabela 4.12.

Material	Y _M		
	Qualidade A	Qualidade B	Qualidade C
Aços com tratamento térmico superficial	1.0	0.9	0.6
Aços com tratamento térmico total ou normalizados	1.0	0.9	0.6
Aços fundidos com tratamento térmico total ou normalizados e bronze	0.9	0.8	0.5
Ferro fundido nodular	0.7	0.6	0.5
Outro ferros fundidos	0.3	0.2	0.2

tabela 4.12. Valores de Y_M

4.9.13 Fator de sensibilidade para tensão de flexão (Y_δ)

O fator de sensibilidade leva em conta a sensibilidade do material da engrenagem à presença de ranhuras.

O valor de Y_δ no limite de resistência é calculado pela equação:

$$Y_\delta = \frac{1 + \sqrt{0.2 \rho' \cdot (1 + 2 \cdot q s)}}{1 + \sqrt{0.2 \cdot \rho'}} \quad (77)$$

onde ρ' é obtido pela tabela 4.13.

Material		ρ' (mm)
Ferros fundidos cinzentos		0.310
Aços nitrificados		0.100
Aços doce e bronze	$\sigma_{FY} = 300 \text{ MN/m}^2$	0.083
	$\sigma_{FY} = 400 \text{ MN/m}^2$	0.045
Aços com tratamento térmico total, aços fundidos e ferros fundidos SG	$\sigma_{0.2}^{(1)} = 500 \text{ MN/m}^2$	0.028
	$\sigma_{0.2} = 600 \text{ MN/m}^2$	0.019
	$\sigma_{0.2} = 800 \text{ MN/m}^2$	0.006
	$\sigma_{0.2} = 1000 \text{ MN/m}^2$	0.001
Aços cementados e temperados por indução ou chama		0.003

tabela 4.13. Valores de ρ'

4.9.14 Fator de condição de superfície para tensão de flexão (Y_R)

O fator de condição de superfície leva em conta a redução do limite de resistência devido às falhas no material e à rugosidade dos filetes da raiz do dente.

O valor do fator de condição de superfície é obtido pela figura 4.17.

A classificação de material do tipo 1 se aplica a aços com tratamento térmico total, bronze e ferros fundidos que não sejam os cinzentos (ver curva 1 da figura 4.17).

A classificação de material do tipo 2 se aplica a aços com tratamento térmico superficial onde a profundidade de casca é maior ou igual à profundidade limite de casca⁽¹⁾ (ver curva 2 da figura 4.17).

A classificação de material do tipo 3 se aplica a aços com tratamento térmico superficial onde a profundidade de casca é menor que a profundidade limite de casca⁽¹⁾ e ferro fundido cinzento (ver curva 3 da figura 4.17).

⁽¹⁾ $\sigma_{0.2}$ é a tensão de prova 0.2%.

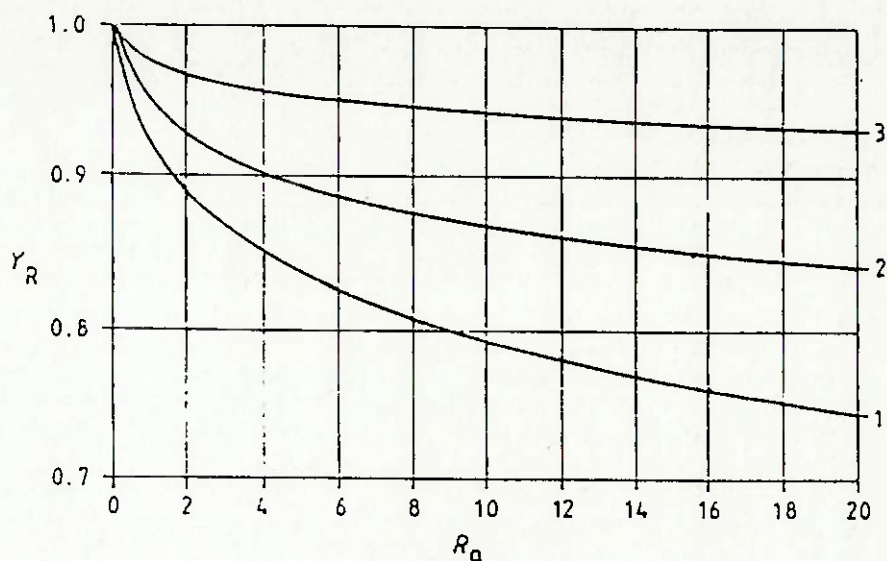


figura 4.17 Valores de Y_R

4.9.15 Fator de tamanho para tensão de flexão (Y_X)

O fator de tamanho é incluído para levar em conta possíveis influências do tamanho na qualidade do material e seu comportamento face o tratamento superficial ou processo de manufatura.

Seu valor é obtido pela figura 4.18.

A classificação de material do tipo 1 se aplica a aços com tratamento térmico total e ferros fundidos que não sejam os cinzentos (ver curva 1 da figura 4.18).

A classificação de material do tipo 2 se aplica a aços com tratamento térmico superficial (ver curva 2 da figura 4.18).

A classificação de material do tipo 3 se aplica a ferros fundidos cinzentos e bronze (ver curva 3 da figura 4.18).

4.9.16 Fator de vida para tensão de flexão (Y_N)

O fator de vida para tensão de flexão leva em conta o acréscimo na tensão admissível se o número de ciclos de operação for menor que a vida de resistência.

Caso a curva S-N do material seja conhecida, esta deve ser tomada como base para a determinação do fator de vida. Caso contrário, Y_N é obtido pelas figuras 4.19, 4.20 e 4.21, dependendo do material.

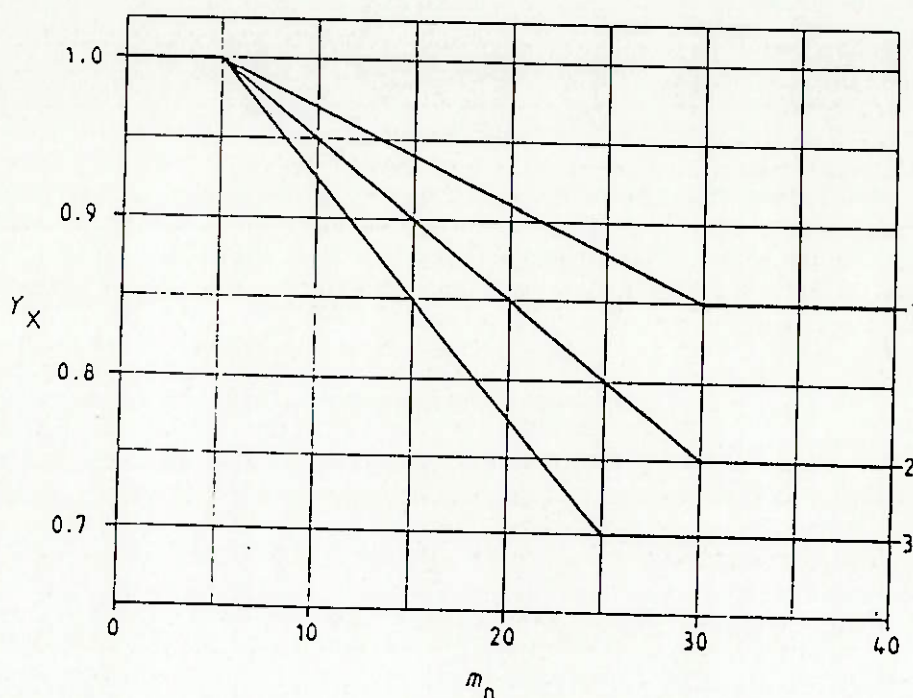


figura 4.18 Valores de Y_x

A figura 4.19 é aplicada para o caso de aços com tratamento térmico total.

A figura 4.20 é aplicada para aços com tratamento térmico superficial, onde a profundidade de casca é maior ou igual à profundidade de casca limite⁽¹⁾ e ferros fundidos.

A figura 4.21 é aplicada para aços com tratamento térmico superficial, onde a profundidade de casca é menor que a profundidade de casca limite⁽¹⁾, ferros fundidos cinzentos e bronze.

Para aços nitrificados, $Y_N=1.0$, para qualquer valor de N ⁽²⁾.

4.9.17 Fatores de carregamento para tensão de flexão ($K_{F\alpha}$ e $K_{F\beta}$)

Os fatores de carregamento para tensão de contato levam em conta as distribuições desiguais do momento fletor através da largura da face causadas por carregamentos desiguais através da face.

Os valores de $K_{F\alpha}$ e $K_{F\beta}$ são calculados pelas equações:

- (1) Ver tabela 2 para os valores da profundidade limite de casca.
 (2) Número de ciclos do dente.

$$K_{F\alpha} = K_{H\alpha} \quad (78)$$

$$K_{F\beta} = K_{H\beta}^{0.1/(1+h/b+(h/b)^2)} \quad (79)$$

onde h/b é o máximo entre h_1/b_1 e h_2/b_2 .

4.9.18 Fatores de segurança mínimo e atual para tensão na raiz do dente (S_{Fmin} e S_F)

O valor para o fator de segurança mínimo deve ser decidido de comum acordo entre o produtor da engrenagem e seu cliente⁽¹⁾.

O valor de S_F é calculado pela equação:

$$S_F = \frac{S_{Fmin} \cdot OFP}{OF} \quad (80)$$

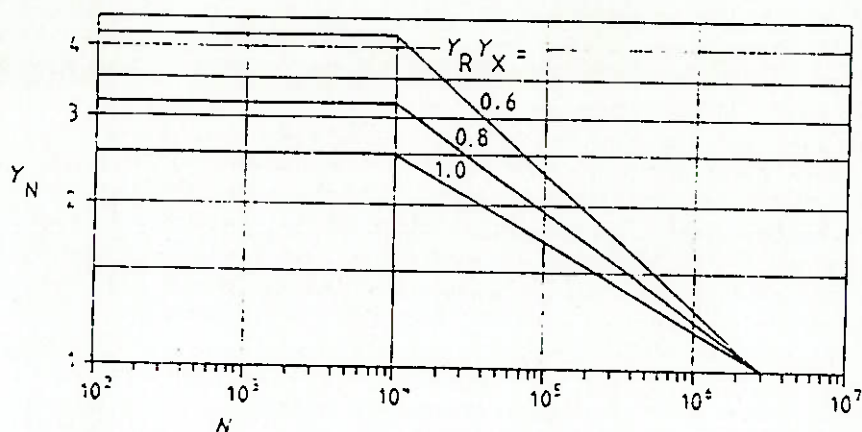


figura 4.19 Valores de Y_N para aços com tratamento térmico total

(1) O valor deve refletir a realidade das condições de operação e das propriedades do material. Quando o histograma de carregamento não é conhecido ao certo ou quando altos carregamentos do dente podem ocorrer devido a circunstâncias fora do escopo desta norma, um fator apropriadamente alto do fator de segurança mínimo deve ser escolhido. Os limites para S_{Fmin} recomendados são:

- S_{Fmin} = 1.4 até 1.5 para aplicações industriais normais;
- S_{Fmin} = 1.6 até 3.0 para aplicações que exijam alta confiabilidade ou aplicações críticas (aquelas que possam causar ferimentos graves, morte, etc.)

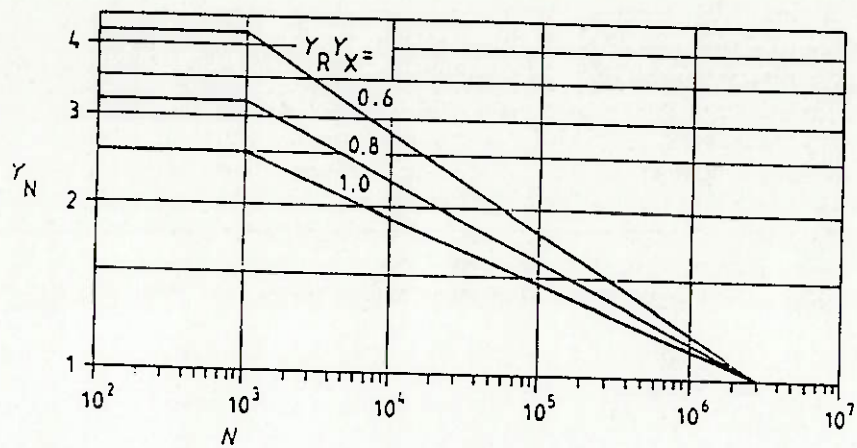


figura 4.20 Valores de Y_N para aços com tratamento superficial com casca grossa e ferros fundidos

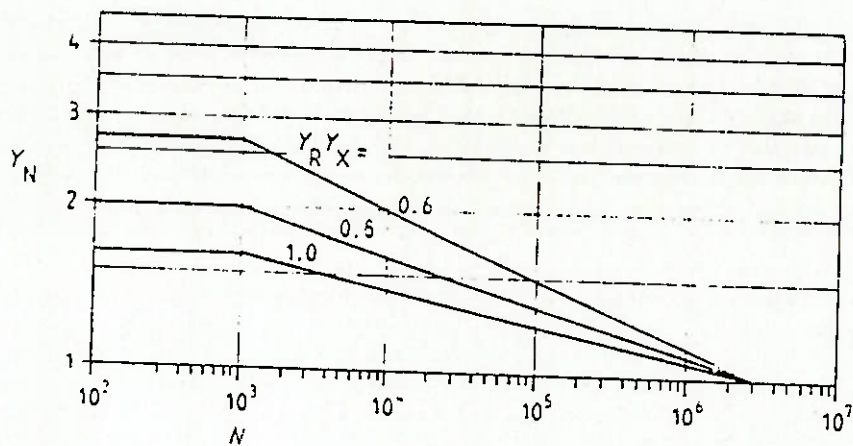


figura 4.21 Valores de Y_N para aços com tratamento térmico superficial com casca fina, ferros fundidos cinzentos e bronze

Capítulo 5

Sistema para dimensionamento automático de engrenagens

5.1 Introdução

Devido ao grande número de cálculos envolvidos para o dimensionamento de engrenagens, há uma grande probabilidade de erros durante o projeto.

Para minimizar estes erros e facilitar o trabalho do projetista, tornando-o mais rápido e eficiente, foi desenvolvido um sistema para o cálculo automático de engrenagens⁽¹⁾.

Para utilizar o programa deve-se colocar o disquete no drive A e digitar:

a:\GR <ENTER>.

O programa começará, então, a ser executado.

5.2 Dados de entrada

Para o correto dimensionamento das engrenagens, alguns dados devem ser fornecidos ao sistema. Estes dados serão utilizados para fazer uma correta seleção dos fatores de correção descritos nos capítulos anteriores, bem como das dimensões básicas das engrenagens.

Os dados requeridos pelo sistema, conforme o que foi exposto nos capítulos anteriores, são:

- o tipo engrenagem a ser projetada (dentes retos ou helicoidais - digitar o número da opção);
- o módulo normalizado do engrenamento⁽²⁾ (mm);
- a relação de transmissão;
- o número de dentes do pinhão;
- a largura das engrenagens (mm);
- o ângulo de hélice em graus, no caso de engrenagens cilíndricas de dentes helicoidais;
- a distância entre centros de trabalho (mm);
- o valor das correções, se necessário;
- o valor do torque a ser transmitido (N.m);
- os materiais da coroa e do pinhão (digitar o número da opção);
- a qualidade do material do pinhão e da coroa (digitar a letra da opção);
- o grau de precisão de fabricação (digitar um valor entre 3 e 10);
- o valor da resistência máxima à tração do pinhão e da coroa (MN/m²);
- o tipo de tratamento térmico do pinhão e da coroa (digitar o número da opção);
- as profundidades efetivas de casca do pinhão e da coroa (mm);
- o valor da viscosidade cinemática do lubrificante a 40° C (cSt);
- a rotação do pinhão (rpm);
- o valor da rugosidade média do pinhão e da coroa (mm);
- o valor da dureza superficial do pinhão e da coroa (HV);
- a vida da engrenagem (h);
- o tipo de carregamento no eixo movido e no eixo motor (digitar o número da opção);

(1) Para maiores detalhes, o Apêndice VIII contém a listagem completa, em Pascal, das rotinas que compõe o sistema de dimensionamento de engrenagens.

(2) Consultar o Apêndice V para valores de módulo normalizado.

- o valor do fator de segurança mínimo para a tensão de contato;
- o tipo de correção de forma (digitar o número da opção);
- a maneira com a qual a engrenagem irá ser fixada ao eixo (digitar o número da opção);
- o tipo de arranjo (digitar a opção entre 1 e 7);
- a distância da engrenagem ao centro do vão (mm);
- o comprimento do vão (mm);
- o diâmetro do eixo do pinhão (mm);
- o valor da tensão residual no pinhão e na coroa (MN/m^2);
- o valor do fator de segurança mínimo para a tensão de flexão;
- a altura do dente da ferramenta de corte (mm);
- o raio do pé da ferramenta de corte (mm);
- a espessura da protuberância da ferramenta de corte, caso houver (mm).

5.3 Dados de saída

Após o processamento dos dados, o sistema gerará um relatório contendo as características geométricas da engrenagem, bem como dados referentes à sua capacidade de carregamento.

Os dados de saída do relatório, com base nos procedimentos apresentados nos capítulos anteriores, são:

- a relação de transmissão;
- as distâncias entre centros nominal, de trabalho e corrigida;
- o ângulo de pressão;
- o módulo normalizado;
- o passo;
- o número de dentes do pinhão e da coroa;
- os raios de base, primitivo, de cabeça e de pé do pinhão e da coroa;
- os valores do adendo, do dedendo e da altura dos dentes do pinhão e da coroa;
- a espessura dos dentes no círculo primitivo do pinhão e da coroa;
- o valor das correções;
- o valor da tensão admissível de contato, de flexão, as capacidades máximas de torque e potência baseadas nas tensões de flexão e contato para o pinhão e para a coroa;
- o grau de recobrimento e o coeficiente de rebaixamento;

Este relatório será apresentado primeiramente na tela e, logo em seguida, será gerado na impressora.

5.4 Desenho

Para que o usuário do sistema possa ter uma idéia das dimensões relativas do pinhão e da coroa, é mostrado na tela, após a impressão do relatório, um desenho contendo as duas engrenagens, mantidas as devidas proporções entre elas.

Neste desenho estão representados os dentes⁽¹⁾ de cada engrenagem, bem como as circunferências de cabeça, primitiva, de base e de pé.

⁽¹⁾ O desenho dos dentes das engrenagens foi baseado na equação da curva envolvente.

Apêndice I
Graus de Precisão de manufatura

Graus		3	4	5	6	7	8	9	10
Furo	Tolerância de tamanho	IT4*	IT4	IT5	IT6	IT7	IT7	IT8	IT8
	Tolerância de forma	IT3							
Eixo	Tolerância de tamanho	IT4	IT4	IT5	IT5	IT6	IT6	IT8	IT8
	Tolerância de forma	IT3							
Excentricidade radial do cilindro de cabeça		$0.01d_a+2.5$		$0.016d_a+10$		$0.025d_a+15$		$0.04d_a+25$	
Excentricidade radial da superfície de referência									
Excentricidade axial da superfície de referência									
Diâmetro do blank		IT7	IT7	IT7	IT8	IT8	IT8	IT9	IT9

tabela I.1 Graus de precisão de manufatura

* Os valores de IT são as tolerâncias fundamentais internacionalmente reconhecidas (para maiores detalhes, ver norma BS 4500, "ISO limits and fits", parte 1, "General, tolerances and deviations").

Apêndice II

Graus de qualidade de materiais

II.1 Introdução

Os três graus de qualidade seguintes são recomendados:

- Qualidade C define os requisitos mínimos para os materiais e seu tratamento térmico para engrenagens com carregamento leve em aplicações não críticas;
- Qualidade B define os requisitos para os materiais e seu tratamento térmico para a maior parte das aplicações industriais de engrenagens a um custo razoável;
- Qualidade A define os requisitos máximos para os materiais e seu tratamento térmico para aplicações especiais, como por exemplo potências elevadas ou aplicações onde se exija grande confiabilidade.

II.2 Especificações de qualidade

Para se classificar um par de engrenagens em um dos níveis de qualidade apresentados, uma especificação deve ser apresentada para definir os níveis de inspeção requeridos em cada etapa da manufatura. Esta especificação deve ser determinada de comum acordo entre o fabricante e o usuário da engrenagem.

A seguir será feito um comentário básico sobre cada grau de qualidade, sem a intenção de torná-los uma base para a especificação propriamente dita. Estes comentários tem o propósito de apenas auxiliar à uma correta seleção do grau de qualidade de um material manufaturado dentro de uma especificação já existente. Na prática, uma especificação completa irá cobrir um número maior de itens⁽¹⁾.

II.3 Comentários básicos sobre cada grau de qualidade

II.3.1 Qualidade C

Os requisitos de inspeção para materiais com grau de qualidade C são os seguintes:

- propriedades mecânicas: apenas medição de dureza;
- profundidade de casca: checagem de cauterização em um corpo de provas cementado com a engrenagem. Para têmpera por indução ou chama, fazer a checagem na face final do dente de uma engrenagem de amostra;
- reparos com solda: são permitidos para aços fundidos, desde que feitos com um procedimento aprovado. Para outros materiais, não é permitido na área do dente.

⁽¹⁾ Para maiores detalhes, consultar as normas: BS 240 part 1, BS 427 part 1, BS 891 part 1, BS 131, parts 1 e 2, BS 6072, BS 4080, BS 4124 part 1 e BS 5996.

II.3.2 Qualidade B

Para ferros fundidos que não sejam nodulares, a tensão admissível para o grau de qualidade B é a mesma para o grau C, sempre levando em conta a segurança. Os requisitos de inspeção são os mesmos que os do grau de qualidade C. Para outros materiais, os requisitos de inspeção para materiais com grau de qualidade B são os seguintes:

- análise química: certificação do fornecedor;
- propriedades mecânicas (na condição final) : medição de dureza, σ_B e Charpy ou Izod;
- detecção de rachaduras: inspeção magnética (inspeção 100% em materiais com tratamento térmico superficial, caso contrário, inspeção em amostras aleatórias);
- reparos com solda: são permitidos para aços fundidos, desde que feitos com um procedimento aprovado. Para outros materiais, não é permitido na área do dente;
- inspeção com ultrassom: inspeção 100% em materiais fundidos;
- profundidade de casca: checagem de cauterização em um corpo de provas cementado com a engrenagem. Para têmpera por indução ou chama, fazer a checagem na face final e em todo o perfil do dente de uma engrenagem de amostra ou de todas as engrenagens produzidas (dependendo do tamanho do lote);
- estrutura do núcleo (ferros nodulares): checagem de uma amostra do lote para a composição de perlita e ferrita e grafita esferoidal;
- tratamento térmico (aços cementados): fornos com controle de atmosfera apropriado.

II.3.3 Qualidade A

Todos os testes aplicados ao grau de qualidade B se aplicam ao grau de qualidade A, com a diferença de que em A não existem checagens de amostras aleatórias, apenas inspeção 100%. Alguns requisitos adicionais são:

- inspeção com ultrassom: checagem 100%;
- profundidade de casca: checagem da dureza transversal em um corpo de provas (mesmo material fundido e com as mesmas condições de tratamento térmico) cementado junto com a engrenagem. Para engrenagens com têmpera por indução ou chama, a checagem da dureza transversal deve ser feita em posições pré-definidas através da face num teste destrutivo da engrenagem ou de um corpo de prova com tratamento térmico nas mesmas condições da engrenagem;
- estrutura da superfície (aços cementados): testes em corpo de prova (essencialmente martensita e austenita retida e carbeto);
- Tratamento térmico: registro de temperaturas do forno.

Apêndice III

Tensões residuais típicas

III.1 Introdução

As tensões residuais apresentadas na tabela III.1 são valores típicos após as engrenagens terem sofrido os tratamentos térmicos indicados. Se a tensão residual atual da engrenagem ou do corpo de prova é medida, então este valor deve ser usado ao invés dos fornecidos pela tabela III.1 e III.4, e devem ser informados ao usuário, justificando.

III.2 Cementação e têmpera

Um tratamento térmico incorreto pode resultar numa redução dos níveis de tensão residual menor do que o indicado. Em particular, a decarbonização irá reduzir o nível de tensão residual. O grau de decarbonização pode ser detectado pela medição da dureza superficial.

III.3 Afição da engrenagem

A afiação da superfície pode afetar a tensão residual na superfície e, como base, os valores da tabela III.2 podem ser algebricamente adicionados aos valores da tabela III.1.

Processo de endurecimento	Qualidade A ou B		Qualidade C	
	σ_R	σ_{Rcore}	σ_R	σ_{Rcore}
Cementação e têmpera	-400 MN / m ²	240 MN / m ²	0 MN / m ²	240 MN / m ²
Nitrificação	-400 MN / m ²	140 MN / m ²	0 MN / m ²	140 MN / m ²
Têmpera por indução	-140 MN / m ²	450 MN / m ²	0 MN / m ²	450 MN / m ²

tabela III.1 Valores típicos de tensão residual

III.4 Shot peening

O shot peening pode ser usado para aumentar a redução da tensão residual na superfície. Como uma base, os valores típicos da alteração na tensão residual após o shot peening com a técnica correta são apresentados na tabela III.2.

Operação	Alteração algébrica em σ_R
Desbaste leve, cuidadosamente controlado	0 MN/m ²
Desbaste leve em toda a forma	+300 MN/m ² (tração)
Desbaste pesado	+600 MN/m ² (tração)
Shot peening controlado	-500 MN/m ² (compressão)

tabela III.2 Valores da alteração da tensão residual devido às operações de pós-endurecimento

Apêndice IV

Guia de projeto para modificações nos dentes

IV.1 Introdução

Este guia de projeto foi incluído como um auxílio para os projetistas de engrenagens para que possam escolher valores adequados de alívios e correções dos dentes.

IV.2 Alívio das extremidades

O alívio das extremidades é usado em engrenagens cilíndricas de dentes helicoidais para permitir deflexões do dente para que um dente que esteja entrando na zona de engrenamento receba um choque menor, o que é muito importante para engrenamentos dos quais se exija um baixo nível de ruído. É também usado para evitar altos valores de carregamento nas extremidades dos dentes devido aos desalinhamentos do engrenamento.

A altura do alívio está relacionada com a deflexão e com o desalinhamento.

Os limites recomendados para a largura do alívio são: $0.005b \leq l_c \leq 0.1b$.

Para a altura do alívio, os limites recomendados são: $F\beta_y \leq C_b \leq F\beta_y + 20$.

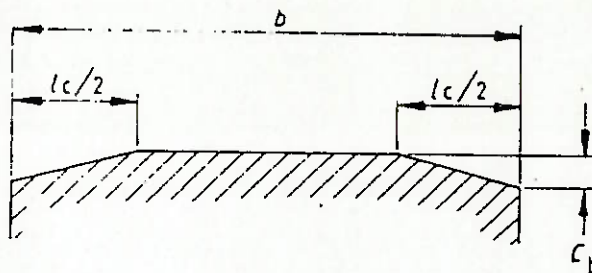


figura IV.1 Altura e largura do alívio das extremidades

IV.3 Correção de hélice

A correção de hélice é determinada calculando-se a forma defletida do pinhão, em um carregamento particular, assumindo uma distribuição uniforme do carregamento por toda a face (excluindo-se apenas a região de alívio das extremidades). O complemento desta forma defletida (geralmente aproximada a uma linha reta) é aplicado ao dente em termos de metal removido.

Já que a correção de hélice é completamente efetiva apenas quando a engrenagem está operando sob o carregamento para o qual a correção foi calculada, a escolha do carregamento de projeto é muito importante.

Alguns pontos devem ser considerados na escolha deste carregamento.

Um deles é que quando a engrenagem estiver trabalhando sob carregamentos menores que o de projeto, $K_H\beta$ irá aumentar e pode se tornar maior que o seu valor sem a correção de hélice. O carregamento específico será, contudo, inferior ao de projeto.

Outro ponto é que quando a engrenagem estiver trabalhando sob carregamentos maiores que o de projeto, $K_H\beta$ irá aumentar mas sempre será menor que seu valor sem a correção de hélice, para o carregamento particular considerado.

A menos que a correção seja projetada após um teste de engrenamento sem carga, os erros de manufatura e de posicionamento não podem ser compensados pela correção de hélice. É recomendado, então, que a correção de hélice seja usada apenas para engrenagens com alto grau de precisão de manufatura e posicionamento, de tal forma que nenhum erro será negligenciado, a menos que as correções sejam projetadas para acomodar os erros como foram medidos no teste de engrenamento sem carregamento. O arredondamento é recomendado preferencialmente à correção de hélice se pode-se prever antecipadamente erros de alinhamento.

IV.4 Arredondamento

O arredondamento é forma não refinada de correção de hélice usada para compensar os erros de manufatura e as deformações das engrenagens quando estiverem sob carregamento. É recomendado que o arredondamento seja usado apenas se o valor de $K_H\beta$ for maior que 2 sem o arredondamento.

Os limites recomendados para a altura do arredondamento são: $F\beta_y \leq C_c \leq F\beta_y + 20$.

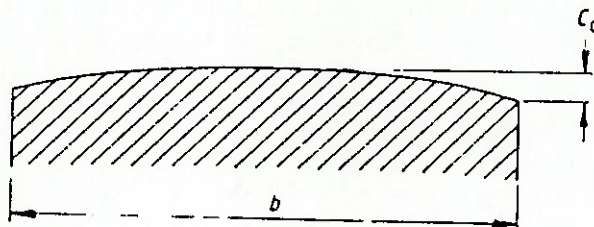


figura IV.2 altura do arredondamento

Apêndice V

Módulos normalizados

Opção principal	Opção secundária
1	1.125
1.25	1.375
1.5	1.75
2	2.25
2.5	2.75
3	3.5
4	4.5
5	5.5
6	7
8	9
10	11
12	14
16	18
20	22
25	28
32	36
40	45
50	

tabela V.1 Módulos normalizados

Apêndice VI

Equações dos gráficos do capítulo 4

VL1 Equações para o gráfico da figura 4.1

Para aços com tratamento térmico total e ferros fundidos:

Para aços com tratamento térmico superficial:

VL2 Equações para o gráfico da figura 4.2

Se $\sigma_B < 2130$, então $\sigma_{HD} = \sigma_B$.

Se $\sigma_B \geq$, então $\sigma_{HD} = 2130$.

VL3 Equações para o gráfico da figura 4.3

Se $\rho_{rel}/m_n \leq 2$, então $Z_G = 1.0$.

Se $\sigma_B \leq 600$, então $Z_G = 1.0$.

Se $\sigma_B = 800$ e $2.0 < \rho_{rel} < 8.0$, então

$$Z_G = 1.1195 - 0.066 \cdot (\rho_{rel}/m_n) + 0.002975 \cdot (\rho_{rel}/m_n)^2 + 0.000006 \cdot (\rho_{rel}/m_n)^3$$

Se $\sigma_B = 800$ e $8.0 \leq \rho_{rel} < 9.0$, então

$$Z_G = 0.9995 - 0.036 \cdot (\rho_{rel}/m_n) + 0.0011 \cdot (\rho_{rel}/m_n)^2 + 0.000006 \cdot (\rho_{rel}/m_n)^3$$

Se $\sigma_B = 800$ e $\rho_{rel} \geq 9.0$, então

$$Z_G = 0.80834$$

Se $\sigma_B = 1000$ e $2.0 < \rho_{rel} < 9.0$, então

$$Z_G = 1.1625 - 0.0876 \cdot (\rho_{rel}/m_n) + 0.00295 \cdot (\rho_{rel}/m_n)^2 + 0.000102 \cdot (\rho_{rel}/m_n)^3$$

Se $\sigma_B = 1000$ e $9.0 \leq \rho_{rel} < 10.0$, então

$$Z_G = 1.0669 - 0.0696 \cdot (\rho_{rel}/m_n) + 0.0024 \cdot (\rho_{rel}/m_n)^2 + 0.000072 \cdot (\rho_{rel}/m_n)^3$$

Se $\sigma_B = 1000$ e $\rho_{rel} \geq 10.0$, então

$$Z_G = 0.68292$$

Se $\sigma_B = 1400$ e $2.0 < \rho_{rel} < 10.0$, então

$$Z_G = 1.1917 - 0.10603 \cdot (\rho_{rel}/m_n) + 0.00509 \cdot (\rho_{rel}/m_n)^2 + 0.0000092 \cdot (\rho_{rel}/m_n)^3$$

Se $\sigma_B = 1400$ e $10.0 \leq \rho_{rel} < 12.0$, então

$$Z_G = 0.8901 - 0.05137 \cdot (\rho_{rel}/m_a) + 0.003206 \cdot (\rho_{rel}/m_a)^2 + 0.0000658 \cdot (\rho_{rel}/m_a)^3$$

Se $\sigma_B = 1400$ e $\rho_{rel} \geq 12.0$, então

$$Z_G = 0.6217$$

Se $\sigma_B \geq 2130$ ou o material seja aço com tratamento térmico superficial e $2.0 < \rho_{rel} < 12.0$, então

$$Z_G = 1.22 - 0.125 \cdot (\rho_{rel}/m_a) + 0.0078 \cdot (\rho_{rel}/m_a)^2 + 0.00016 \cdot (\rho_{rel}/m_a)^3$$

Se $\sigma_B \geq 2130$ ou o material seja aço com tratamento térmico superficial e $\rho_{rel} \geq 12.0$, então

$$Z_G = 0.5667$$

VL.4 Equações para o gráfico da figura 4.4

Se $c_{eff}/c_{lim} < 1.0$, então $Z_c = [5.0 + 3 \cdot (c_{eff}/c_{lim})]/8$

Se $c_{eff}/c_{lim} > 1.0$, então $Z_c = 1.0$.

VL.5 Equações para o gráfico da figura 4.5

$$Z_L Z_v = (0.8643 + 0.5429 / (1.2 + 134 / v_{40})^2) \cdot (0.8843 + 0.2587 / \sqrt{1 + 40/v})$$

VL.6 Equações para os gráficos da figura 4.6

$$Z_R = \left(\frac{1}{2 \cdot R_a} \right)^{0.12}$$

VL.7 Equações para os gráficos da figura 4.7

$$ZW = 1 + (0.25 - 0.16 \cdot \log_{10}(1 + 3 \cdot R_a)) \cdot (1 - HV/500)$$

VL.8 Equações para os gráficos da figura 4.8

- curva 1:

Se $N \leq 5 \cdot 10^4$, então $Z_N = 2.0$

Se $5 \cdot 10^4 < N \leq 2.235 \cdot 10^5$, então $Z_N = (5 \cdot 10^7 / N)^{0.10034}$

Se $2.235 \cdot 10^5 < N \leq 10^7$, então $Z_N = 1.3 \cdot (10^7 / N)^{0.0738024}$

Se $10^7 < N < 10^9$, então $Z_N = (10^9 / N)^{0.05697}$

Se $N \geq 5 \cdot 10^9$, então $Z_N = 1.0$

- curva 2:

Se $N \leq 5 \cdot 10^4$, então $Z_N = 2.0$

Se $5 \cdot 10^4 < N \leq 5 \cdot 10^7$, então $Z_N = (5 \cdot 10^7 / N)^{0.10034}$

Se $N \geq 5 \cdot 10^7$, então $Z_N = 1.0$

- curva 3:

Se $N \leq 10^5$, então $Z_N = 1.6$

Se $10^5 < N \leq 5 \cdot 10^7$, então $Z_N = 1.6 \cdot (10^5 / N)^{0.0756288}$

Se $N \geq 5 \cdot 10^7$, então $Z_N = 1.0$

- curva 4:

Se $N \leq 10^5$, então $Z_N = 1.3$

Se $10^5 < N \leq 2 \cdot 10^6$, então $Z_N = (2 \cdot 10^6 / N)^{0.08756}$

Se $N \geq 2 \cdot 10^6$, então $Z_N = 1.0$

- curva 5:

Se $N \leq 10^5$, então $Z_N = 1.1$

Se $10^5 < N \leq 2 \cdot 10^6$, então $Z_N = 1.1 \cdot (10^5 / N)^{0.0318153}$

Se $N \geq 2 \cdot 10^6$, então $Z_N = 1.0$

VL.9 Dados para o gráfico da figura 4.10

Grau	Q _v vZ ₁				
	0	1400	1440	2000	2540
3	1.0	1.18	1.47	1.47	1.18
4	1.0	1.23	1.54	1.54	1.23
5	1.0	1.31	1.65	1.65	1.31
6	1.0	1.45	1.80	1.80	1.45
7	1.0	1.65			
8	1.0	1.96			
9	1.0	2.44			
10	1.0	3.38			

tabela VI.1 Valores de Kv350 β nas descontinuidades

Grau	Kv350 β
7	1.50
8	1.50
9	1.50
10	1.42

tabela VI.2 Valores de Kv350 β nos pontos terminais

VL.10 Dados para o gráfico da figura 4.11

Grau	Q _v vz ₁				
	0	1000	1040	1400	1800
3	1.0	1.21	1.77	1.77	1.21
4	1.0	1.30	1.89	1.89	1.30
5	1.0	1.42	2.06	2.06	1.42
6	1.0	1.61	2.26	2.26	1.65
7	1.0	1.92	2.60	2.60	1.98
8	1.0	2.29			
9	1.0	2.78			
10	1.0	3.50			

tabela VI.3 Valores de Kv350 α nas descontinuidades

Grau	Kv350 β
7	2.40
8	1.96
9	1.96
10	1.82

tabela VI.2 Valores de Kv350 α nos pontos terminais

VI.11 Equação para o gráfico da figura 4.13

$$q_y = 1 - \frac{320}{\sigma_{F0 \text{ lim}}}$$

com $0.45 \leq q_y \leq 0.85$

VI.12 Equações para o gráfico da figura 4.16

Se $HV \leq 100$, então $\sigma_{F0} = 1.3794 \cdot HV - 23.95$

Se $100 < HV \leq 350$, então $\sigma_{F0} = HV + 61.89$

Se $350 < HV < 700$, então

$$\sigma_{F0} = 67.2419 - 4.5975 \cdot HV + 0.060631 \cdot HV^2 - 0.269986 \cdot 10^{-3} \cdot HV^3 + 0.643291 \cdot 10^{-6} \cdot HV^4 - 0.879172 \cdot 10^{-9} \cdot HV^5 + 0.650993 \cdot 10^{-12} \cdot HV^6 - 0.202462 \cdot 10^{-15} \cdot HV^7$$

Se $HV \geq 700$, então $\sigma_{F0} = 560$

VI.13 Equações para o gráfico da figura 4.17

- curva 1:

$$YR = 1.49 - 0.471 \cdot (6 \cdot Ra + 1)^{0.1}$$

- curva 2:

$$YR = 4.924 - 3.9 \cdot (6 \cdot Ra + 1)^{0.01}$$

- curva 3:

$$YR = 4.161 - 3.155 \cdot (6 \cdot Ra + 1)^{0.005}$$

VI.14 Equações para o gráfico da figura 4.18

- para todas as curvas:

$$\text{Se } m_n \leq 5, \text{ então } Y_x = 1.0$$

- curva 1:

$$\text{Se } 5 < m_n < 30, \text{ então } Y_x = 1.03 - 0.006 \cdot m_n$$

$$\text{Se } m_n \geq 30, \text{ então } Y_x = 0.85$$

- curva 2:

$$\text{Se } 5 < m_n < 30, \text{ então } Y_x = 1.05 - 0.01 \cdot m_n$$

$$\text{Se } m_n \geq 30, \text{ então } Y_x = 0.75$$

- curva 3:

$$\text{Se } 5 < m_n < 25, \text{ então } Y_x = 1.075 - 0.015 \cdot m_n$$

$$\text{Se } m_n \geq 25, \text{ então } Y_x = 0.70$$

VI.15 Equações para o gráfico da figura 4.19

$$Y_N = (3 \cdot 10^6 / N)^{\exp}$$

$$\text{onde } \exp = \frac{\log_{10}(2.5 / (Y_R \cdot Y_X))}{\log_{10} 300}$$

$$\text{e } 1.0 \leq Y_N \leq 2.5 / (Y_R \cdot Y_X)$$

VI.16 Equações para o gráfico da figura 4.20

$$Y_N = (3 \cdot 10^6 / N)^{\exp}$$

$$\text{onde } \exp = \frac{\log_{10}(2.5 / (Y_R \cdot Y_X))}{\log_{10} 3000}$$

$$\text{e } 1.0 \leq Y_N \leq 2.5 / (Y_R \cdot Y_X)$$

VL17 Equação para o gráfico da figura 4.21

$$Y_N = (3 \cdot 10^6 / N)^{\exp}$$

$$\text{onde } \exp = \frac{\log_{10}(1.6 / (Y_R \cdot Y_X))}{\log_{10} 3000}$$

$$\text{e } 1.0 \leq Y_N \leq 1.6 / (Y_R \cdot Y_X)$$

Apêndice VII

Bibliografia

VIII.1 Bibliografia

- [1]. BRITISH STANDARDS INSTITUTION - BS 436 : Spur and helical gears - Part 3. Method for calculation of contact and root bending stress limitations for metallic involute gears - Londres - BSI - 1986

- [2]. BRITISH STANDARDS INSTITUTION - BS 436 : Spur and helical gears - Part 2. Basic rack form, modules and accuracy - Londres - BSI - 1970

- [3]. FILHO, MARCO STIPKOVIC - Engrenagens - São Paulo - McGraw-Hill - 1973

- [4]. JUVINALL, ROBERT C. - Fundamental of machine component design - Nova Iorque - John Wiley & Sons - 1983

- [5]. ANTAS, LUIZ MENDES - Dicionário de termos técnicos - São Paulo - Traço Editora - 1980

- [6]. YESTER, MICHAEL - Using Turbo Pascal 6 - Carmel - QUE - 1991

- [7]. DIMAROGONAS, ANDREW - Computer aided machine design - Nova Iorque - Prantice-Hall International - 1988

Apêndice VIII
Listagem do programa

```

Program GR;

uses crt,dos,graph;

const pi=3.141592654;

type indice=array [1..2] of real;
      indice_i=array[1..2] of integer;

var
  qual:char;
  i_real;
  poisson:indice;
  elasticidade:indice;
  b:real;
  l_creal;
  teta_ant:real;
  k_v:real;
  b_real;
  x_real;
  f_h_treal;
  f_treal;
  t_h_l:real;
  ro_f_m_n:indice;
  s_f_n_m_n:indice;
  opcao:integer;
  teta:indice;
  erro:real;
  t_f_p:indice;
  p_f_p:indice;
  s_f_min:real;
  sigma_r:indice;
  sigma_f_p:indice;
  k_f_beta:real;
  h_b:real;
  k_f_alfa:real;
  y_n:indice;
  y_x:indice;
  y_r:indice;
  y_delta:indice;
  ro_linha:indice;
  y_m:indice;
  sigma_f_0:indice;
  y_beta:real;
  y_s:real;
  q_s:indice;
  l_:indice;
  s_f_m_n:indice;
  y_f:indice;
  alfa_f_e_n:indice;
  h_f_m_n:indice;
  gama_f_e_n:indice;
  gama_e:indice;
  alfa_e_n:indice;
  d_b_n:indice;
  d_e_n:indice;

```

```

h:indice;
s_p_r:real;
d :indice;
x:indice;
h_f_p:real;
ro_f_p:indice;
g:indice;
d_f:indice;
d_a_n:indice;
d_f_n:indice;
d_n:indice;
z_v:indice;
eps_alfa_n:real;
t_h_p:indice;
p_h_p:indice;
sigma_h:indice;
k_h_alfa:real;
y_alfa_real;
y_alfa:indice;
f_p_e:real;
k_h_beta:real;
c_gama:array[1..5] of real;
divi:real;
f_beta_y:real;
q_y:real;
f_beta_x:real;
f_m_a:real;
d_s_h:indice;
f_s_h:real;
k:real;
arranjo:integer;
montagem:integer;
tipo_de_par_engrenado:integer;
a:real;
l:real;
s:real;
w_m:real;
b_eff:real;
d:indice;
alfa_t_w:real;
alfa_t:real;
d_w:indice;
g_alfa:real;
d_a:indice;
d_b:indice;
p_b_t:real;
beta:real;
beta_b:real;
z_h:real;
eps_alfa:real;
eps_beta:real;
eps_gama:real;
ecdr:boolean;
z_eps:real;
material_combination:integer;
z_e:real;

```

```

counter:integer;
sigma_h_d:indice;
sigma_b:indice;
c_lim:indice;
hardening:indice_i;
material:indice_i;
z_c:indice;
c_eff:indice;
z_g:indice;
sigma_h_lim:indice;
z_m:indice;
aux:integer;
qualidade:indice_i;
v:real;
n:indice;
z_l_z_v:real;
v_40:real;
r_a:indice;
r_z:indice;
z_r:indice;
z_w:indice;
z_x:indice;
hv:indice;
ciclos:indice;
life:real;
curve:indice_i;
z_n:indice;
sigma_h_p:indice;
s_h_lim:real;
k_a:real;
K_A:array [1..4,1..4] of real;
lop_m:integer;
lod_m:integer;
q_v:real;
k_v_350:real;
z:indice;
grade:integer;
estimado:real;
Z_M_      : array [1..5,1..3] of real;
Y_M_      : array [1..5,1..3] of real;
Z_E_tabelado : array [1..4]      of real;
corr       : char;
cor_       : word; { Cor dos dentes das engrenagens }
cor_2      : word; { Cor das circunferencias }
px2        : integer;
py2        : integer;
px1        : integer;
py1        : integer;
posx1      : integer;
posy       : integer;
posx2      : integer;
ang        : integer;
k_         : integer;
counter1   : integer;
a_         : real; { Distancia entre centros de trabalho }
ao         : real; { Distancia entre centros para engrenamento 0 }

```

```

a1      : real; { Distancia entre centros corrigida }
i       : real; { Relacao de transmissao }
alfa_n  : real; { Novo angulo de pressao para engrenamento V }
alfao   : real; { Angulo de pressao para engrenamento 0 }
r1      : real; { Raio primitivo do pinhao }
r2      : real; { Raio primitivo da coroa }
rb1     : real; { Raio de base do pinha }
rb2     : real; { Raio de base da coroa }
m       : real; { Modulo corrigido }
mo      : real; { Modulo normalizado }
h1      : real;
h2      : real;
ha1     : real;
ha2     : real;
hf1     : real;
hf2     : real;
ra1     : real; { Raio de cabeca do pinhao }
ra2     : real; { Raio de cabeca da coroa }
rf1     : real; { Raio de pe' do pinhao }
rf2     : real; { Raio de pe' da coroa }
soma_das_correcoes : real;
x1      : real; { Correcao do pinhao }
x2      : real; { Correcao da coroa }
p       : real;
so1     : real; { Espessura do dente do pinhao no diametro primitivo }
so2     : real; { Espessura do dente da coroa no diametro primitivo }
eo1     : real;
eo2     : real;
Kfolga  : real;
grau_de_recobrimento : real;
esc     : real;
ap      : real;
bp      : real;
angaux  : real;
b__     : real;
aux1    : real;
ro_rel  : real;
m_n     : real;

```

```

{-----}

```

```

function log (numero : real) : real;

```

```

begin

```

```

    log:=ln(numero)/ln(10);

```

```

end;

```

```

{-----}

```

```

function interpola (x1,x2,y1,y2,y : real) : real;

```

```

{* Faz a interpolacao linear, encontrando um valor de x baseado em y *}

```

```

var x : real;

```

```

begin
  interpola:=(y-y1)*(x2-x1)/(y2-y1)+x1;
end;

```

```

{-----}

```

```

function elev (x,y : real) : real;

```

```

{* Retorna o valor de x elevado a y *}

```

```

var sinal : real;
    invert : boolean;
    potencia : real;

```

```

begin
  if y=0 then elev:=1;
  if x=0 then elev:=0;
  invert:=false;
  sinal:=1;
  if abs(x) <> x then
    begin
      sinal:=-1;
      x:=abs(x);
    end;
  if abs(y) <> y then
    begin
      invert:=true;
      y:=abs(y);
    end;
  if x <> 0 then
    begin
      potencia:=exp(y*ln(x))*sinal;
      if invert then potencia:=1/potencia;
      elev:=potencia;
    end;
end;

```

```

{-----}

```

```

Function tan (k : real) : real;

```

```

begin
  if (k <> pi/2) then tan:=sin(k)/cos(k)
  else tan:=1E38;
end;

```

```

{-----}

```

```

Function max (a,b : real) : real;

```

```

begin
  if a>b then max:=a else max:=b;
end;

```

```

{-----}

```

Function min (a,b : real) : real;

```
begin
  if a<b then min:=a else min:=b;
end;
```

{_____}

Function ev (k : real) : real;

var e : real;

```
begin
  ev:=tan(k)-k;
end;
```

{_____}

Function arccos (k : real) : real;

```
begin
  arccos:=arctan(sqrt(1-sqr(k))/k);
end;
```

{_____}

Function arcsin (k : real) : real;

```
begin
  arcsin:=arccos(sqrt(1-sqr(k)));
end;
```

{_____}

Procedure Clear_type_ahead;

var h : char;

```
begin
  while keypressed do
    h := readkey;
end;
```

{_____}

Procedure wait;

```
begin
  clear_type_ahead;
  while not keypressed do;
end;
```

{_____}

Procedure Texto_de_Apresentacao;

```

var arq : text;
    letra : char;
    GO : char;

begin
    assign(arq, 'b:apx.txt');
    reset(arq);
    while not eof(arq) do
        begin
            while not eoln(arq) do
                begin
                    read(arq, letra);
                    write(letra);
                end;
            readln(arq);
            writeln;
        end;
    close(arq);
    writeln;
    Clear_type_ahead;
    writeln(' Aperte ENTER');
    read(GO);
    clrscr;
end;

{-----}

```

Procedure Aquisicao_de_Dados;

```

begin
    eodr:=true;
    writeln;
    writeln(' Tipo de engrenagem: ');
    writeln(' ----- ');
    writeln;
    writeln;
    writeln('[1]. Engrenagens cilindricas de dentes retos');
    writeln('[2]. Engrenagens cilindricas de dentes helicoidais');
    writeln;
    writeln;
    write('Opcao:');
    readln(opcao);
    if opcao=2 then eodr:=false;
    clrscr;
    alfao:=20;
    alfao := alfao*pi/180;

    write(' Modulo do engrenamento normalizado mn[mm]= ');
    readln(m_n);
    write(' Relacao de transmissao          i[ ]= ');
    readln(i);
    write(' Numero de dentes do pinhao          Z1[ ]= ');
    readln(z1);
    write(' Largura das engrenagens          b[mm]= ');
    readln(b);
    if eodr then

```

```

begin
  beta:=0;
  write(' Deseja correcao devido a cremalheira? (s/n)');
  readln(corr);
  if corr='s' then
    if (z[1]<(2/sqr(sin(alfao)))) then z[1]:=round(2/sqr(sin(alfao)));
  end
else
  begin
    write(' Angulo de helice          B[graus]= ');
    readln(beta);
  end;

  beta:=beta*pi/180;
  z[2]:=z[1]*i;
  while ((z[2])-int(z[2]))>0.005 do
    begin
      z[1]:=z[1]+1;
      z[2]:=z[1]*i;
    end;
  ao:=m_n*(z[1]+z[2])/(2*cos(beta));
  writeln(' Distancia entre centros nominal  ao[mm]= ',ao:1:5);
  write(' Distancia entre centros de trabalho a[mm]= ');
  readln(a_);
  writeln;
  if (a_-ao)>1e-6 then
    begin
      alfa_n:=arccos(ao/a_*cos(alfao));
      soma_das_correcoes:=(z[1]+z[2])*(ev(alfa_n)-ev(alfao))/(2*tan(alfao));
      writeln(' Correcoes X1+X2 = ',soma_das_correcoes:1:4,'; escolha :');
      write(' X1 = ');
      readln(x1);
      x2:=soma_das_correcoes-x1;
      writeln(' X2 = ',x2:1:4);
      delay(2000);
      m_n:=m_n*cos(alfao)/cos(alfa_n);
    end
  else
    begin
      x1:=0;
      x2:=0;
      alfa_n:=alfao;
      soma_das_correcoes:=0;
    end;
  a1:=ao+m_n*soma_das_correcoes;
  Kfolga:=a1-a_;
  r1:=m_n*z[1]/(2*cos(beta));
  r2:=r1*i;
  d[1]:=r1*2;
  d[2]:=r2*2;
  alfa_t:=arctan(tan(alfa_n)/cos(beta));
  if eodr then
    begin
      rb1:=r1*cos(alfa_n);
      rb2:=r2*cos(alfa_n);
    end
end

```

```

else
begin
    rb1:=r1*cos(alfa_t);
    rb2:=r2*cos(alfa_t);
end;
d_b[1]:=2*rb1;
d_b[2]:=2*rb2;
ra1:=m_n*(z[1]/2+1+x1)-Kfolga;
ra2:=m_n*(z[2]/2+1+x2)-Kfolga;
d_a[1]:=2*ra1;
d_a[2]:=2*ra2;
rf1:=m_n*(z[1]/2-1.25+x1);
rf2:=m_n*(z[2]/2-1.25+x2);
p:=m_n*pi/cos(beta);
so1:=p/2+2*x1*m_n*tan(alfa_n)/cos(beta);
so2:=p/2+2*x2*m_n*tan(alfa_n)/cos(beta);
eo1:=p/2-2*x1*m_n*tan(alfa_n)/cos(beta);
eo2:=p/2-2*x2*m_n*tan(alfa_n)/cos(beta);
ha1:=m_n*(1+x1)-Kfolga;
ha2:=m_n*(1+x2)-Kfolga;
hf1:=m_n*(1.25-x1);
hf2:=m_n*(1.25-x2);
h1:=ha1+hf1;
h2:=ha2+hf2;
grau_de_recobrimento:=(sqrt(sqr(z[2]*sin(alfao))+4*z[2]+4)+
sqrt(sqr(z[1]*sin(alfao))+4*z[1]+4)-
(z[1]+z[2])*sin(alfao))/(2*pi*cos(alfao));

writeln;
clrscr;
write(' Torque      T[N.m]= ');
readln(t_h_1);
clrscr;

writeln;
writeln('Materias para o pinhao e a engrenagem');
writeln('-----');
writeln;
writeln('[1]. Aço com tratamento termico completo');
writeln('[2]. Aço com tratamento termico superficial');
writeln('[3]. Ferro fundido');
writeln('[4]. Bronze');
writeln;
write('Material do pinhao: ');
readln(material[1]);
write('Qualidade (A,B ou C): ');
readln(qual);
case qual of
    'A':qualidade[1]:=1;
    'B':qualidade[1]:=2;
    'C':qualidade[1]:=3;
    'a':qualidade[1]:=1;
    'b':qualidade[1]:=2;
    'c':qualidade[1]:=3;
end;
write('Material da coroa: ');

```

```

readln(material[2]);
write('Qualidade (A,B ou C): ');
readln(qual);
case qual of
  'A':qualidade[2]:=1;
  'B':qualidade[2]:=2;
  'C':qualidade[2]:=3;
  'a':qualidade[2]:=1;
  'b':qualidade[2]:=2;
  'c':qualidade[2]:=3;
end;
write('Grau de precisao de fabricacao (3 a 10): ');
readln(grade);
material_combination:=4;
if (material[1]=1) and (material[2]=1) then material_combination:=1;
if (material[1]=1) and (material[2]=2) then material_combination:=1;
if (material[1]=2) and (material[2]=1) then material_combination:=1;
if (material[1]=2) and (material[2]=2) then material_combination:=1;
if (material[1]=1) and (material[2]=3) then material_combination:=2;
if (material[1]=3) and (material[2]=3) then material_combination:=4;
clrscr;
write('Resistencia maxima a tracão do pinhao [M.N/m²]=');
readln(sigma_b[1]);
write('Resistencia maxima a tracão da coroa [M.N/m²]=');
readln(sigma_b[2]);
writeln;
writeln('Tratamento termico');
writeln('-----');
writeln;
writeln('1. Cementação ou tempera;');
writeln('2. Nitrificação;');
writeln('3. Tempera por indução. ');
writeln;
write('Tratamento do pinhao: ');
readln(hardening[1]);
write('Tratamento da coroa : ');
readln(hardening[2]);
write('Profundidade efetiva de casca do pinhao [mm]=');
readln(c_eff[1]);
write('Profundidade efetiva de casca da coroa [mm]=');
readln(c_eff[2]);
write('Viscosidade cinematica do lubrificante a 40°C [cSt]=');
readln(v_40);
write('Rotação do pinhao [rpm]=');
readln(n[1]);
write('Rugosidade media do pinhao [µm]=');
readln(R_z[1]);
write('Rugosidade media da coroa [µm]=');
readln(R_z[2]);
write('Dureza superficial do pinhao [HV]=');
readln(HV[1]);
write('Dureza superficial da coroa [HV]=');
readln(HV[2]);
write('Vida [h]=');
readln(HV[2]);
clrscr;

```

```

writeln('Carregamento no eixo movido');
writeln('-----');
writeln;
writeln('[1]. Uniforme;');
writeln('[2]. Choque moderado;');
writeln('[3]. Choque medio;');
writeln('[4]. Choque elevado;');
writeln;
write('Carregamento: ');
readln(lodm);
writeln;
writeln('Carregamento no eixo motor');
writeln('-----');
writeln;
writeln('[1]. Uniforme;');
writeln('[2]. Choque leve;');
writeln('[3]. Choque moderado;');
writeln('[4]. Choque elevado;');
writeln;
write('Carregamento: ');
readln(lopnm);
chrscr;
write('Fator de segurança minimo para a tensao de contato=');
readln(s_h_lim);
writeln;
writeln('Correções de problemas de manufatura');
writeln('-----');
writeln;
writeln('[1]. Sem arredondamento - "crowning" - ou alivio das extremidades');
writeln('do dente - "end relief"');
writeln('[2]. Com arredondamento - "crowning" - adequado;');
writeln('[3]. Com alivio das extremidades do dente - "end relief" - adequado;');
writeln;
write('Opção:');
readln(tipo_de_par_engrenado);
writeln;
writeln('Montagem da engrenagem');
writeln('-----');
writeln;
writeln('[1]. Com chaveta;');
writeln('[2]. Com interferencia');
writeln;
write('Montagem: ');
readln(montagem);
writeln;
write('Tipo de arranjo (1 a 7): ');
readln(arranjo);
write('s [mm]= ');
readln(s);
write('l [mm]= ');
readln(l);
chrscr;
write('Diametro do eixo do pinhao [mm]= ');
readln(d_s_h[1]);
write('Tensao residual do pinhao [M.N/m²]= ');
readln(sigma_r[1]);

```

```

write('Tensao residual da coroa      [M.N/m²]= ');
readln(sigma_r[2]);
write('Fator de segurança minimo para os esforços de flexao= ');
readln(s_f_min);
write('Altura do dente da ferramenta de corte      [mm]= ');
readln(h_f_p);
write('Raio do pe da ferramenta de corte      [mm]= ');
readln(ro_f_p[1]);
ro_f_p[2]:=ro_f_p[1];
write('Espessura da protuberancia da ferramenta de corte [mm]= ');
readln(s_p_r);
Clear_type_ahead;
end;

```

```

{-----}
{

```

```

function fsigma_H_Y (material : integer) : real;

```

```

{* Equacao referente aa figura 1 - yield strength for contact stress

```

```

material:

```

```

    [1]. through hardened steels and cast irons

```

```

    [2]. surface hardened steels

```

```

*}

```

```

{begin}

```

```

{  if material=1 then fsigma_H_Y:=0.96362*sigma_B+838.755

```

```

    else fsigma_H_Y:=-9.81*((31*log(6*c_eff)-275.5)*

```

```

        log(ro_rel)+130*log(6*c_eff)+526);

```

```

end;}

```

```

{-----}

```

```

function fsigma_H_D (sigma_B : real) : real;

```

```

{* Equacao referente aa figura 2 *}

```

```

begin

```

```

    if sigma_b<2130 then fsigma_H_D:=sigma_b

```

```

    else fsigma_H_D:=2130;

```

```

end;

```

```

{-----}

```

```

function fZ_G (sigma_B:real;material : integer) : real;

```

```

{* Equacao referente aa figura 3

```

```

material:

```

```

    [1]. outros

```

```

    [2]. surface hardened steels

```

```

*}

```

```

var divisao : real;

```

```

begin

```

```

divisao:=ro_rel/m_n;
if (divisao<=2) or (sigma_b<=600) then fZ_G:=1;
if (sigma_b=800) and (divisao>=9) then fZ_G:=0.80834;
if (sigma_b=800) and (divisao>2) and (divisao<8) then
  fZ_G:=1.1195-0.066*divisao+0.002975*elev(divisao,2)+0.00006*
    elev(divisao,3);
if (sigma_b=800) and (divisao>8) and (divisao<9) then
  fZ_G:=0.9995-0.036*divisao+0.0011*elev(divisao,2)+0.00006*
    elev(divisao,3);
if (sigma_b=1000) and (divisao>2) and (divisao<9) then
  fZ_G:=1.1625-0.0876*divisao+0.00295*elev(divisao,2)+0.000102*
    elev(divisao,3);
if (sigma_b=1000) and (divisao>9) and (divisao<10) then
  fZ_G:=1.0669-0.0696*divisao+0.0024*elev(divisao,2)+0.000072*
    elev(divisao,3);
if (sigma_b=1400) and (divisao>2) and (divisao<10) then
  fZ_G:=1.1917-0.10603*divisao+0.00509*elev(divisao,2)+0.0000092*
    elev(divisao,3);
if (sigma_b=1400) and (divisao>10) and (divisao<12) then
  fZ_G:=0.8901-0.05137*divisao+0.003206*elev(divisao,2)+0.0000658*
    elev(divisao,3);
if (sigma_b=1000) and (divisao>=10) then fZ_G:=0.68292;
if (sigma_b=1400) and (divisao>=12) then fZ_G:=0.6217;
if (sigma_b>=2130) or ((material=2) and (divisao>2)
  and (divisao<12)) then
  fZ_G:=1.22-0.125*divisao+0.0078*elev(divisao,2)-0.00016*
    elev(divisao,3);
if (sigma_b>=2130) or ((material=2) and (divisao>=12)) then fZ_G:=0.5667;
end;

```

```

{-----}

```

```

function fZ_C (c_eff,c_lim : real) : real;

```

```

  { * Equacao referente aa figura 4 * }

```

```

  var divisao : real;

```

```

  begin

```

```

    divisao:=c_eff/c_lim;

```

```

    if divisao<1 then fZ_C:=(5+3*divisao)/8

```

```

    else fZ_C:=1;

```

```

  end;

```

```

{-----}

```

```

function fZ_L_Z_V (v_40,v : real) : real;

```

```

  { * Equacao referente aa figura 5 * }

```

```

  begin

```

```

    fZ_L_Z_V:=(0.8643+0.5429/elev((1.2+134/v_40),2))*(0.8843+0.2587/
      sqrt(1+40/v));

```

```

  end;

```

```

{-----}

```

```

function fZ_R (R_A : real) : real;

  { * Equacao referente aa figura 6 * }

begin
  fZ_R:=elev((1/(2*R_a)),0.12);
end;

{-----}

function fZ_W (R_A,HV : real) : real;

  { * Equacao referente aa figura 7 * }

begin
  if HV>=400 then fZ_W:=1 else
    fZ_W:=1+(0.25-0.16*log((1+3*R_A)))*(1-HV/500);
  end;

  {-----}

function fZ_N (N : real; Curve : integer) : real;

  { * Equacao referente aa figura 8

Curve:
  [1]. through hardened steels, surface hardened steels with
    casedepth>=c_lim and cast irons other than ferro fundido cinzento when
    some pitting is permissible;
  [2]. through hardened steels and cast irons other than grey cast
    iron when pitting is not permissible;
  [3]. surface hardened steels with casedepth>=c_lim when pitting is
    not permissible;
  [4]. surface hardened steels with casedepth<c_lim, bronze and grey
    cast irons;
  [5]. bath nitrided steels.

Casedepth => tabela 2

  * }

begin
  case Curve of
    1:begin
      if (N<=5e4) then fZ_N:=2;
      if (N>5e4) and (N<=2.235e5) then fZ_N:=elev((5e7/N),0.10034);
      if (N>2.235e5) and (N<=1e7) then
        fZ_N:=1.3*elev((1e7/N),0.0738024);
      if (N>1e7) and (N<1e9) then fZ_N:=elev((1e9/N),0.05697);
      if (N=1e9) then fZ_N:=1;
    end;
    2:begin
      if (N<=5e4) then fZ_N:=2;
      if (N>5e4) and (N<5e7) then fZ_N:=elev((5e7/N),0.10034);
      if (N>=5e7) then fZ_N:=1;
    end;
  end;
end;

```

```

end;
3:begin
  if (N<=1e5) then fZ_N:=1.6;
  if (N>1e5) and (N<5e7) then fZ_N:=1.6*elev((1e5/N),0.0756288);
  if (N>=5e7) then fZ_N:=1;
end;
4:begin
  if (N<=1e5) then fZ_N:=1.3;
  if (N>1e5) and (N<2e6) then fZ_N:=elev((2e6/N),0.08758);
  if (N>=2e6) then fZ_N:=1;
end;
5:begin
  if (N<=1e5) then fZ_N:=1.1;
  if (N>1e5) and (N<2e6) then fZ_N:=1.1*elev((1e5/N),0.0318153);
  if (N>=2e6) then fZ_N:=1;
end;
end;
end;

{-----}

function fQ_Y (sigma_H_lim : real) : real;

(* Equacao referente aa figura 13 *)

begin
  fQ_Y:=1-320/sigma_H_lim;
end;

{-----}

function fsigma_F0 (HV : real) : real;

(* Equacao referente aa figura 15 *)

begin
  if HV<=100 then fsigma_F0:=1.3794*HV-23.95;
  if (HV>100) and (HV<=350) then fsigma_F0:=HV+61.89;
  if (HV>350) and (HV<700) then
    fsigma_F0:=-67.2419-4.5975*HV+0.060631*elev(HV,2)-0.269986e-3*
      elev(HV,3)+0.643291e-6*elev(HV,4)-0.0879172e-9*elev(HV,5)+
      0.650993e-12*elev(hv,6)-0.202462e-15*elev(HV,7);
  if HV>=700 then fsigma_F0:=560;
end;

{-----}

function fY_R (R_a : real; Curve : integer) : real;

(* Equacao referente aa figura 16

Curve:

[1]. through hardened steels, bronze and cast iron other than grey
cast iron;
[2]. surface hardened steels with casedepth>=c_lim;

```

```

    [3]. surface hardened steels with casdepth<c_lim
*)

begin
  case Curve of
    1:fY_R:=1.49-0.471*elev((6*R_a+1),0.1);
    2:fY_R:=4.924-3.9*elev((6*R_a+1),0.01);
    3:fY_R:=4.161-3.155*elev((6*R_a+1),0.005);
  end;
end;

{-----}

function fY_X (m_n : real; Curve : integer) : real;

{* Equacao referente aa figura 17

Curve:

    [1]. through hardened steels and cast iron other than grey
        cast iron;
    [2]. surface hardened steels;
    [3]. ferro fundido cinzento and bronze.
*}

begin
  if m_n<=5 then fY_X:=1;
  case Curve of
    1:begin
      if (m_n>5) and (m_n<30) then fY_X:=1.03-0.006*m_n;
      if m_n>=30 then fY_X:=0.85;
    end;
    2:begin
      if (m_n>5) and (m_n<30) then fY_X:=1.05-0.01*m_n;
      if m_n>=30 then fY_X:=0.75;
    end;
    3:begin
      if (m_n>5) and (m_n<25) then fY_X:=1.075-0.015*m_n;
      if m_n>=25 then fY_X:=0.70;
    end;
  end;
end;

{-----}

function fY_N (Y_R,Y_X,N : real; material : integer) : real;

{* Equacao referente aas figuras 18,19 e 20

Material:

    [1]. through hardened steel;
    [2]. thick case hardened steel and cast iron
    [3]. thin case surface hardened steel, ferro fundido cinzento and bronze.
*}

```

```

var expoente : real;

begin
  case material of
    1:begin
      expoente:=log(2.5/(Y_R*Y_X))/log(3000);
    end;
    2:begin
      expoente:=log(2.5/(Y_R*Y_X))/log(3000);
    end;
    3:begin
      expoente:=log(1.6/(Y_R*Y_X))/log(3000);
    end;
  end;
  fY_N:=elev((3e6/N),expoente);
end;

{-----}

function fC_lim (m_n : real; Hardening_Process : integer) : real;

{* Equacao referente aa tabela 2

Hardening_Process:

    [1]. Carburizing and hardening;
    [2]. Nitriding;
    [3]. Induction hardening.

*}

begin
  case Hardening_Process of
    1,2:fC_lim:=0.16*m_n;
    3:fC_lim:=0.32*m_n;
  end;
end;

{-----}

function fA (tipo_de_par_engrenado : integer) : real;

{* Equacao referente aa tabela 8

Tipo_de_par_engrenado:

    [1]. Gear pairs without crowning or end relief;
    [2]. Gears with suitably chosen crowning;
    [3]. Gear pairs with suitably chosen end relief;

*}

begin
  case Tipo_de_par_engrenado of
    1:fA:=0.023;

```

```

        2:fA:=0.012;
        3:fA:=0.016;
    end;
end;

{-----}

function fk (arranjo,montagem : integer) : real;

(* Equacao referente aa tabela 12 *)

var k_ : array [1..7,1..2] of real;

begin
    k_[1,1]:=+0.00;
    k_[2,1]:=+0.00;
    k_[3,1]:=+0.48;
    k_[4,1]:=-0.48;
    k_[5,1]:=+1.33;
    k_[6,1]:=-0.36;
    k_[7,1]:=-0.60;
    k_[1,2]:=+0.00;
    k_[2,2]:=+0.00;
    k_[3,2]:=+0.80;
    k_[4,2]:=-0.80;
    k_[5,2]:=+1.33;
    k_[6,2]:=-0.60;
    k_[7,2]:=-1.00;
    fK:=k_[arranjo,montagem];
end;

{-----}

function fro_linha (material : integer) : real;

(* Equacao referente aa tabela 11

Material and sigma:

    [1]. ferro fundido cinzento;
    [2]. nitrided steel;
    [3]. soft steel and bronze;
        [1]. sigma_f_y=300 MN/m2;
        [2]. sigma_f_y=400 MN/m2;
    [4]. through hardened steel, cast steel and SG cast iron:
        [1]. sigma_0.2= 500 MN/m2;
        [2]. sigma_0.2= 600 MN/m2;
        [3]. sigma_0.2= 800 MN/m2;
        [4]. sigma_0.2=1000 MN/m2;
    [5]. Carburized, induction and flame hardened steels;

*)

begin
    case material of
        1:fro_linha:=-0.310;

```

```

2:fro_linha:=0.100;
3:begin
    fro_linha:=0.083;
{
    if (sigma>=300) and (sigma<=400) then
        fro_linha:=interpola(300,400,0.083,0.045,sigma);
    if sigma<300 then fro_linha:=0.083;
    if sigma>400 then fro_linha:=0.045;
}
end;
4:begin
    fro_linha:=0.028;
{
    if (sigma>=500) and (sigma<=600) then
        fro_linha:=interpola(500,600,0.028,0.019,sigma);
    if (sigma>600) and (sigma<=800) then
        fro_linha:=interpola(600,800,0.019,0.006,sigma);
    if (sigma>800) and (sigma<=1000) then
        fro_linha:=interpola(800,1000,0.006,0.001,sigma);
    if sigma>1000 then fro_linha:=0.001;
    if sigma<500 then fro_linha:=0.028;
}
end;
5:fro_linha:=0.003;
end;
end;
{-----}

```

function fX (valor : real; Grade : integer) : real;

{* Equacao referente aa tabela 7 *}

```

begin
    if valor<=350 then
        begin
            case grade of
                3 :fX:=0.4736;
                4 :fX:=0.6110;
                5 :fX:=0.7153;
                6 :fX:=0.8017;
                7 :fX:=0.8635;
                8 :fX:=0.9005;
                9 :fX:=0.9334;
                10:fX:=0.9530;
            end;
        end
    else
        begin
            case grade of
                3 :fX:=0.2931;
                4 :fX:=0.4211;
                5 :fX:=0.5402;
                6 :fX:=0.6361;
                7 :fX:=0.7303;
                8 :fX:=0.7954;
            end;
        end
    end;
end;

```

```

        9:fX:=0.8687;
        10:fX:=0.8954;
    end;
end;

{-----}

function ff_M_A (Grade : integer; b : real) : real;

(* Equacao referente aa tabela 5 da parte 2 *)

begin
    case grade of
        3:ff_M_A:=0.50*sqrt(b)+02.50;
        4:ff_M_A:=0.63*sqrt(b)+03.15;
        5:ff_M_A:=0.80*sqrt(b)+04.00;
        6:ff_M_A:=1.00*sqrt(b)+05.00;
        7:ff_M_A:=1.25*sqrt(b)+06.30;
        8:ff_M_A:=2.00*sqrt(b)+10.00;
        9:ff_M_A:=3.15*sqrt(b)+16.00;
        10:ff_M_A:=5.00*sqrt(b)+25.00;
    end;
end;

{-----}

function ff_P_E (Grade : integer;d : real) : real;

(* Equacao referente aa tabela 3 da parte 2 *)

var l : real;

begin
    l:=pi*d/2;
    case grade of
        3:ff_P_E:=00.63*sqrt(l)+01.60;
        4:ff_P_E:=01.00*sqrt(l)+02.50;
        5:ff_P_E:=01.60*sqrt(l)+04.00;
        6:ff_P_E:=02.50*sqrt(l)+06.30;
        7:ff_P_E:=03.55*sqrt(l)+09.00;
        8:ff_P_E:=05.00*sqrt(l)+12.50;
        9:ff_P_E:=07.10*sqrt(l)+18.00;
        10:ff_P_E:=10.00*sqrt(l)+25.00;
    end;
end;

{-----}

function fK_V_350_beta (Q_V,V,Z1 : real; Grade : integer) : real;

(* Equacao referente aa figura 10 *)

var valor : real;

begin

```

```

valor:=Q_V*V*Z1;
case Grade of
  10:if (valor>=0) and (valor<=247.06) then
      fK_V_350_beta:=interpola(1,1.42,0,247.06,valor);
  9:if (valor>=0) and (valor<=486.11) then
      fK_V_350_beta:=interpola(1,1.50,0,486.11,valor);
  8:if (valor>=0) and (valor<=729.17) then
      fK_V_350_beta:=interpola(1,1.50,0,729.17,valor);
  7:if (valor>=0) and (valor<=1076.92) then
      fK_V_350_beta:=interpola(1,1.50,0,1076.92,valor);
  6:begin
      if (valor>=0) and (valor<1400) then
          fK_V_350_beta:=interpola(1,1.45,0,1400,valor);
      if (valor>=1400) and (valor<1440) then
          fK_V_350_beta:=interpola(1.45,1.80,1400,1440,valor);
      if (valor>=1440) and (valor<2000) then
          fK_V_350_beta:=1.80;
      if (valor>=2000) and (valor<2540) then
          fK_V_350_beta:=interpola(1.80,1.45,2000,2540,valor);
      if (valor>=2540) and (valor<=2800) then
          fK_V_350_beta:=1.45;
      end;
  5:begin
      if (valor>=0) and (valor<1400) then
          fK_V_350_beta:=interpola(1,1.31,0,1400,valor);
      if (valor>=1400) and (valor<1440) then
          fK_V_350_beta:=interpola(1.31,1.65,1400,1440,valor);
      if (valor>=1440) and (valor<2000) then
          fK_V_350_beta:=1.65;
      if (valor>=2000) and (valor<2540) then
          fK_V_350_beta:=interpola(1.65,1.31,2000,2540,valor);
      if (valor>=2540) and (valor<=2800) then
          fK_V_350_beta:=1.31;
      end;
  4:begin
      if (valor>=0) and (valor<1400) then
          fK_V_350_beta:=interpola(1,1.23,0,1400,valor);
      if (valor>=1400) and (valor<1440) then
          fK_V_350_beta:=interpola(1.23,1.54,1400,1440,valor);
      if (valor>=1440) and (valor<2000) then
          fK_V_350_beta:=1.54;
      if (valor>=2000) and (valor<2540) then
          fK_V_350_beta:=interpola(1.54,1.23,2000,2540,valor);
      if (valor>=2540) and (valor<=2800) then
          fK_V_350_beta:=1.23;
      end;
  3:begin
      if (valor>=0) and (valor<1400) then
          fK_V_350_beta:=interpola(1,1.18,0,1400,valor);
      if (valor>=1400) and (valor<1440) then
          fK_V_350_beta:=interpola(1.18,1.47,1400,1440,valor);
      if (valor>=1440) and (valor<2000) then
          fK_V_350_beta:=1.47;
      if (valor>=2000) and (valor<2540) then
          fK_V_350_beta:=interpola(1.47,1.18,2000,2540,valor);
      if (valor>=2540) and (valor<=2800) then

```

```

        fK_V_350_beta:=1.18;
    end;
end;
end;

{-----}

function fK_V_350_alfa (Q_V,V,Z1 : real; Grade : integer) : real;

(* Equacao referente aa figura 10 *)

var valor : real;

begin
    valor:=Q_V*V*Z1;
    case Grade of
        10:if (valor>=0) and (valor<=328.06) then
            fK_V_350_alfa:=interpola(1,1.82,0,328,valor);
        9:if (valor>=0) and (valor<=539.33) then
            fK_V_350_alfa:=interpola(1,1.96,0,539.33,valor);
        8:if (valor>=0) and (valor<=744.19) then
            fK_V_350_alfa:=interpola(1,1.96,0,744.19,valor);
        7:begin
            if (valor>=0) and (valor<1000) then
                fK_V_350_alfa:=interpola(1,1.92,0,1000,valor);
            if (valor>=1000) and (valor<1040) then
                fK_V_350_alfa:=interpola(1.92,2.60,1000,1040,valor);
            if (valor>=1040) and (valor<1400) then
                fK_V_350_alfa:=2.60;
            if (valor>=1400) and (valor<1800) then
                fK_V_350_alfa:=interpola(2.60,1.98,1400,1800,valor);
            if (valor>=1800) and (valor<=2800) then
                fK_V_350_alfa:=1.98;
            end;
        6:begin
            if (valor>=0) and (valor<1000) then
                fK_V_350_alfa:=interpola(1,1.61,0,1000,valor);
            if (valor>=1000) and (valor<1040) then
                fK_V_350_alfa:=interpola(1.61,2.26,1000,1040,valor);
            if (valor>=1040) and (valor<1400) then
                fK_V_350_alfa:=2.26;
            if (valor>=1400) and (valor<1800) then
                fK_V_350_alfa:=interpola(2.26,1.65,1400,1800,valor);
            if (valor>=1800) and (valor<=2800) then
                fK_V_350_alfa:=1.65;
            end;
        5:begin
            if (valor>=0) and (valor<1000) then
                fK_V_350_alfa:=interpola(1,1.42,0,1000,valor);
            if (valor>=1000) and (valor<1040) then
                fK_V_350_alfa:=interpola(1.42,2.06,1000,1040,valor);
            if (valor>=1040) and (valor<1400) then
                fK_V_350_alfa:=2.06;
            if (valor>=1400) and (valor<1800) then
                fK_V_350_alfa:=interpola(2.06,1.42,1400,1800,valor);
            if (valor>=1800) and (valor<=2800) then

```

```

        fK_V_350_alfa:=1.42;
    end;
4:begin
    if (valor>=0) and (valor<1000) then
        fK_V_350_alfa:=interpola(1,1.30,0,1000,valor);
    if (valor>=1000) and (valor<1040) then
        fK_V_350_alfa:=interpola(1.30,1.89,1000,1040,valor);
    if (valor>=1040) and (valor<1400) then
        fK_V_350_alfa:=1.89;
    if (valor>=1400) and (valor<1800) then
        fK_V_350_alfa:=interpola(1.89,1.23,1400,1800,valor);
    if (valor>=1800) and (valor<=2800) then
        fK_V_350_alfa:=1.30;
    end;
3:begin
    if (valor>=0) and (valor<1000) then
        fK_V_350_alfa:=interpola(1,1.21,0,1000,valor);
    if (valor>=1000) and (valor<1040) then
        fK_V_350_alfa:=interpola(1.21,1.77,1000,1040,valor);
    if (valor>=1040) and (valor<1400) then
        fK_V_350_alfa:=1.77;
    if (valor>=1400) and (valor<1800) then
        fK_V_350_alfa:=interpola(1.77,1.21,1400,1800,valor);
    if (valor>=1800) and (valor<=2800) then
        fK_V_350_alfa:=1.21;
    end;
end;
end;
{-----}

function fcurve(material : integer; c_eff,c_lim : real) : integer;

begin
    if (material=1) or (material=5) or (material=6) or (material=3) then fcurve:=-2;
    if (material=7) then fcurve:=5;
    if (material=2) and (c_eff>=c_lim) then fcurve:=3;
    if (material=4) or (material=8) or (material=2) and (c_eff<c_lim) then fcurve:=4;
end;

{-----}

function fy_alfa(sigma_h_lim,f_p_c : real; material : integer) : real;

{
    Material :
        [1]. through hardened steels and cast steels;
        [2]. cast iron and bronze;
        [3]. surface hardened steels.
}

begin
    case material of
        1:fy_alfa:=160*f_p_c/sigma_h_lim;
        2:fy_alfa:=0.275*f_p_c;
        3:fy_alfa:=0.075*f_p_c;
    end;
end;

```

```

end;

{-----}

procedure contact_stress;

begin
  d_w[1]:=2*a/(i+1);
  d_w[2]:=d_w[1]*i;
  F_H_T:=2000*T_H_1/d[1];
  alfa_T_W:=arccos(d[1]*cos(alfa_t)/d_W[1]);
  g_alfa:=0.5*(sqrt((elev(d_a[1],2)-elev(d_b[1],2)))+sqrt((elev(d_a[2],2)-elev(d_b[2],2))))-
a_*sin(alfa_T_W);
  p_B_T:=m_n*pi*cos(alfa_t)/cos(beta);
  beta_b:=arcsin(cos(alfa_n)*sin(beta));
  z_H:=-2*sqrt(cos(beta_b)/sin(2*alfa_t));
  eps_alfa:=g_alfa/p_b_t;
  eps_beta:=b*sin(beta)/(m_n*pi);
  if eodr then z_eps:=sqrt((4-eps_alfa)/3)
  else
    if eps_beta<1 then z_eps:=sqrt((4-eps_alfa)*(1-eps_beta)/3+eps_beta/eps_alfa)
    else z_eps:=sqrt(1/eps_alfa);
  case material_combination of
    1:z_e:=189;
    2:z_e:=181;
    3:z_e:=174;
    4:z_e:=146;
  end;
  for counter:=1 to 2 do
    begin
      sigma_H_d[counter]:=fsigma_H_D(sigma_b[counter]);
      c_lim[counter]:=fc_lim(m_n,hardenig[counter]);
      if material[counter]=1 then z_c[counter]:=1
      else Z_C[counter]:=fz_c(c_eff[counter],c_lim[counter]);
      z_g[2]:=fz_g(sigma_b[2],material[2]);
      z_g[1]:=max((1.02-0.02/i)*z_g[2],0.9*z_g[2]);
      sigma_h_lim[counter]:=sigma_h_d[counter]*z_g[counter]*z_c[counter];
      case material[counter] of
        1:aux:=2;
        2:aux:=1;
        3:aux:=3;
        4:aux:=3;
        5:aux:=4;
        6:aux:=5;
      end;
      z_m[counter]:=Z_M_[aux,qualidade[counter]];
      v:=d[1]*n[1]/19098;
      z_l_z_v:=fz_l_z_v(v_40,v);
      R_a[counter]:=R_z[counter]/6;
      z_r[counter]:=fz_r(r_a[counter]);
      z_w[counter]:=fz_w(r_a[counter],hv[counter]);
      z_x[counter]:=1;
      ciclos[1]:=life*60*n[1];
      ciclos[2]:=ciclos[1]/i;
      curve[counter]:=fcurve(material[counter],c_eff[counter],c_lim[counter]);
      z_n[counter]:=fz_n(ciclos[counter],curve[counter]);
    end
  end
end;

```

```

sigma_h_p[counter]:=sigma_h_lim[counter]*z_l_z_v*z_r[counter]*
z_m[counter]*z_w[counter]*z_x[counter]*z_n[counter]/s_h_lim;
end;
k_a:=k_a_[lop_m,lod_m];
q_v:=1;
if eodr then k_v_350:=fk_v_350_alfa(q_v,v,z[1],grade)
else
  if grau_de_recobrimento>=1 then k_v_350:=fk_v_350_beta(q_v,v,z[1],grade)
  else k_v_350:=fk_v_350_beta(q_v,v,z[1],grade)-eps_beta*
    (fk_v_350_beta(q_v,v,z[1],grade)-fk_v_350_alfa(q_v,v,z[1],grade));
f_t:=F_h_t;
estimado:=f_t*k_a/b;
x_:=fx(estimado,grade);
b_:=elev(350/estimado,x_);
k_v:=1+(k_v_350-1)*b_;
l_c:=0.1*b_;
b_eff:=b-1_c/2;
w_m:=max(100,f_t*K_A*K_V/b_eff);
s:=min(0.3*1,s);
a:=fa(tipo_de_par_engrenado);
k:=fk(arranjo,montagem);
f_s_h:=w_m*(abs(1+k*1*s*elev(d[1]/d_s_h[1],4)/elev(d[1],2))-0.3)*elev(b/d[1],2);
f_m_a:=ff_m_a(grade,b);
f_beta_x:=max(0.005*w_m,(1.33*f_s_h+f_m_a));
q_y:=(fq_y(sigma_h_lim[1])+fq_y(sigma_h_lim[2]))/2;
f_beta_y:=q_y*f_beta_x;
divi:=c_gama[material_combination]*f_beta_y/w_m;
if divi>2 then k_h_beta:=sqrt(2*divi)
else k_h_beta:=1+divi/2;
eps_gama:=eps_alfa+eps_beta;
for counter:=1 to 2 do
  begin
    f_p_e:=ff_p_e(grade,d[counter]);
    case material[counter] of
      1:aux:=1;
      2:aux:=3;
      3:aux:=2;
      4:aux:=2;
      5:aux:=2;
      6:aux:=2;
      7:aux:=1;
      8:aux:=2;
    end;
    y_alfa[counter]:=fy_alfa(sigma_h_lim[counter],f_p_e,aux);
  end;
y_alfa:=(y_alfa[1]+y_alfa[2])/2;
if eps_gama<2 then k_h_alfa:=(eps_gama/2)*(0.9+0.4*divi*(f_p_e-y_alfa)/(f_beta_y*k_h_beta))
else k_h_alfa:=0.9+0.4*sqrt(2*(eps_gama-1)/eps_gama)*divi*(f_p_e-y_alfa)/(f_beta_y*k_h_beta);
for counter:=1 to 2 do
  begin
    sigma_h[counter]:=z_h*z_e*z_eps*sqrt(f_h_t*(i+1)*K_A*K_V*K_H_alfa*K_H_beta/(b*d[1]*i));
    p_h_p[counter]:=b*d[1]*d[1]*pi*n[1]*i*sigma_h_p[counter]*
      sigma_h_p[counter]/(60e6*(i+1)*z_h*z_h*z_eps*
        z_eps*z_e*z_e*k_a*k_v*k_h_alfa*k_h_beta);
    t_h_p[counter]:=60e3*p_h_p[counter]/(2*pi*n[1]);
  end;
end;

```

```

end;

{-----}

procedure bending_stress;

begin
  eps_alfa_n:=eps_alfa/elev(cos(beta_b),2);
  for counter:=1 to 2 do
    begin
      z_v[counter]:=z[counter]/elev(cos(beta),3);
      d_n[counter]:=m_n*z_v[counter];
      d_b_n[counter]:=d_n[counter]*cos(alfa_n);
      d_a_n[counter]:=d_n[counter]+(d_a[counter]-d[counter]);
      d_f_n[counter]:=d_n[counter]+(d_f[counter]-d[counter]);
      g[counter]:=(ro_f_p[counter]/m_n)-(h_f_p/m_n)+x[counter];
      d[counter]:=pi*m_n/4-h_f_p*tan(alfa_n)+s_p_r/cos(alfa_n)-(1-
sin(alfa_n))*ro_f_p[counter]/cos(alfa_n);
      h[counter]:=(2/z_v[counter])*(pi/2-d[counter]/m_n)-pi/3;
      erro:=1;
      teta[counter]:=pi/6;
      teta_ant:=100;
      while (erro>=1e-6) do
        begin
          erro:=sqrt(abs(elev(teta_ant,2)-elev(teta[counter],2)));
          teta_ant:=teta[counter];
          teta[counter]:=2*g[counter]*tan(teta[counter])/z_v[counter]-h[counter];
        end;
      s_f_n_m_n[counter]:=z_v[counter]*sin(pi/3-teta[counter])+
sqrt(3)*(g[counter]/cos(teta[counter])-ro_f_p[counter]/m_n);
      ro_f_m_n[counter]:=ro_f_p[counter]/m_n+2*g[counter]/
(cos(teta[counter])*(z_v[counter]*
elev(cos(teta[counter],2))-2*g[counter]));
      d_e_n[counter]:=-2*sqrt(elev((sqrt(elev(d_a_n[counter]/2,2)-
elev(d_b_n[counter]/2,2))-pi*d[counter]*
cos(beta)*cos(alfa_n)*(eps_alfa_n-1)/
z[counter]),2)+elev(d_b_n[counter]/2,2));
      alfa_e_n[counter]:=arccos(d_b_n[counter]/d_e_n[counter]);
      gama_e[counter]:=(pi/2+2*tan(alfa_n))/z_v[counter]+ev(alfa_n)-ev(alfa_e_n[counter]);
      gama_f_e_n[counter]:=alfa_e_n[counter]-gama_e[counter];
      alfa_f_e_n[counter]:=alfa_e_n[counter]-gama_e[counter];
      h_f_m_n[counter]:=-0.5*((cos(gama_e[counter])-
sin(gama_e[counter])*tan(alfa_f_e_n[counter]))*
d_e_n[counter]/m_n-z_v[counter]*cos(pi/3-
teta[counter])-g[counter]/cos(teta[counter])-
ro_f_p[counter]/m_n);
      y_f[counter]:=-6*h_f_m_n[counter]*cos(alfa_f_e_n[counter])/(elev(s_f_n_m_n[counter],2)*cos(alfa_n));
      l[counter]:=s_f_n_m_n[counter]/h_f_m_n[counter];
      q_s[counter]:=s_f_n_m_n[counter]/(2*ro_f_m_n[counter]);
      y_s:=(1.2+0.13*l[counter])*elev(q_s[counter],(1/(1.21+2.3/l[counter]))));
      y_beta:=1-min(eps_beta,1)*min(beta,pi/6)/120;
      sigma_f_0[counter]:=fsigma_fb(sigma_b[counter]);
      case material[counter] of
        1:aux:=2;
        2:aux:=1;
      end;
    end;
  end;

```

```

3:aux:=3;
4:aux:=3;
5:aux:=4;
6:aux:=5;
end;
y_m[counter]:=y_m_aux[qualidade[counter]];
case material[counter] of
1:aux:=4;
2:aux:=5;
3:aux:=4;
4:aux:=3;
5:aux:=4;
6:aux:=4;
7:aux:=2;
8:aux:=1;
end;
ro_linha[counter]:=fro_linha(aux);

y_delta[counter]:=(1+sqrt(0.2*ro_linha[counter]*(1+2*q_s[counter])))/(1+sqrt(0.2*ro_linha[counter]));
y_r[counter]:=fy_R(R_a[counter],material[counter]);
case material[counter] of
1:aux:=1;
2:aux:=2;
3:aux:=1;
4:aux:=3;
5:aux:=1;
6:aux:=1;
7:aux:=8;
8:aux:=3;
end;
y_x[counter]:=fy_x(m_n,aux);
y_n[counter]:=fy_n(y_r[counter],y_x[counter],ciclos[counter],material[counter]);
end;
k_f_alfa:=k_h_alfa;
h_b:=max(h[1]/b,h[2]/b);
k_f_beta:=elev(k_h_beta,(1/(1+h_b+elev(h_b,2))));
for counter:=1 to 2 do
begin
sigma_f_p[counter]:=2*sigma_f_0[counter]*(sigma_b[counter]-
sigma_r[counter])*Y_N[counter]*Y_R[counter]*
Y_X[counter]*Y_M[counter]*Y_delta[counter]/
((sigma_b[counter]+sigma_f_0[counter]*
Y_N[counter]*Y_R[counter]*Y_X[counter])*
s_f_min);
p_f_p[counter]:=b*d[1]*n[1]*m_n*pi*sigma_f_p[counter]/(60e6*y_f[counter]*
y_s*Y_beta*k_a*k_v*k_f_alfa*k_f_beta);
t_f_p[counter]:=60e3*p_f_p[counter]/(2*pi*n[1]);
end;
end;

```

{-----}

```

Procedure Calculos;

begin
end;

{-----}

Procedure Impressao_dos_Resultados;

var GO : char;

begin
  clrscr;
  writeln(' Resultados finais:');
  writeln;
  writeln(' i      =',i:1:5);
  writeln(' a      =',a_:1:5,'      ao =',ao:1:5,'      al =',al:1:5);
  writeln(' alfa =',alfa_n*180/pi:1:5,'      alfao =',alfao*180/pi:1:5);
  writeln(' m      =',m_n/cos(beta):1:5,'      mo =',m_n:1:5);
  writeln(' p      =',p:1:5);
  writeln;
  writeln(' Pinhao          Coroa');
  writeln;
  writeln(' z1 =',z[1]:1:5,'      z2 =',z[2]:1:5);
  writeln(' r1 =',r1:1:5,'      r2 =',r2:1:5);
  writeln(' rb1 =',rb1:1:5,'      rb2 =',rb2:1:5);
  writeln(' ra1 =',ra1:1:5,'      ra2 =',ra2:1:5);
  writeln(' rf1 =',rf1:1:5,'      rf2 =',rf2:1:5);
  writeln(' ha1 =',ha1:1:5,'      ha2 =',ha2:1:5);
  writeln(' hf1 =',hf1:1:5,'      hf2 =',hf2:1:5);
  writeln(' h1 =',h1:1:5,'      h2 =',h2:1:5);
  writeln(' so1 =',so1:1:5,'      so2 =',so2:1:5);
  writeln(' eo1 =',eo1:1:5,'      eo2 =',eo2:1:5);
  writeln(' x1 =',x1:1:5,'      x2 =',x2:1:5);
  writeln(' _HP1 =',sigma_h_p[1]:8:4,'      _HP2 =',sigma_h_p[2]:8:4);
  writeln(' _PHP1 =',p_h_p[1]:8:4,'      _PHP2 =',p_h_p[2]:8:4);
  writeln(' _FP1 =',sigma_F_p[1]:8:4,'      _FP2 =',sigma_F_p[2]:8:4);
  writeln(' _PFP1 =',p_F_P[1]:8:4,'      _PFP2 =',p_F_P[2]:8:4);
  writeln;
  writeln(' grau de recobrimento =',grau_de_recobrimento:1:5);
  writeln(' coef de rebaixamento =',Kfolga/m_n:1:5);
  Clear_type_ahead;
  write(' Aperte Enter ');
  wait;
end;

{-----}

Procedure PRINT_Resultados;

var GO : char;

```

```

begin
  clrscr;
  writeln(LST,' Resultados finais:');
  writeln;
  writeln(LST,' i = ',i:1:5);
  writeln(LST,' a = ',a:1:5,'      ao = ',ao:1:5,'      a1 = ',a1:1:5);
  writeln(LST,' alfa = ',alfa_n*180/pi:1:5,'      alfao = ',alfao*180/pi:1:5);
  writeln(LST,' m = ',m_n/cos(beta):1:5,'      mo = ',m_n:1:5);
  writeln(LST,' p = ',p:1:5);
  writeln;
  writeln(LST,' Pinhao          Coroa');
  writeln;
  writeln(LST,' z1 = ',z[1]:1:5,'      z2 = ',z[2]:1:5);
  writeln(LST,' r1 = ',r1:1:5,'      r2 = ',r2:1:5);
  writeln(LST,' rb1 = ',rb1:1:5,'      rb2 = ',rb2:1:5);
  writeln(LST,' ra1 = ',ra1:1:5,'      ra2 = ',ra2:1:5);
  writeln(LST,' rf1 = ',rf1:1:5,'      rf2 = ',rf2:1:5);
  writeln(LST,' ha1 = ',ha1:1:5,'      ha2 = ',ha2:1:5);
  writeln(LST,' hf1 = ',hf1:1:5,'      hf2 = ',hf2:1:5);
  writeln(LST,' h1 = ',h1:1:5,'      h2 = ',h2:1:5);
  writeln(LST,' so1 = ',so1:1:5,'      so2 = ',so2:1:5);
  writeln(LST,' eo1 = ',eo1:1:5,'      eo2 = ',eo2:1:5);
  writeln(LST,' x1 = ',x1:1:5,'      x2 = ',x2:1:5);
  writeln(LST,' _HP1 = ',sigma_h_p[1]:8:4,'      _HP2 = ',sigma_h_p[2]:8:4);
  writeln(LST,' PHP1 = ',p_h_p[1]:8:4,'      PHP2 = ',p_h_p[2]:8:4);
  writeln(LST,' _FP1 = ',sigma_F_p[1]:8:4,'      _FP2 = ',sigma_F_p[2]:8:4);
  writeln(LST,' PFP1 = ',p_F_P[1]:8:4,'      PFP2 = ',p_F_P[2]:8:4);
  writeln;
  writeln(LST,' grau de recobrimento = ',grau_de_recobrimento:1:5);
  writeln(LST,' coef de rebaixamento = ',Kfolga/m_n:1:5);
  Clear_type_ahead;
  write(' Aperte Enter ');
  wait;
end;

```

{-----}

Procedure Desenho;

```

var grDriver,grMode,ErrCode:integer;
GO:char;

```

```

begin
  clrscr;
  grDriver:=detect;
  InitGraph(grDriver,grMode,"");
  cor_:=15;
  cor_2:=9;
  setcolor(cor_2);
  ErrCode:=GraphResult;
  if ErrCode<>grOk then
    begin
      closegraph;
      writeln;
    end
  end;

```

```

writeln(' Erro grafico: ',GraphErrorMsg(ErrCode));
writeln;
Clear_type_ahed;
writeln(' Aperte Enter ');readln(GO);
halt;
end
else
begin
  esc:=0.5;
  posx1:=getmaxx div 2 - round(2.4*(a_+r2-r1)/2*esc);
  posx2:=posx1+round(2.4*a_*esc);
  posy:=getmaxy div 2;
  circle(posx1,posy,round(rb1*esc*2.4));
  circle(posx1,posy,round(r1*esc*2.4));
  circle(posx1,posy,round(ra1*esc*2.4));
  circle(posx1,posy,round(rfl*esc*2.4));

  circle(posx2+20,posy,round(rb2*esc*2.4));
  circle(posx2+20,posy,round(r2*esc*2.4));
  circle(posx2+20,posy,round(ra2*esc*2.4));
  circle(posx2+20,posy,round(rf2*esc*2.4));

  (* dentes *)

  b__ := 2*pi/z[1];
  aux1 := round(arccos(rb1/ra1)*180/pi);

  for k__ := 0 to round(z[1]) do
  begin
    i_ := 0;
    while i_ < aux1 do
    begin
      i_ := i_*pi/180;
      px1 := posx1+round((rb1/cos(i_))*sin(ev(i_)+k__*b__+pi)*esc*2.4);
      py1 := posy+round((rb1/cos(i_))*cos(ev(i_)+k__*b__+pi)*esc*2.4);
      putpixel(px1,py1,cor_);
      px1 := posx1+round((rb1/cos(i_))*sin(-ev(i_)+(k__+0.5)*b__+pi)*
        esc*2.4);
      py1 := posy+round((rb1/cos(i_))*cos(-ev(i_)+(k__+0.5)*b__+pi)*esc*2.4);
      putpixel(px1,py1,cor_);
      i_ := i_*180/pi;
      i_ := i_ + 1;
    end;
  end;

  b__ := 2*pi/z[2];
  aux1 := round(arccos(rb2/ra2)*180/pi);

  for k__ := 0 to round(z[2]) do
  begin
    i_ := 0;
    while i_ < aux1 do
    begin
      i_ := i_*pi/180;
      px2 := posx2+round((rb2/cos(i_))*sin(ev(i_)+(k__+0.5)*b__+pi)*
        esc*2.4);

```

```

py2 := posy+round((rb2/cos(i_))*cos(ev(i_)+(k_+0.5)*b_+pi)*
esc*2.4);
putpixel(px2+20,py2,cor_);
px2 := posx2+round((rb2/cos(i_))*sin(-ev(i_)+(k_+1)*b_+pi)*
esc*2.4);
py2 := posy+round((rb2/cos(i_))*cos(-ev(i_)+(k_+1)*b_+pi)*esc*2.4);
putpixel(px2+20,py2,cor_);
i_ := i_*180/pi;
i_ := i_ + 1;
end;
end;
end;
end;

```

```

{-----}
{-----}

```

begin

CLRSCR;

```

{-----}
{* Tabela 1 *}

```

```

Z_E_tabelado[1]:=189;
Z_E_tabelado[2]:=181;
Z_E_tabelado[3]:=174;
Z_E_tabelado[4]:=146;

```

```

{-----}
{* Tabela 3 *}

```

```

Z_M_[1,1]:=1.0;
Z_M_[2,1]:=-1.0;
Z_M_[3,1]:=0.9;
Z_M_[4,1]:=0.9;
Z_M_[5,1]:=-0.7;
Z_M_[1,2]:=-0.9;
Z_M_[2,2]:=-0.9;
Z_M_[3,2]:=-0.8;
Z_M_[4,2]:=-0.8;
Z_M_[5,2]:=-0.5;
Z_M_[1,3]:=-0.8;
Z_M_[2,3]:=-0.8;
Z_M_[3,3]:=-0.7;
Z_M_[4,3]:=-0.7;
Z_M_[5,3]:=-0.5;

```

```

{-----}
{* TABELA 4 *}

```

```

K_A_[1,1]:=1.00;
K_A_[2,1]:=1.10;
K_A_[3,1]:=1.25;
K_A_[4,1]:=1.50;
K_A_[1,2]:=1.25;

```

```

K_A [2,2]:=1.35;
K_A [3,2]:=1.50;
K_A [4,2]:=1.75;
K_A [1,3]:=1.50;
K_A [2,3]:=1.60;
K_A [3,3]:=1.75;
K_A [4,3]:=2.00;
K_A [1,4]:=1.75;
K_A [2,4]:=1.85;
K_A [3,4]:=2.00;
K_A [4,4]:=2.25;

```

```

{-----}
{* Tabela 10 *}

```

```

Y_M [1,1]:=1.0;
Y_M [2,1]:=1.0;
Y_M [3,1]:=0.9;
Y_M [4,1]:=0.7;
Y_M [5,1]:=0.3;
Y_M [1,2]:=0.9;
Y_M [2,2]:=0.9;
Y_M [3,2]:=0.8;
Y_M [4,2]:=0.6;
Y_M [5,2]:=0.2;
Y_M [1,3]:=0.6;
Y_M [2,3]:=0.6;
Y_M [3,3]:=0.5;
Y_M [4,3]:=0.5;
Y_M [5,3]:=0.2;

```

```

{-----}
{* Dados referentes ao item 17.2.5 *}

```

```

c_gama[1]:=20;
c_gama[2]:=18.2;
c_gama[3]:=16.8;
c_gama[4]:=14.8;
c_gama[5]:=11;

```

```

{-----}

```

```

{ Texto_de_Apresentacao;}

```

```

Aquisicao_de_Dados;

```

```

Calculos;

```

```

contact_stress;

```

```

bending_stress;

```

```

Impressao_dos_Resultados;

```

```

WAIT;

```

PRINT_RESULTADOS;

Desenho;

Clear_type_ahead;

WAIT;

CLOSEGRAPH;

end.□