



- ***Apresentação da SNR***
- ***Escolha dos rolamentos em função da aplicação***
 - ✓ *Fatores de escolha dos rolamentos: aptidões, famílias*
 - ✓ *Gaiolas*
 - ✓ *Estanqueidades*
 - ✓ *Simbolização*
- ***Duração de vida***
 - ✓ *Capacidade de carga dinâmica e estática*
 - ✓ *Duração de vida nominal*
 - ✓ *Duração de vida corrigida*
 - ✓ *Confiabilidade*
- ***Montagem e instalação de rolamentos***
 - ✓ *Jogo radial*
 - ✓ *Ajuste*
 - ✓ *Escolha do lubrificante adequado*
 - ✓ *Avarias mais freqüentes*
- ***Utilização do CD-Rom SNR Duração de vida***
- ***Exemplos***

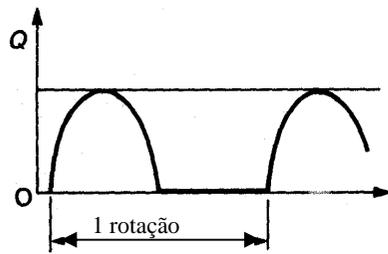


L10

Duração de vida

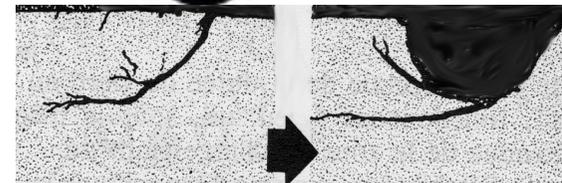
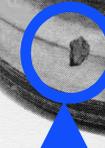
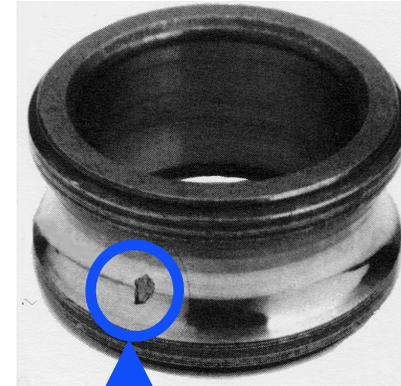
• Noção de duração de vida:

- 1 A noção de duração de vida é aliada com a "**morte natural**" do rolamento.
Esta "morte natural" se concretiza com a aparição de **escamações de fadiga**: elas se formam de fissuras e aparecem **as descamações** de matéria, sinal de **destruição progressiva** do rolamento.



Variação cíclica da carga Q num ponto do anel giratório

- 2 A duração de vida de um rolamento se define como: **o número de rotações que ele pode efetuar sob uma dada carga antes que apareça o primeiro sinal de escamação.**
- 3 A aparição de uma dada deterioração apresenta um caráter aleatório; portanto a duração de vida é um **dado estatístico** (previsão) e não um dado preciso.



Idêntico aos "buracos" nas pistas provocadas pelas passagens sucessivas de veículos (cargas pesadas)

SNR - Industry

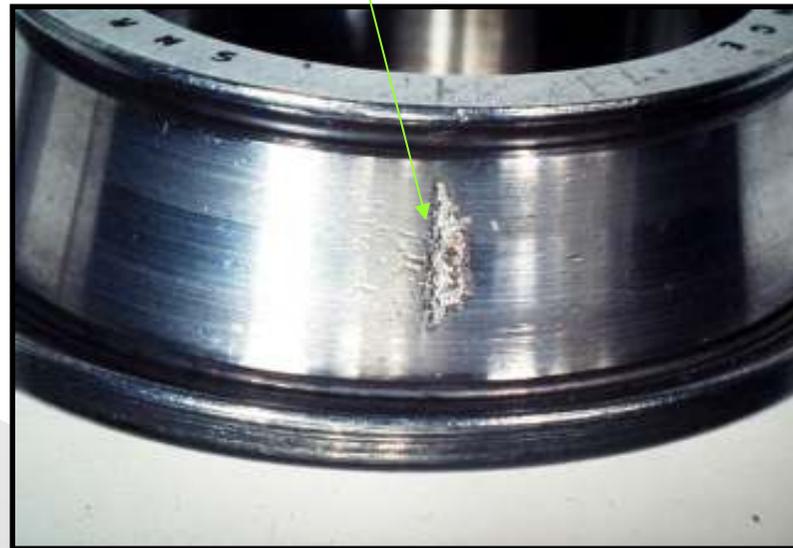




Morte natural de um rolamento



Escamação por fadiga



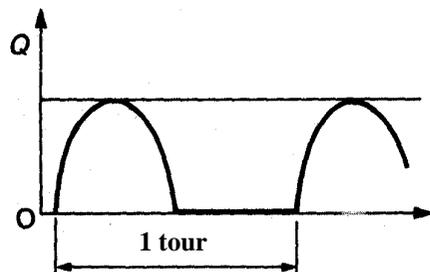
SNR - Industry



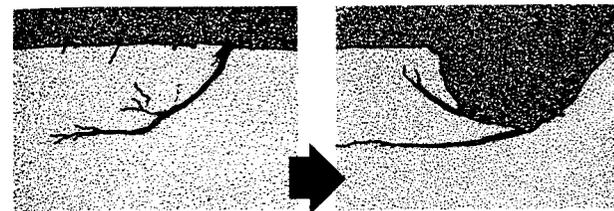


Morte natural de um rolamento

O conjunto de pressões cíclicas provoca, à mais ou menos longo prazo, uma deterioração do metal por fadiga que se inicializa, em geral, em uma sub-camada, próxima da superfície (onde as tensões são máximas) sob a forma de uma fissura que se propaga até a superfície.



Varição cíclica da carga P em um ponto do anel giratório



Estas fissuras têm suas origens mais particularmente nas inclusões (impurezas) que podem se encontrar na matéria.



Duração de vida nominal (norma ISO 281)



Duração de vida nominal (L_{10}) : duração de vida esperada por 90% de rolamentos idênticos utilizados nas mesmas condições

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^n \frac{10^6}{60 \cdot N} \text{ Horas} \quad \left\{ \begin{array}{l} n=3 \text{ para rolamento de esferas.} \\ n=10/3 \text{ para rolamentos de rolos.} \end{array} \right.$$

- C: capacidade de carga dinâmica de base (Norma ISO281)
- P: carga radial dinâmica equivalente (Norma ISO281)
- N: velocidade de rotação em rpm



Carga radial dinâmica de base (norma ISO 281)

• Rolamentos de esferas

$$C_r = b_m f_c (i \cdot \cos \alpha)^{0,7} \cdot Z^{2/3} \cdot D_w^{1,8}$$

• Rolamentos de rolos

$$C_r = b_m f_c (i \cdot L_{WE} \cdot \cos \alpha)^{7/9} \cdot Z^{3/4} \cdot D_{WE}^{29/27}$$

• Rol. encosto de esferas

$$C_r = b_m f_c \cdot Z^{2/3} \cdot D_w^{1,8}$$

Onde:

- D_w = diâmetro médio dos corpos rolantes (esferas) (mm)*
- D_{WE} = diâmetro médio dos corpos rolantes (rolos) (mm)*
- L_{WE} = comprimento efetivo da geratriz dos rolos (mm)*
- α = ângulo de contato nominal*
- Z = número de corpos rolantes por fileira*
- i = número de fileiras de corpos rolantes.*
- f_c = coeficiente corretor em função do diâmetro dos corpos rolantes e do diâmetro primitivo do rolamento*
- b_m = coeficiente corretor em função da evolução da qualidade dos rolamentos (1,3 para rolamento de esferas; 1,1 para rolamentos de rolos)*



Carga radial dinâmica equivalente

$$P = X \cdot Fr + Y \cdot Fa$$

Condições de trabalho do rolamento:

Fr: carga radial real no rolamento

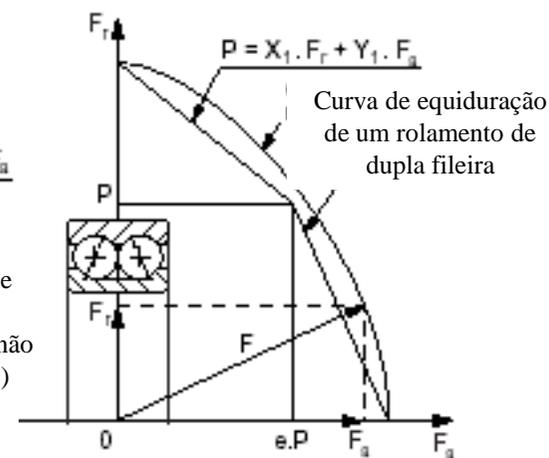
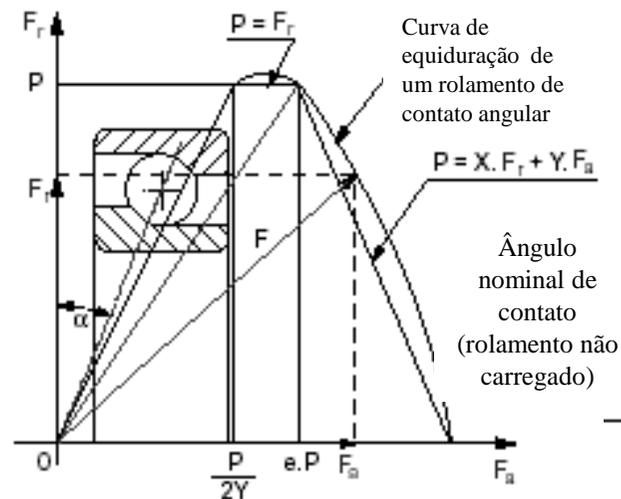
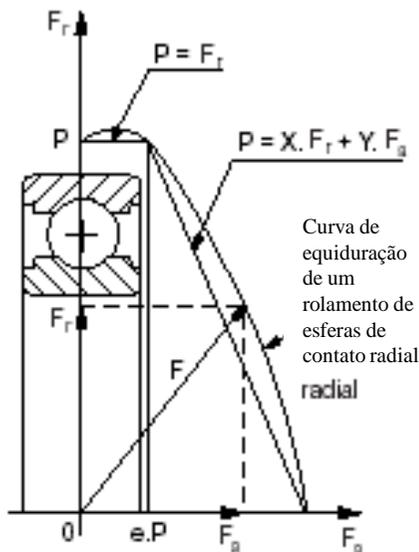
Fa: carga axial real no rolamento

Segundo o tipo de rolamento:

(consultar catálogo SNR)

X: fator de carga radial

Y: fator de carga axial





Cargas axiais induzidas

Q_i = esforço induzido à capa por um rolo qualquer, em posição angular Ψ_i

Equações de equilíbrio:

$$RQ_a = \sum Q_i \sin \alpha = F_A$$

$$RQ_r = \sum Q_i \cos \alpha \cdot \cos \Psi_i = F_R$$

Em caso de limite de contato cone-capo por 1 só rolo,

$\cos \Psi_i = 0$, significa $F_A = F_R \tan \alpha$

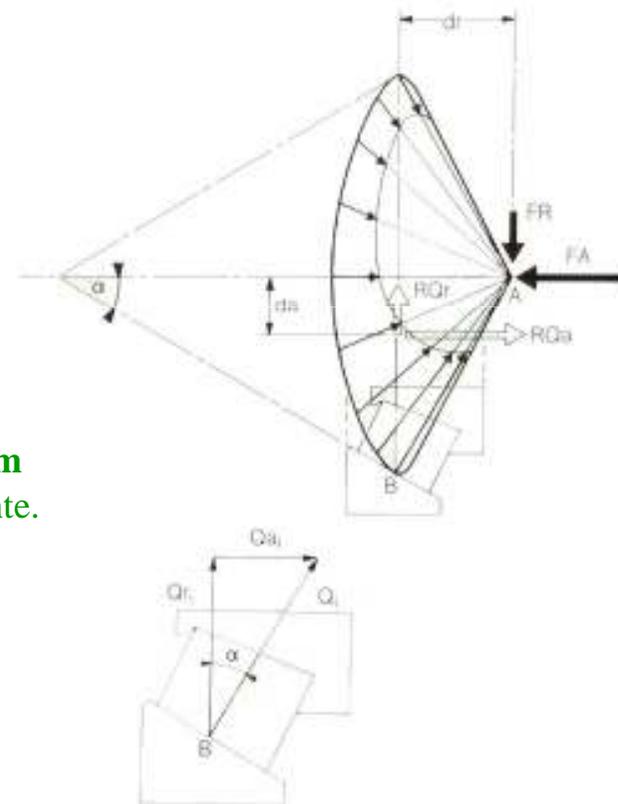
• **Em caso de carga com predominância radial e rolamento com um leve jogo interno**, a zona de carga é de 180° aproximadamente. Podemos, portanto, tomar como valor médio:

$$F_A = 1,25 F_R \tan \alpha$$

Como $Y = 0,4 \cotang. \alpha$

$$F_A = F_R / 2Y$$

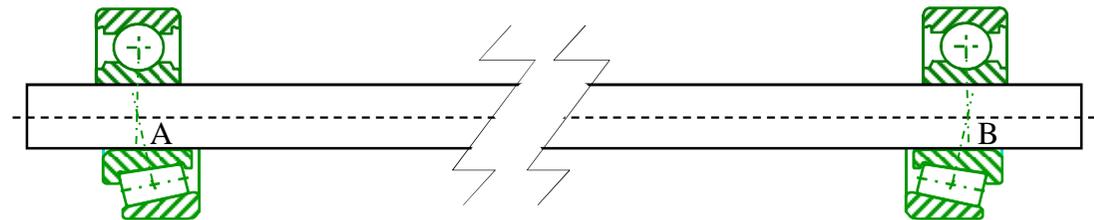
• **Em todos os outros casos com carga de predominância axial**, o rolamento é pré-carregado e a força axial induzida é superior àquela da fórmula anterior, variando em função da curva de penetração específica deste rolamento. Seu cálculo é complexo e deve ser realizado por um fabricante de rolamentos.





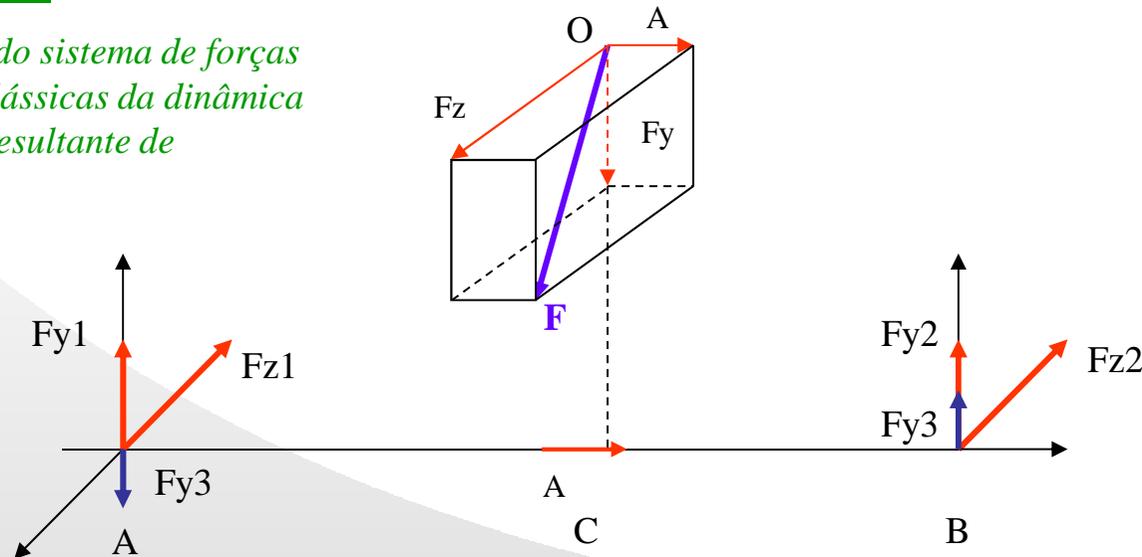
Determinação das cargas nos rolamentos (1)

Equilíbrio radial e axial do eixo:



1.-Rolamentos de contato radial

A repercussão sobre a montagem do sistema de forças externa se calcula por fórmulas clássicas da dinâmica (resultante de forças e reações e resultante de momentos)



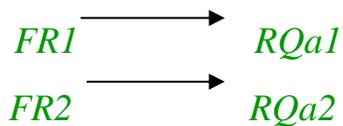


Determinação das cargas nos rolamentos (2)

2.-Rolamentos de contato angular (em O ou em X)

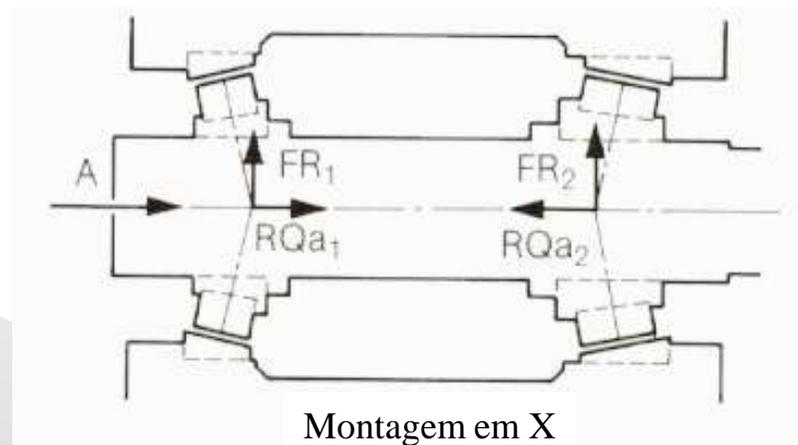
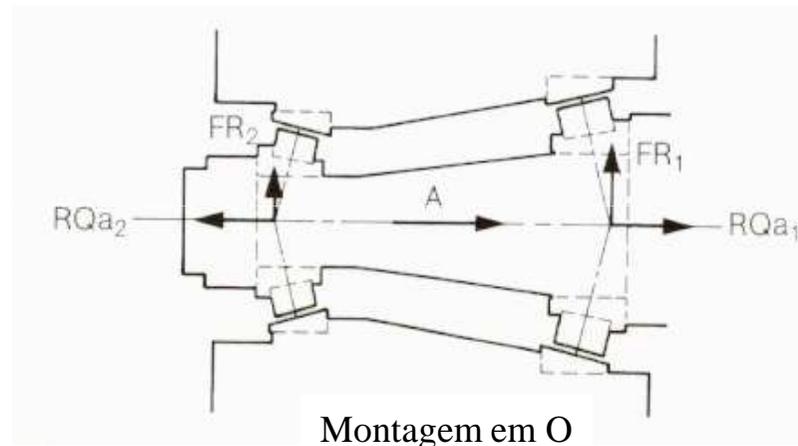
Equilíbrio axial do eixo:

Os esforços radiais produzem, pela inclinação das pistas, uma força e reação axial nomeada força axial induzida:



a montagem é portanto submetida à ação de:

- 2 esforços radiais FR_1 e FR_2
- 2 esforços axiais induzidos RQa_1 e RQa_2
- 1 esforço axial externo A





Determinação das cargas nos rolamentos (3)

2.-Rolamentos de contato angular (em O ou em X) Equilíbrio axial do eixo:

Se o rolamento 1 tem sua força induzida no mesmo sentido que o axial externo A, o equilíbrio axial do eixo é: $A + RQ_{a1} = RQ_{a2}$

Força induzida rol. N° 1: $RQ_{a1} \geq FR_1/2Y_1$

Força induzida rol. N° 2: $RQ_{a2} \geq FR_2/2Y_2$

Força axial externa mínima no rolamento 1: $FR_2/2Y_2$

Força axial externa mínima no rolamento 2: $A + (FR_1/2Y_1)$

O rolamento que trabalhará com jogo será submetido à mais fraca das 2 forças axiais, que significa:

•Se $A + (FR_1/2Y_1) > FR_2/2Y_2$ o rol. 1 trabalha com jogo:

$RQ_{a1} = FR_1/2Y_1$ $RQ_{a2} = A + (FR_1/2Y_1) (= FA_2)$

$P_1 = FR_1$ $P_2 = XFR_2 + Y_2 FA_2$ se $FA_2/FR_2 > e$

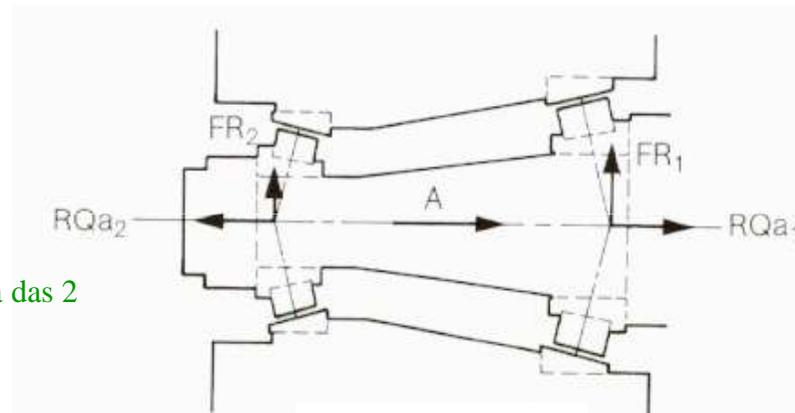
$P_2 = FR_2$ se $FA_2/FR_2 < e$

•Se $A + (FR_1/2Y_1) < FR_2/2Y_2$ o rol. 2 trabalha com jogo:

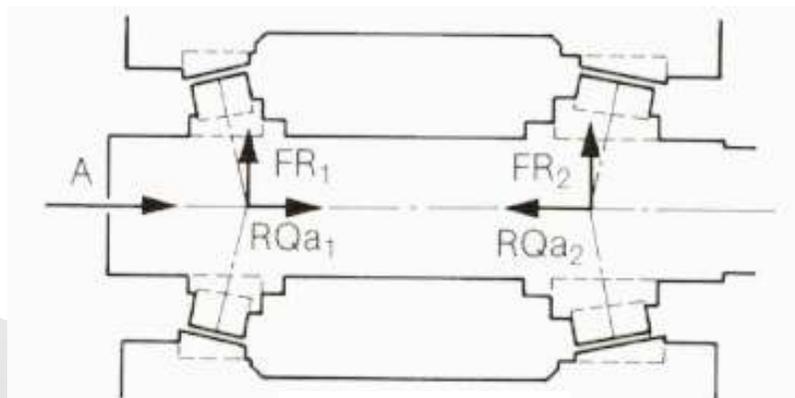
$RQ_{a1} = (FR_2/2Y_2) - A (= FA_1)$ $RQ_{a2} = FR_2/2Y_2$

$P_1 = XFR_1 + Y_1 FA_1$ se $FA_1/FR_1 > e$ $P_2 = FR_2$

$P_1 = FR_1$ se $FA_1/FR_1 < e$



Montagem em O



Montagem em X



Cargas e velocidades variáveis

- **Carga constante e velocidade variável:** *Velocidade equivalente*

$$N_e = \sum t_i \cdot N_i \quad \text{com} \quad \sum t_i = 1$$

- **Carga variável e velocidade constante:** *Carga equivalente*

$$P_e = (\sum a_i \cdot P_i^n)^{1/n} \quad \text{com} \quad \sum a_i = 1$$

- **Carga periódica e velocidade constante:** *Carga equivalente*

$$\text{Variação linear:} \quad P_e = 1/3 (P_{\text{mini}} + 2 P_{\text{maxi}})$$

$$\text{Variação sinusoidal:} \quad P_e = 0,5 P_{\text{min}} + 0,7 P_{\text{max}}$$

- **Cargas e velocidade variáveis:** *Duração de vida ponderada*

$$L_{10} = (\sum t_i / L_{10i})^{-1} \quad \text{com} \quad \sum t_i = 1$$



Carga estatística de base (norma ISO 76)

Valor da carga radial que cria no ponto de contato mais carregado, uma pressão de contato (pressão de Hertz) igual a:

- 4200 Mpa para rolamentos de esferas (exceção rol. autocompensadores de esferas)
- 4600 Mpa para rolamento autocompensadores de esferas
- 4000 Mpa para rolamentos de rolos

Em condições normais de trabalho:

$$\frac{P_o}{C_o} < 0,5$$

Onde:

$$P_o = X_o.F_r + Y_o.F_a$$

- X_o e Y_o se encontram nos catálogos
- F_r e F_a são as forças estáticas às quais é submetido o rolamento

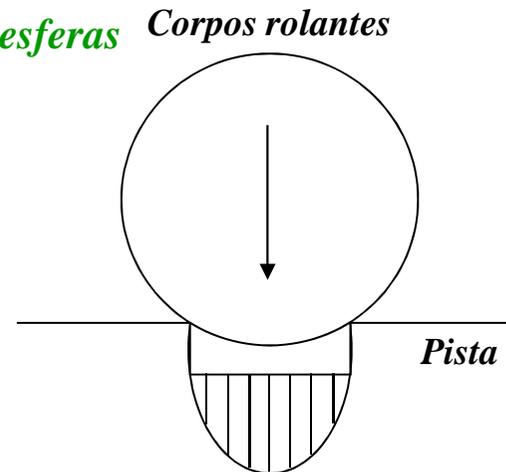


Diagrama de pressão em estática

1 Mpa = 1 N/mm²



Duração de vida corrigida (norma ISO 281)

$$L_{na} = a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot L_{10}$$

a1 = coeficiente corretor para uma **confiabilidade diferente de 90%**.

a2 = coeficiente corretor em função dos materiais utilizados, **da geometria interna e do processo de fabricação do rolamento**.

a3 = coeficiente corretor segundo as **condições de funcionamento**.

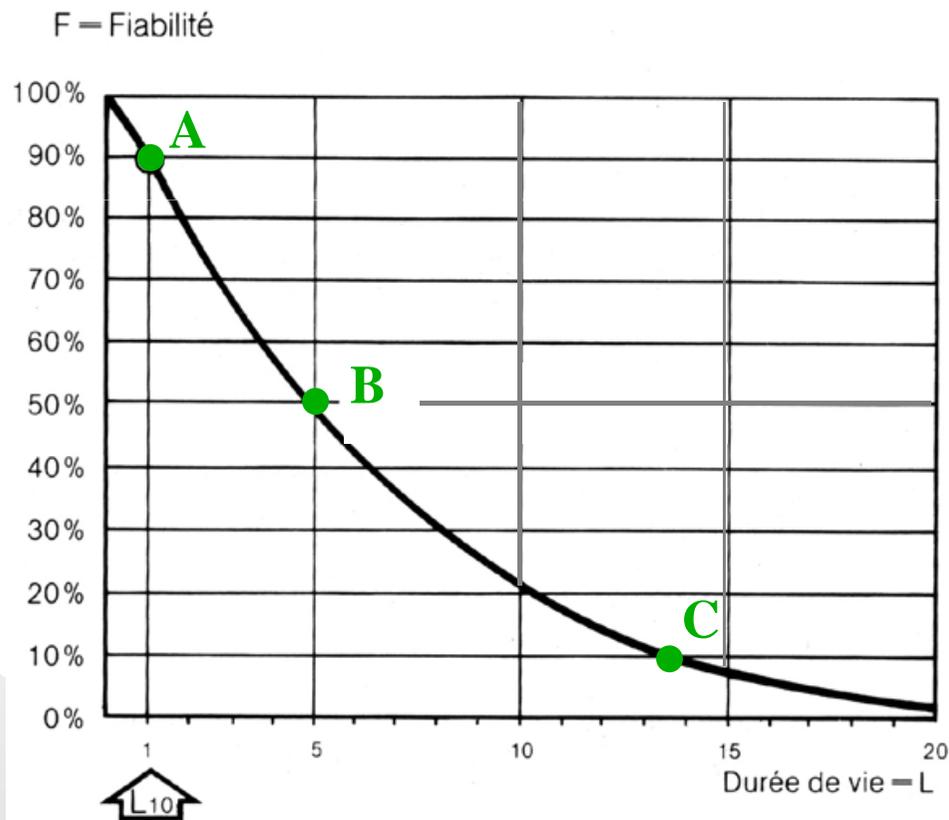


Duração de vida nominal .Coeficiente a1

A curva mostra claramente a grande dispersão da duração de vida dos rolamentos.

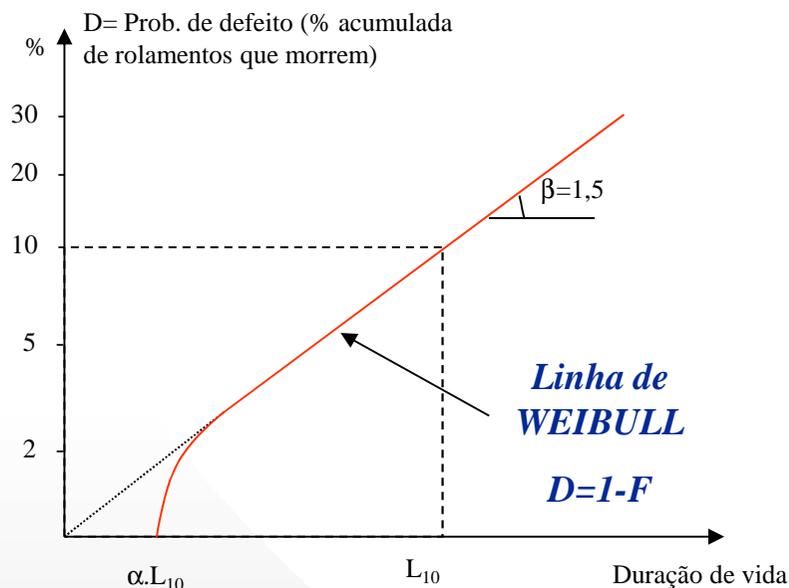
Donde a importância de não tirar conclusões definitivas sobre estes dados antes da realização de testes

A L10 é um dado estatístico





Coef. a1: Confiabilidade para uma duração de vida determinada

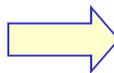


Conhecendo a L_{10} de uma população, podemos definir a confiabilidade em um período determinado, por exemplo no período de garantia L

$$F = \exp \left(\ln 0,9 \left(\frac{L}{L_{10}} \right)^\beta \right)$$

Para valores de 2,5% de L_{10} a confiabilidade é de 100%

$$\alpha = 0,025$$



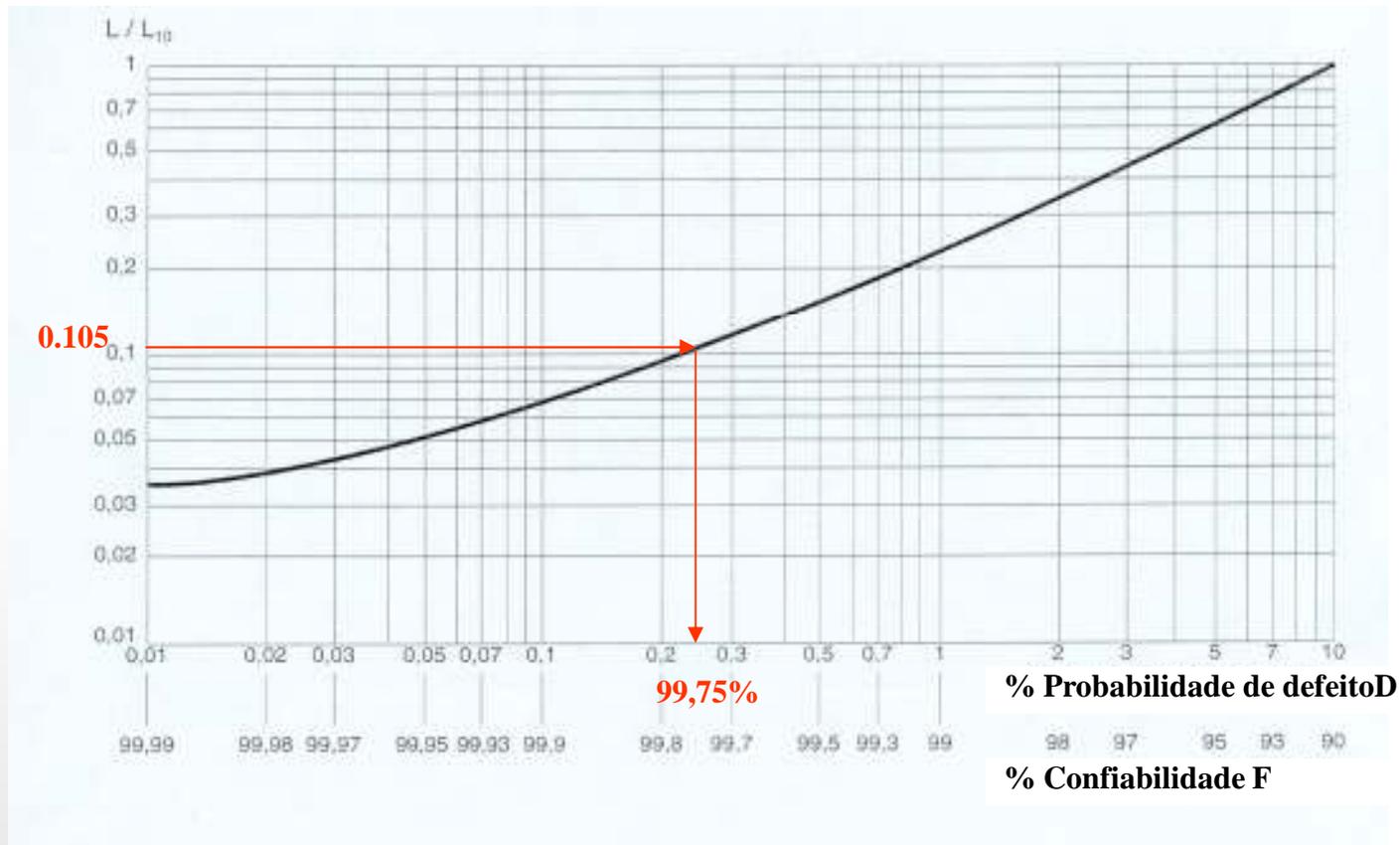
$$F = \exp \left(\ln 0,9 \left(\left(\frac{L}{L_{10}} \right) - \alpha \right)^\beta (1 - \alpha)^{-\beta} \right)$$

Exemplo: Rolamento de uma bomba cuja $L_{10}=20000$ h.

Não há nenhum risco de defeito nas primeiras 500 horas de funcionamento, e ao longo de um ano, 24h/24h (8000 h), o risco de defeito é de 2,5 %, que se reduz à 0,5 % se trabalhar 8h/dia.



Coef. a1: Confiabilidade para uma duração de vida determinada



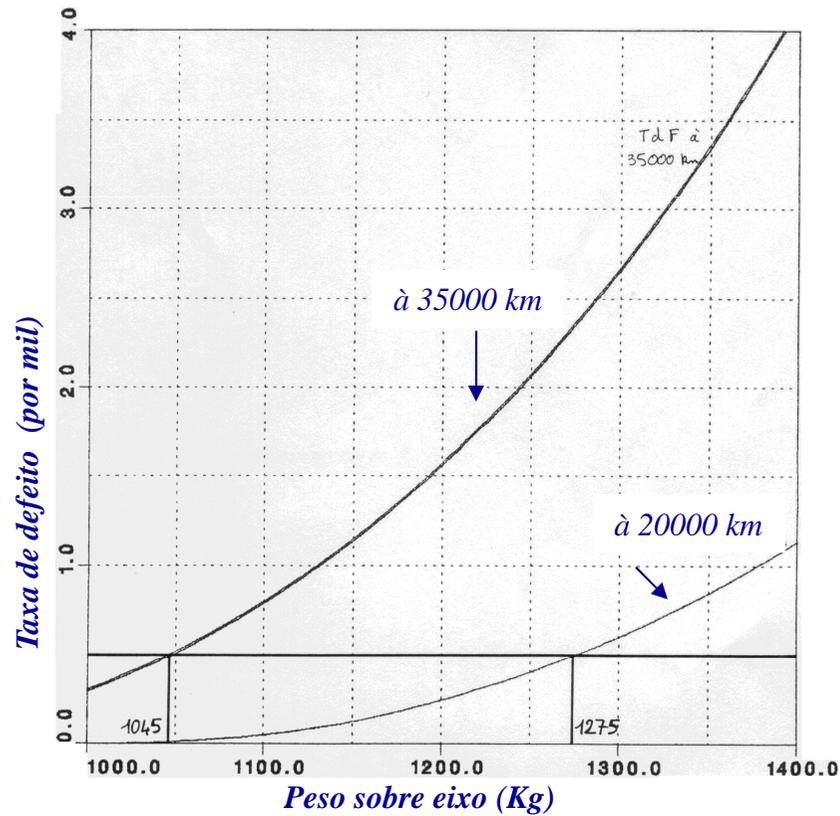
Se $L_{10}=19100$ h, a confiabilidade à 2000 horas é ($L/L_{10}=0.105$) $F=99.75\%$ e $D=0.25\%$

e para $L<500$ horas ($L/L_{10}=0.025$) a confiabilidade $F=100\%$.



Montagem roda de carro: Cálculo de duração de vida

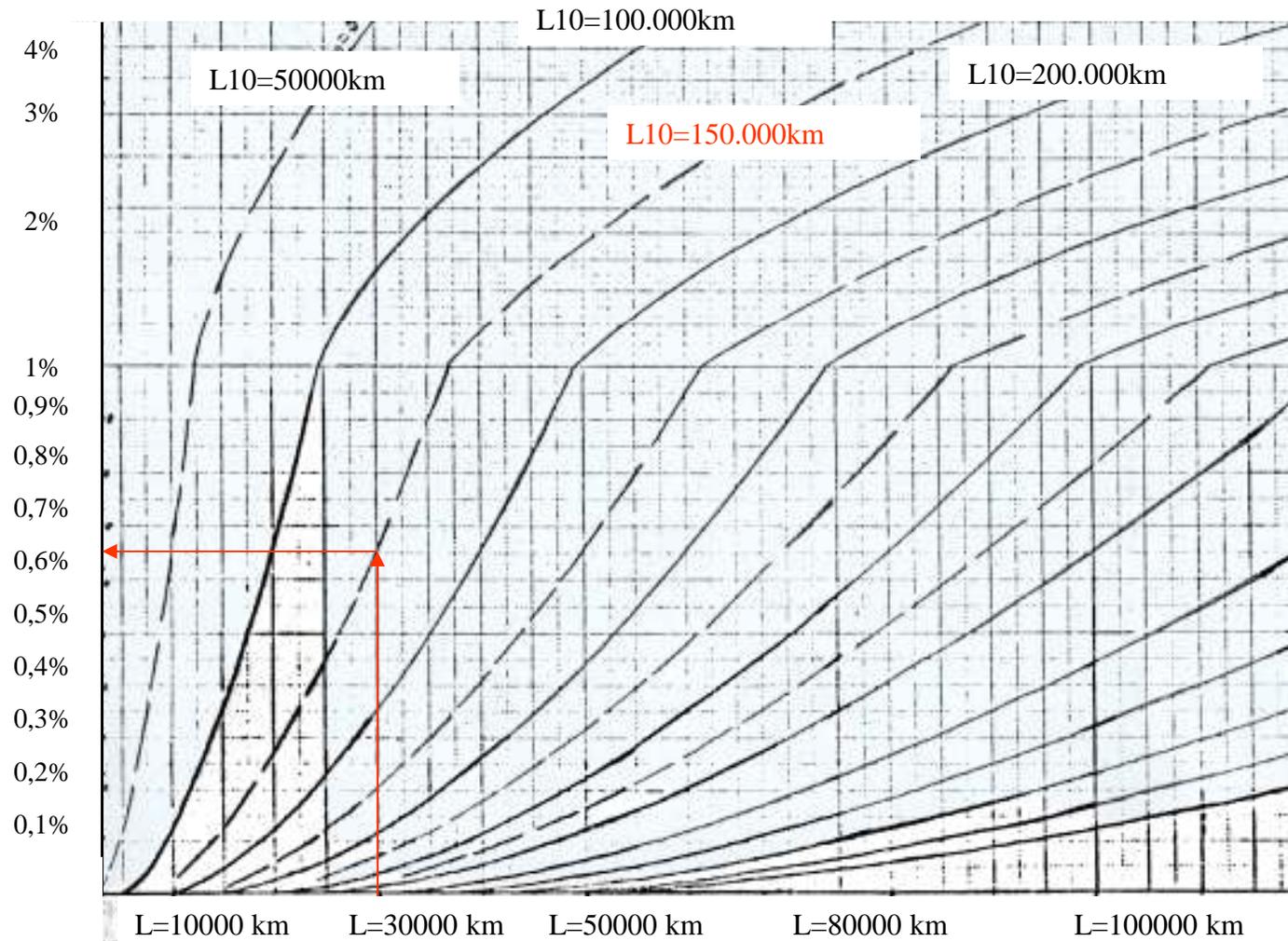
Taxa de defeito em função do peso sobre eixo para exp= 7 mm



GB 12807 S02 (A2=3.5)



Montagem roda de carro: *Evolução taxas de defeito*

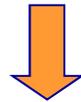




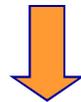
Duração de vida nominal .Coeficiente a_2

Para certas aplicações especiais um rolamento pode:

- ser fabricado a partir de um aço especial diferente do padrão (aço refundido no vácuo, aço rápido,...)
- ser modificado em sua geometria interna (curvatura especial das pistas, ...)
- ser fabricado graças a processos particulares



$$1 < a_2 < 4$$



Aumento da duração de vida



Coeficiente a_2 : qualidade do aço (1)

Entre os fatores que tem uma influência na duração de vida de um rolamento, a escolha da qualidade do aço é primordial.

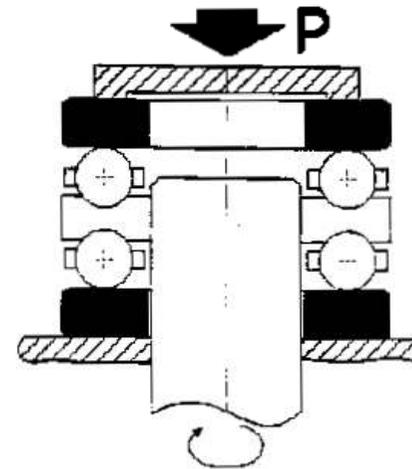
A limpeza do aço empregado é melhorado graças a um processo de elaboração no vácuo (que provoca uma diminuição da taxa e do tamanho das inclusões).

Os aços geralmente empregados são:

- 100Cr6 para a têmpera real
- C55 ou C70 para um tratamento térmico localizado (ex: função meio)

SNR trabalha com fabricantes de aço homologados para melhorar a resistência à fadiga dos materiais empregados.

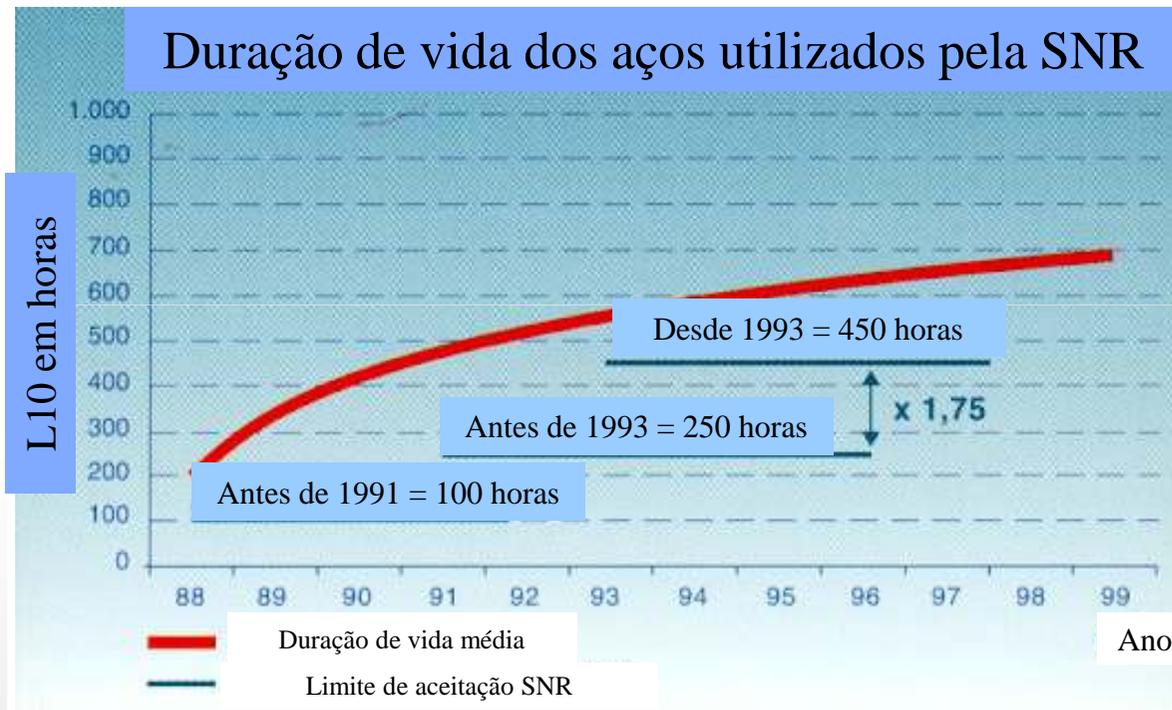
Exemplo: a duração de vida potencial do aço 100Cr6 na qualidade SNR QE foi multiplicada por 4.5 nos últimos 10 anos.



A qualidade do aço é verificada periodicamente por testes do tipo « FB »



Coeficiente a_2 : qualidade do aço (2)



Condições de aceitação SNR

Duração de vida mínima de 450 horas nas estritas condições de teste SNR



Coeficiente a_2 : processo de fabricação

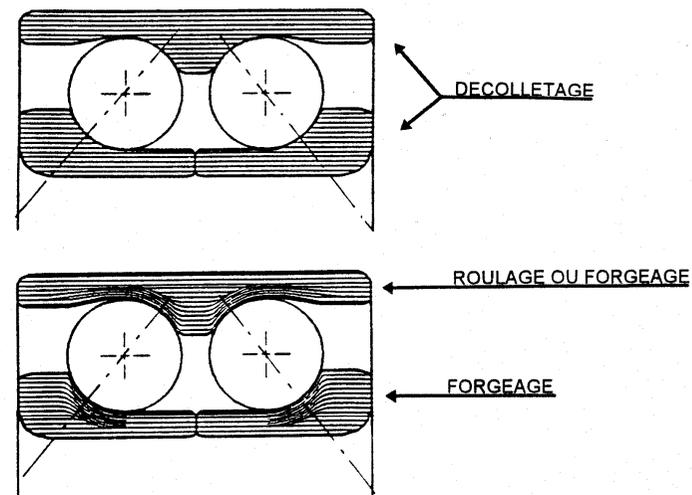
A melhoria constatada da qualidade do aço de base, melhora igualmente:

- o processo de fabricação dos anéis por retirada da gola para forja à frio ou meio aquecida com as seguintes vantagens:

- fibras paralelas à pista.
- taxa de re-engrossado elevada
- melhor aceitação das heterogeneidades.

- a qualidade de fabricação das pistas:

- perfil otimizado
- rugosidade, deformações melhoradas



$a_2 =$ de 1 à 4 segundo o tipo de rolamento



Influência das condições de funcionamento

Condições “normais” de funcionamento:

- ✓ *Cargas adequadas(*)*
- ✓ *Boa precisão de execução dos eixos e dos alojamentos*
- ✓ *Jogo de funcionamento adequado(**)*
- ✓ *Temperatura de funcionamento compreendida entre -20°C e $+110^{\circ}\text{C}$*
- ✓ *Velocidade suficiente mas inferior à velocidade limite(*)*
- ✓ *Sem poluição*
- ✓ *Com uma boa lubrificação*

Diferentes condições de trabalho têm uma influência na duração de vida esperada pelo rolamento

(*) Análise do capítulo « escolha »

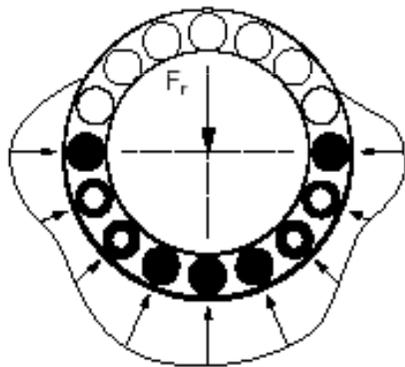
(**) A analisar no capítulo « Montagem »



Boa precisão de execução dos eixos e alojamentos

Resultado dos defeitos de forma:

Repartição não uniforme e descontínua dos esforços nos corpos rolantes



Muito importante!! As tensões locais provocadas pelos defeitos de forma dos suportes dos rolamentos diminuem de maneira significativa sua duração de vida

Exemplos (para os rolamentos fabricados na classe de precisão normal ou padrão):

- **Cilindricidade:** do eixo= entre 3 e 8 microns
do alojamento = entre 6 e 12 microns
- **Perpendicularidade** dos respaldos em relação ao:
eixo = entre 11 e 25 microns
alojamento = entre 21 e 40 microns

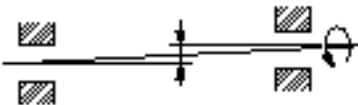


Defeitos de posição: Desalinhamento (1)

Nós os detectamos pela aparição de um ângulo entre o eixo do anel interno e o eixo do anel externo

Causas possíveis:

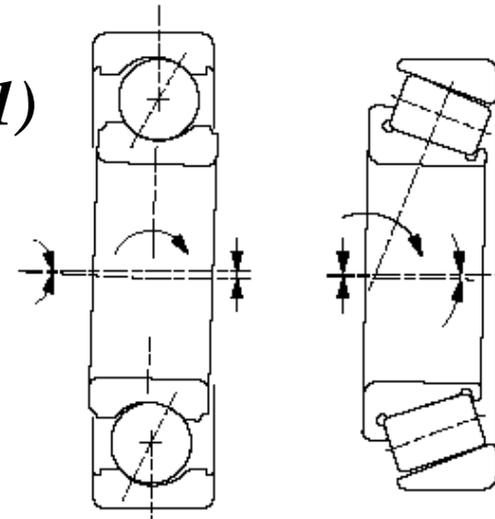
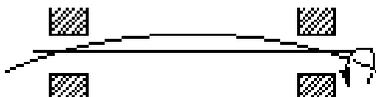
1.- Defeito de concentricidade entre os 2 suportes do eixo ou dos alojamentos



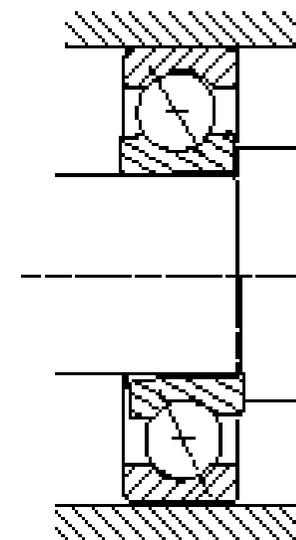
2.- Defeito de alinhamento entre os eixos geométricos do eixo e o alojamento de um mesmo rolamento



3.- Defeito de linearidade do eixo

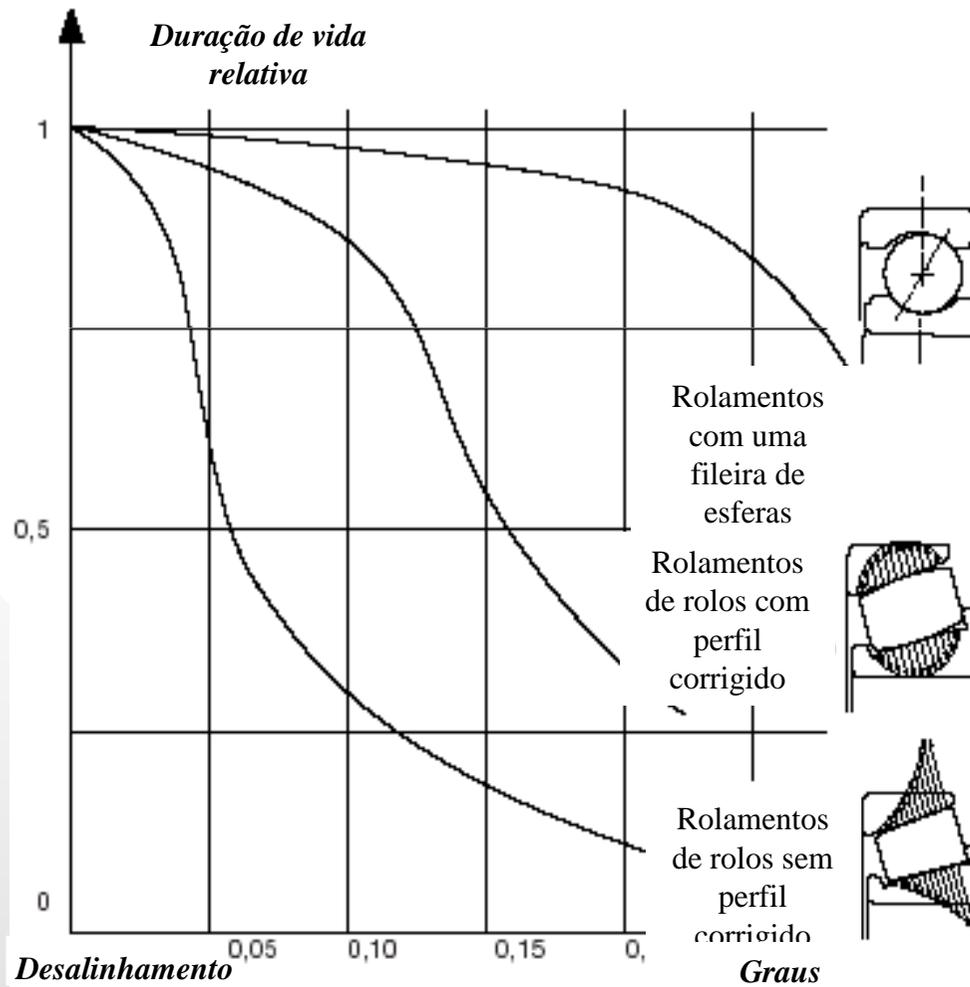


4.- Defeito de perpendicularidade entre les épaulements e os suportes





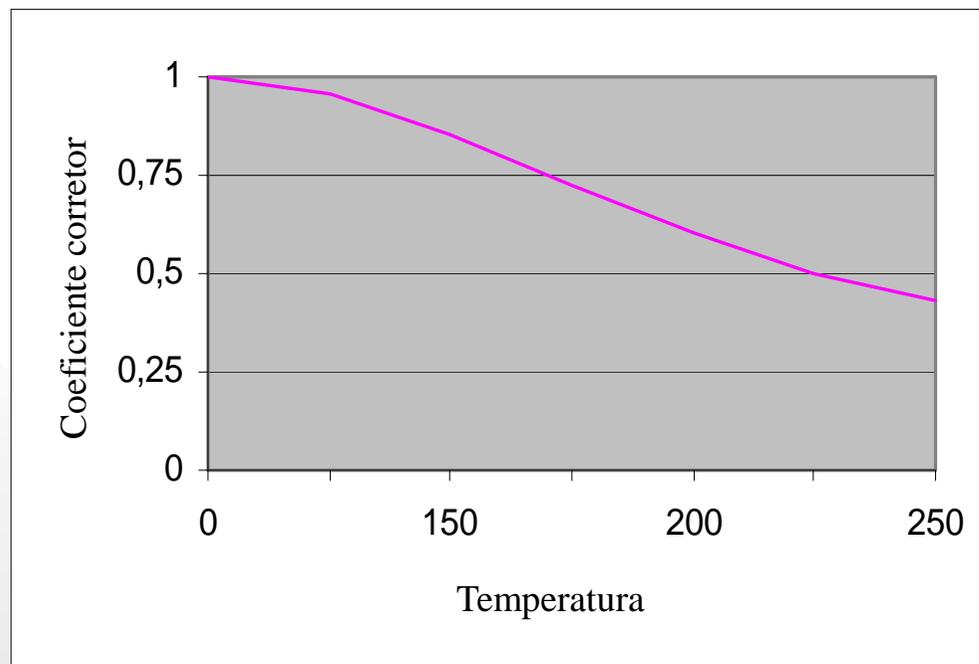
Defeitos de posição: Desalinhamento (2)





Influência da temperatura de funcionamento

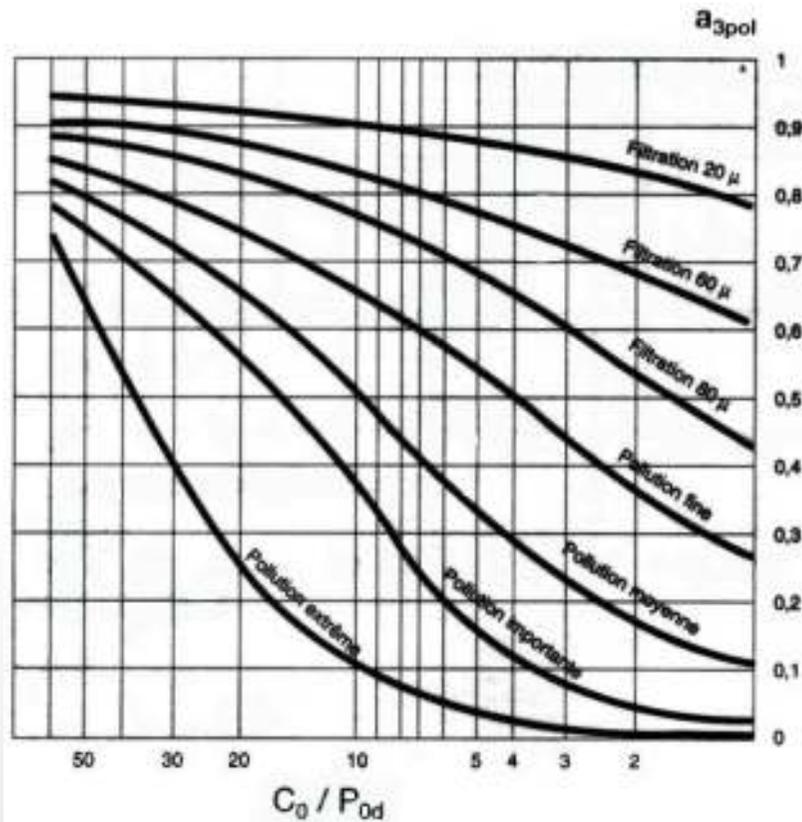
Coeficiente corretor médio a₃ da duração de vida em função da temperatura de funcionamento



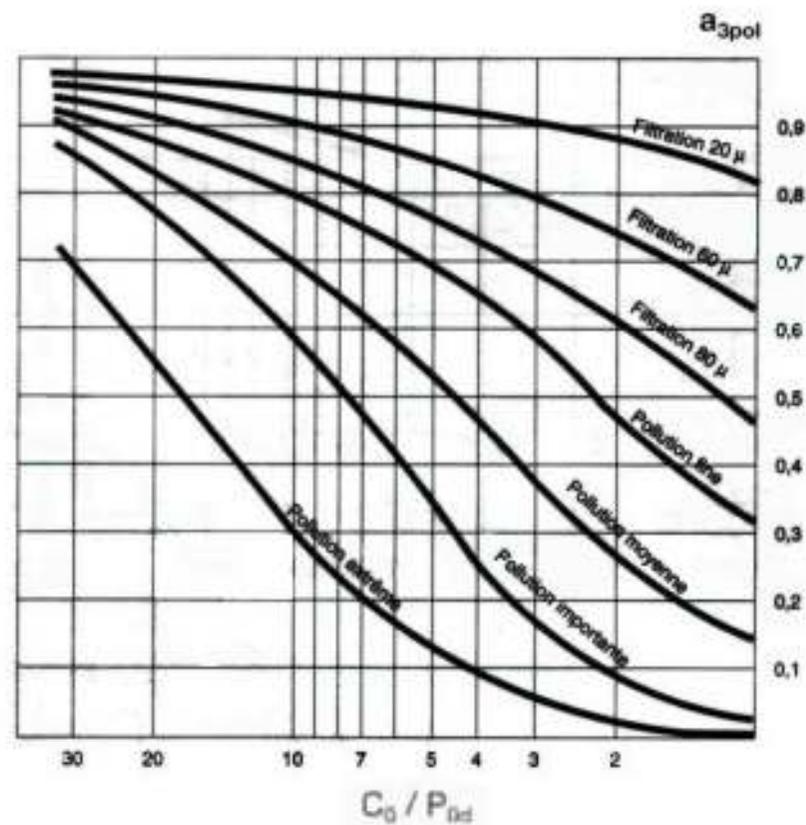
O aço padrão para rolamentos perde sua dureza progressivamente a partir de 170°C



Influência da poluição na duração de vida



Rolamentos de esferas



Rolamentos de rolos

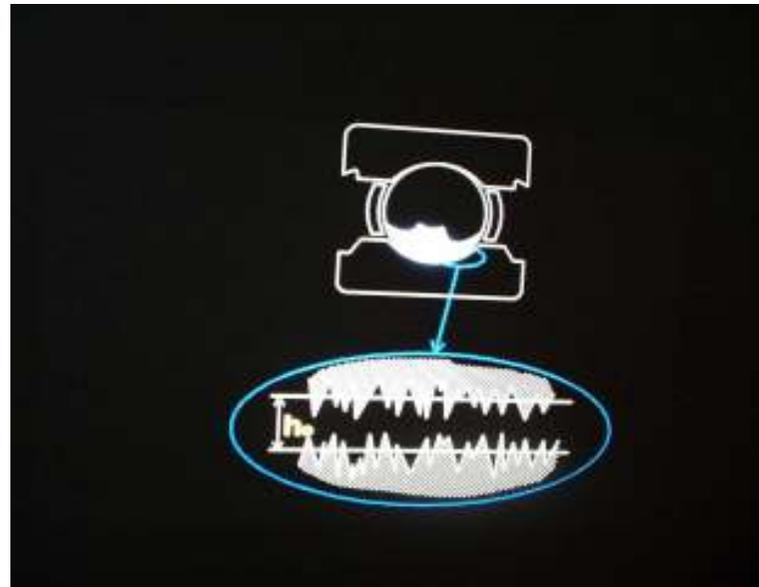


Lubrificação (coef. α_3):

Formação do filme de óleo

Teoria ElastoHidroDinâmica (EHD):

Aquela que leva em conta todos os parâmetros que intervêm no cálculo das deformações elásticas do aço e das pressões hidrodinâmicas do lubrificante, e permite avaliar a espessura do filme de óleo.

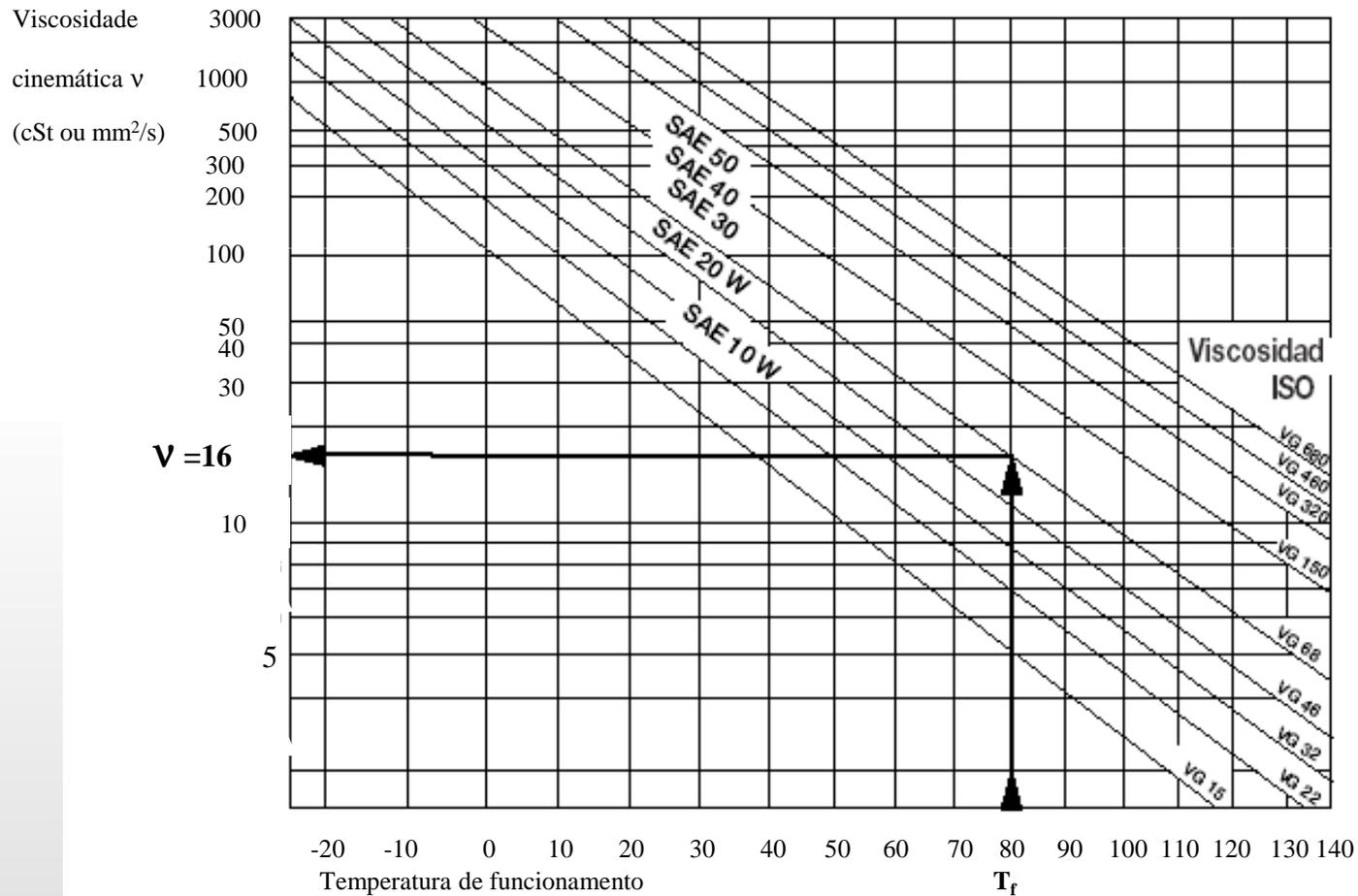


Aplicando aos rolamentos esta teoria, podemos considerar que a espessura do filme de óleo depende quase exclusivamente da viscosidade do óleo e da velocidade de rotação



Lubrificação (coef. a_3):

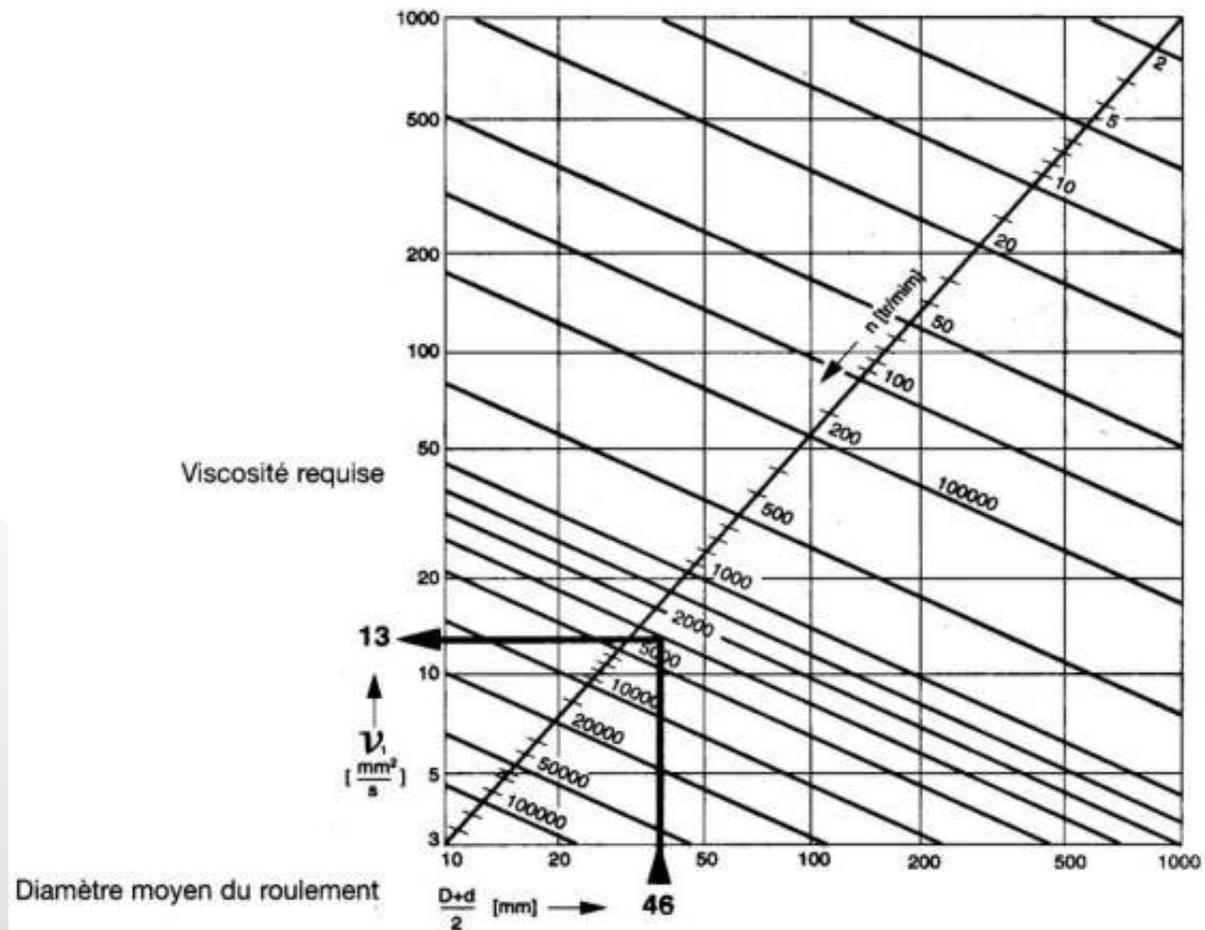
Variação da viscosidade em função da temperatura de funcionamento





Lubrificação (coef. a3):

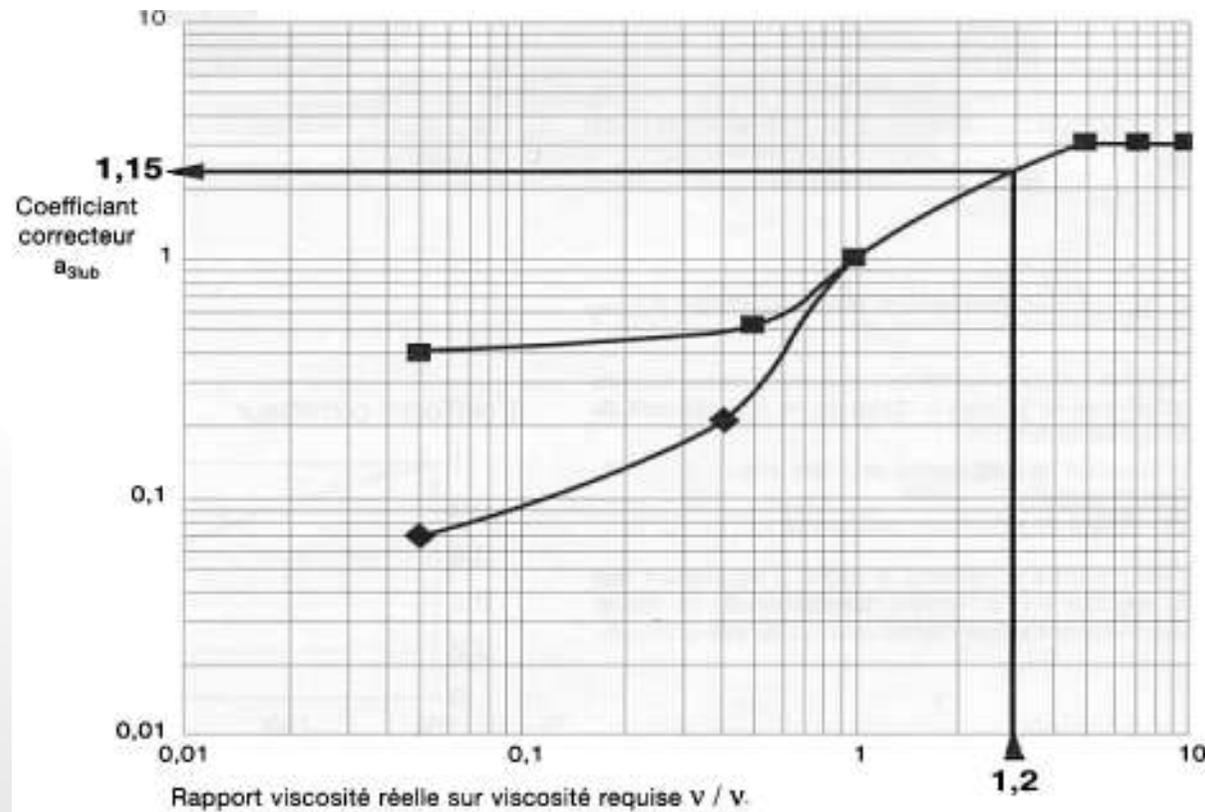
Viscosidade de funcionamento requerida, em função do tamanho do rolamento e da velocidade de funcionamento





Lubrificação (coef. a3):

Coefficiente corretor a3 da duração de vida, em função das condições de lubrificação



Sem aditivo pressão extrema

Com aditivo pressão extrema

SNR - Industry





*Centro de testes: **Duração de vida experimental***



SNR - Industry





Duração de vida

Existem duas maneiras de calcular a duração de vida:

- **aproximativa**: método C/P para as aplicações simples
- **Completa**, baseada na teoria da cinemática e a mecânica, utilizando análise numérica que simula o comportamento real dos materiais.

Para esta empregamos seja **softwares padrões de cálculo por elementos finais**, como **IDEAS ou ABACUS**, seja softwares específicos criados pela SNR como **ICARE** (utilizado para simular o comportamento do eixo e seus dois apoios).

Estes softwares tratam dos parâmetros de montagem, tais como: geometria interna dos rolamentos, condições de montagem (ajuste), características do eixo e do alojamento (material, elasticidade...), especificações do lubrificante, cargas, velocidade,...e **calculam o comportamento e duração de cada um dos corpos rolantes de cada rolamento**, ponderando o conjunto de valores resultantes deste cálculo para obter um resultado final para cada rolamento e o global da montagem, que será afetada, neste caso, os coeficientes corretores **a1**, **a2** e **a3** correspondentes.

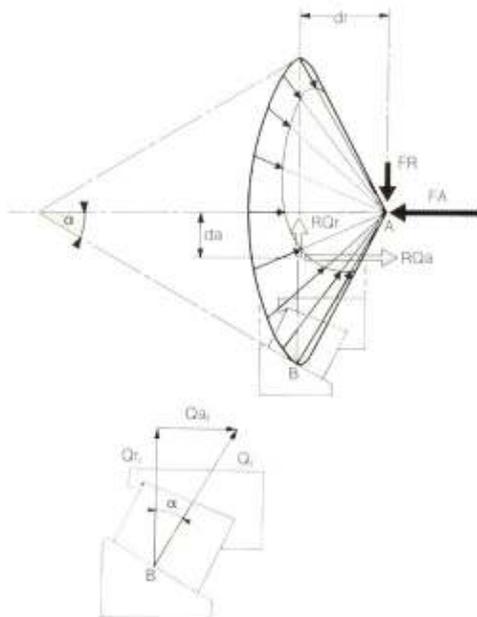
A SNR utiliza este método em todas as aplicações importantes em que o cliente solicita.



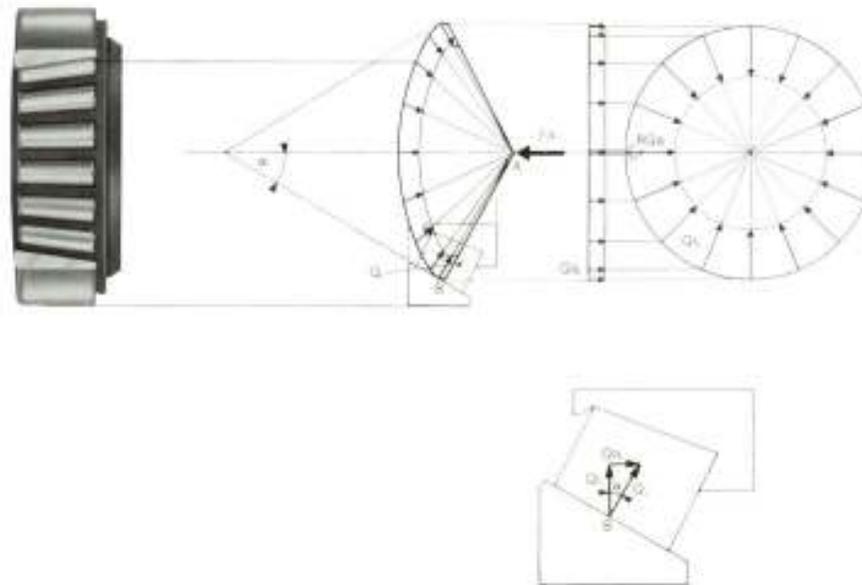
Duração de vida: Método completo

Distribuição dos esforços sobre os corpos rolantes em um rolamento cônico

Cargas combinadas

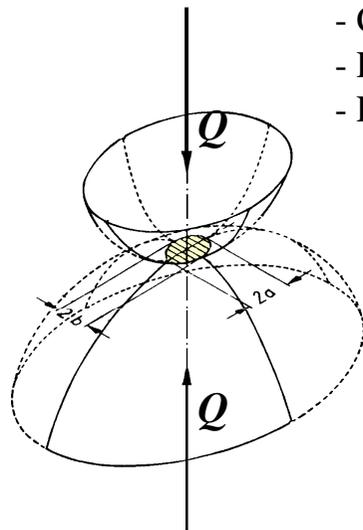


Carga axial pura

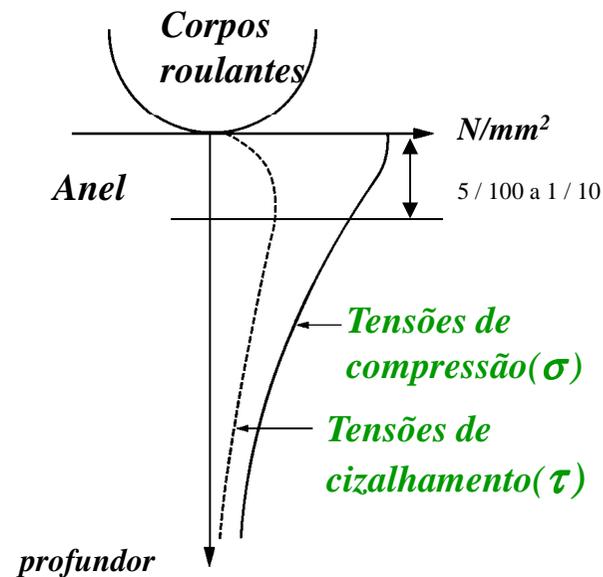
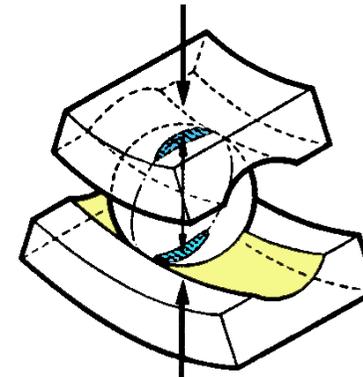




Pressão de contato: Teoria de Hertz



- Contato esfera/pista= elipse: a, b
- Pressão de contato: Q
- Esforços internos: σ



$$\sigma = (3Q / \pi a \cdot b) \cdot [1 - (x/a)^2 - (y/b)^2]^{1/2}$$

$$\sigma_{max} = 1,5 \cdot Q / \pi a \cdot b \text{ (no centro)}$$

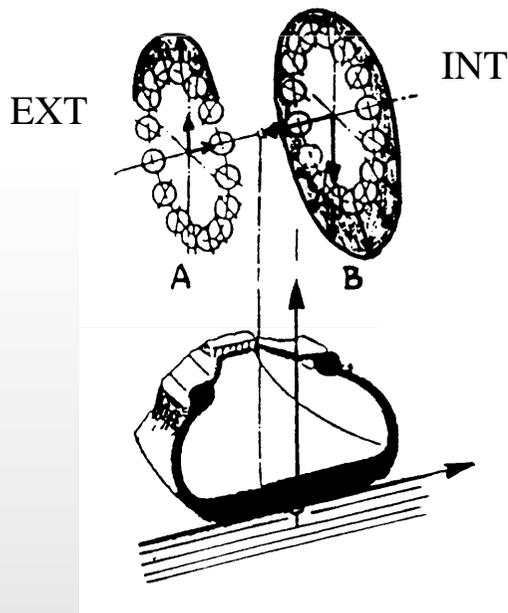
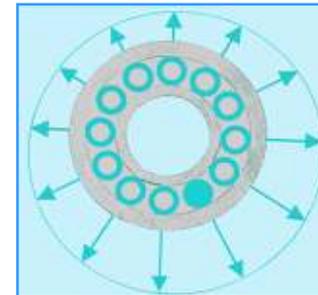
$$\sigma_{max} \approx 3500 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_{max} \approx 1000 \text{ N/mm}^2$$

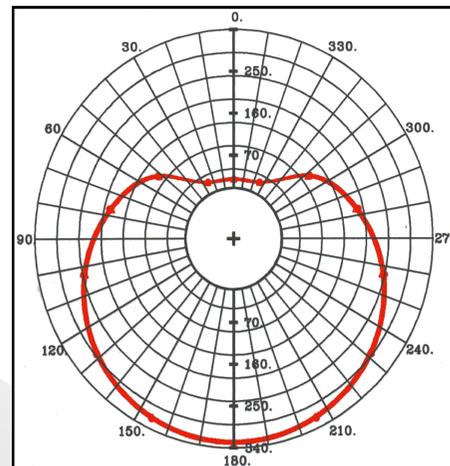


Pressão de contato:

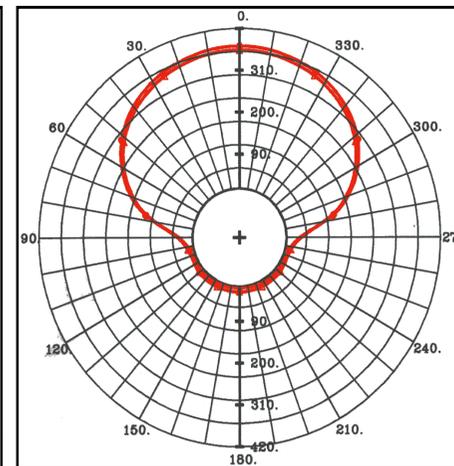
Rolamento com dupla fileira de corpos rolantes



Fileira interna

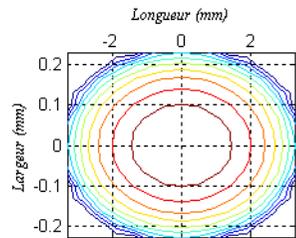


Fileira externa

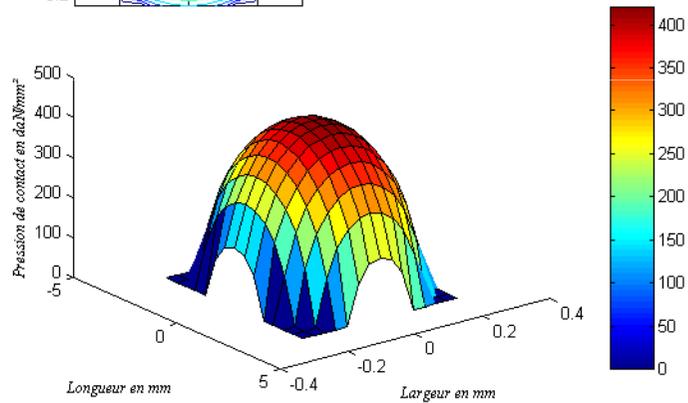




Pressão de contato:

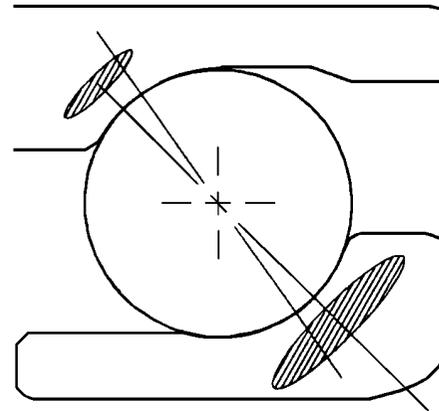


Pressão de contato
corpos rolantes/pista



*Exemplo de cálculo de esforços nos
rolamentos de esferas*

Débordement da elipse



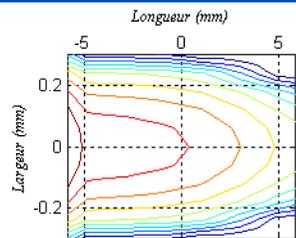
Determinação da altura dos encostos

SNR - Industry

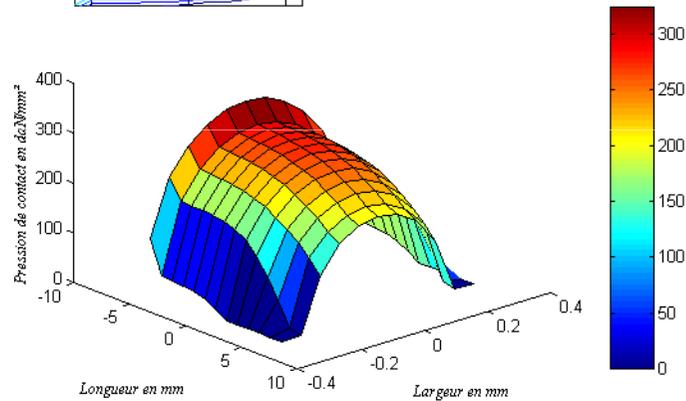




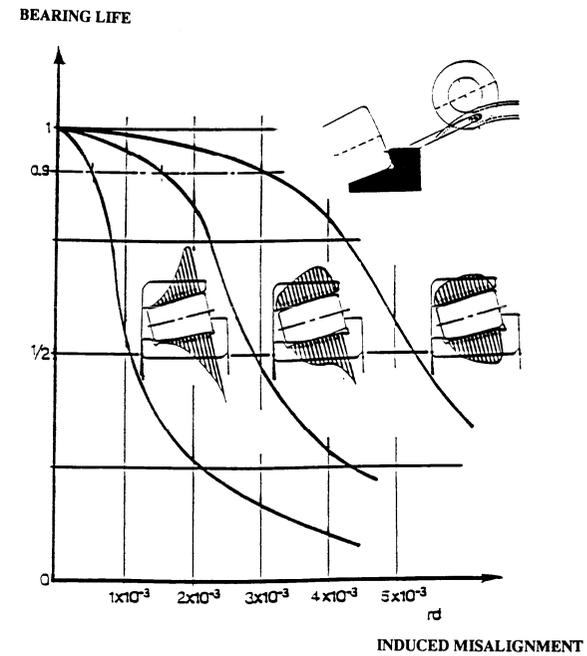
Pressão de contato:



Pressão de contato
corpos rolantes/pista



*Exemplo de cálculo de esforços para um
rolamento de rolos cônicos
sobrecargas estão presentes
(efeito de bordas)*



Definição das correções do perfil

SNR - Industry

