

3. Capacidade de Carga e Vida Útil

3.1 Vida Útil

Mesmo que os rolamentos estejam operando sob condições normais, as superfícies das pistas e dos corpos rolantes são constantemente submetidos a repetidas compressões, as quais causam, com o tempo, descascamento destas superfícies.

Este descascamento é em razão da fadiga do material e eventualmente irá causar a quebra do rolamento. A efetiva vida de um rolamento é usualmente definida em termos do número total de revoluções que um rolamento pode efetuar antes que ocorra o descascamento das superfícies das pistas ou dos corpos rolantes.

Outras causas de falha do rolamento são usualmente atribuídas a problemas tais como travamento, abrasivos, trincas, lascas, oxidação, etc. Entretanto, estas assim chamadas "causas" da quebra dos rolamentos são usualmente causadas pela instalação incorreta, ou manuseio inadequado, lubrificação insuficiente ou indevida, vedação incorreta ou seleção incorreta do rolamento. Desde que as "causas" conforme mencionadas acima possam ser evitadas mediante as devidas precauções e, portanto não sejam simples causas de fadiga, então podemos considerar o descascamento como o processo de fadiga natural do material.

3.2 Vida básica nominal e capacidade básica de carga dinâmica

Quando um grupo de rolamentos aparentemente idênticos estão sujeitos a cargas e condições de operação idênticas irão exibir uma grande diversidade em sua durabilidade.

Esta disparidade de "vida" pode ser explicada pela diferença da fadiga do próprio material do rolamento. Esta disparidade é considerada estatisticamente quando se calcula a vida do rolamento, e a vida básica nominal é definida como segue.

A vida básica nominal é baseada num modelo estatístico com 90% de confiabilidade, no qual é definido como o número total de revoluções que podem alcançar ou superar em 90% de um grupo de rolamentos idênticos sujeitos às mesmas condições de operação, antes que ocorra o descascamento devido a fadiga do material. Para rolamentos trabalhando em rotações constantes, a vida básica nominal (90% de confiabilidade) é expressa pelo número total de horas de operação.

A capacidade básica de carga dinâmica é uma expressão da capacidade de carga de um rolamento, baseado numa carga constante a qual o rolamento pode sustentar durante 1 milhão de revoluções (vida básica nominal). Para rolamentos radiais este valor é aplicado para cargas puramente radiais e para rolamentos axiais refere-se para cargas puramente axiais. Para estes são referenciados como capacidade básica de carga dinâmica radial (C_r) e capacidade básica de carga dinâmica axial (C_a).

Os valores de capacidade básica de carga dinâmica mostrados nas tabelas de rolamentos deste catálogo são para rolamentos construídos com materiais e técnicas de manufatura padrão da NTN.

A relação entre a vida nominal básica, a carga dinâmica equivalente e a carga no rolamento são dadas em fórmula.

$$\text{Para rolamentos de esferas: } L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^3 \dots\dots\dots(3.1)$$

$$\text{Para rolamentos de rolos: } L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^{10/3} \dots\dots\dots(3.2)$$

Onde,

- L_{10} : Vida nominal básica em 10^6 revoluções
- C : Capacidade de carga dinâmica, N {kgf}
- (C_r : rolamentos radiais, C_a : rolamentos axiais)
- P : Carga dinâmica equivalente, N {kgf}
- (P_r : rolamentos radiais, P_a : rolamentos axiais)
- n : velocidade de rotação, rpm

A relação entre velocidade de rotação n e fator de velocidade f_n , bem como a relação entre vida nominal básica L_{10h} e fator de vida f_n é demonstrada conforme **tabela 3.1** e **figura 3.1**.

Tabela 3.1 Correlação entre vida nominal básica do rolamento, fator de vida e fator de velocidade

Classificação	Rolamentos de esferas	Rolamentos de rolos
Vida básica nominal L_{10h}	$\frac{10^6}{60n} \left(\frac{C}{P}\right)^3 = 500 f_n^3$	$\frac{10^6}{60n} \left(\frac{C}{P}\right)^{10/3} = 500 f_n^{10/3}$
Fator de vida f_n	$f_n \frac{C}{P}$	$f_n \frac{C}{P}$
Fator de rotação f_n	$\left(\frac{33.3}{n}\right)^{1/3}$	$\left(\frac{33.3}{n}\right)^{3/10}$

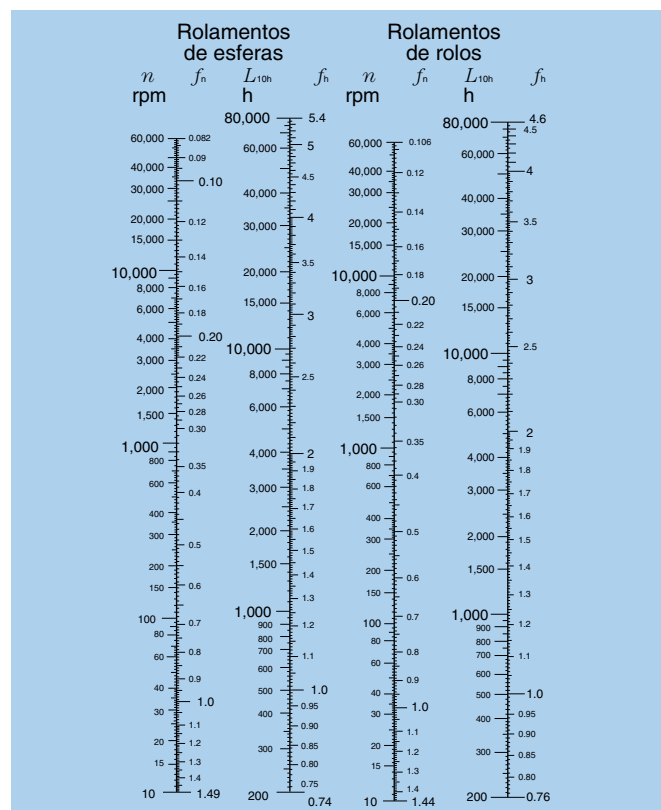


Fig. 3.1 Escala para vida nominal do rolamento

Quando vários rolamentos são incorporados a uma máquina ou equipamento como uma unidade completa, o rolamento desta unidade é considerada uma unidade completa quando se faz o cálculo dos rolamentos (formula 3.3).

$$L = \frac{1}{\left(\frac{1}{L_1^e} + \frac{1}{L_2^e} + \dots + \frac{1}{L_n^e}\right)^{1/e}} \dots\dots\dots (3.3)$$

Onde:

- L : Vida nominal de toda a unidade, h
- $L_1, L_2 \dots L_n$: Vida nominal dos rolamentos, individualmente 1, 2, ..., n, h
- $e = 10/9$Para rolamentos de esferas
- $e = 9/8$Para rolamentos de rolos

Quando as condições de carga variam em intervalos regulares, calcula-se a vida conforme formula (3.4), abaixo:

$$L_m = \left(\frac{\Phi_1}{L_1} + \frac{\Phi_2}{L_2} + \dots + \frac{\Phi_j}{L_j}\right)^{-1} \dots\dots\dots (3.4)$$

Onde:

- L_m : Vida total do rolamento
- Φ_j : Freqüência da condição de carga individual ($\sum \Phi_j = 1$)
- L_j : Vida básica nominal de cada rolamento

Se a carga equivalente P e a velocidade de rotação n são condições operacionais do rolamento, a carga dinâmica nominal básica C , que satisfaz a vida requerida para o rolamento, pode ser determinada conforme **tabela 3.1** e fórmula (3.5). Rolamentos que satisfazem à condição C requerida podem ser selecionados de acordo com a tabela dimensional de rolamentos deste catálogo.

$$C = P \frac{f_n}{f_n} \dots\dots\dots (3.5)$$

3.3 Ajuste da vida nominal

A vida nominal básica (fator de 90% de confiabilidade) pode ser calculada com o uso das formulas mencionadas anteriormente na seção 3.2. Entretanto, em algumas aplicações se faz necessário um fator de vida nominal com confiabilidade superior a 90%. Para satisfazer estes requerimentos, pode-se prolongar a vida dos rolamentos com o uso de materiais especiais ou com técnicas de fabricação especial. Em algumas situações, a vida do rolamento pode ser afetada devido às condições de operação como lubrificação, temperatura e velocidade de rotação do rolamento.

A vida nominal ajustada é determinada conforme a fórmula (3.6), abaixo:

$$L_{na} = a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot L_{10} \dots\dots\dots (3.6)$$

Onde:

- L_{na} : Vida nominal ajustada em milhões de revoluções (10^6)
- a_1 : Fator para confiabilidade
- a_2 : Fator de ajuste de vida para o material
- a_3 : Fator para condições de operação

3.3.1 Fator de confiabilidade a_1

O Fator de confiabilidade a_1 é dado conforme **tabela 3.2**, para confiabilidade igual ou maior que 90%.

3.3.2 Fator de ajuste da vida para material a_2

As características do rolamento referentes à vida, variam de acordo com o material, qualidade do material, e se é empregado um processo especial de fabricação do rolamento. Neste caso, a vida é ajustada de acordo com o fator a_2 .

As capacidades de carga dinâmica listadas neste catálogo são baseadas nos padrões de materiais e processo de fabricação da NTN. Neste caso, o fator de ajuste $a_2 = 1$. Para cálculo de materiais e processos especiais de produção especialmente melhorados pode ser usado $a_2 > 1$. Para mais esclarecimentos, favor contatar a Engenharia da NTN. Para rolamentos de alta liga de carbono cromo com tratamento térmico convencional, quando utilizadas à temperaturas acima de 120° C por um extenso período, podem ocorrer mudanças dimensionais significativas. Para um meio onde a temperatura de operação é muito alta, a NTN dispõe de um rolamento termo-estabilizado da série TS; com a aplicação de um tratamento especial, as dimensões do rolamento não se alteram. Entretanto, o rolamento torna-se menos rígido, afetando a vida útil. Para possibilitar o ajuste, multiplica-se a vida pelos fatores da **tabela 3.3**.

Tabela 3.2 Fator de confiabilidade a_1

Confiabilidade %	L_n	Fator de confiabilidade a_1
90	L_{10}	1.00
95	L_5	0.62
96	L_4	0.53
97	L_3	0.44
98	L_2	0.33
99	L_1	0.21

Tabela 3.3 Tratamento para estabilização dimensional

Código	Temperatura máxima de operação (°C)	Fator para o material a_2
TS2	160	1.00
TS3	200	0.73
TS4	250	0.48

3.3.3 Fator de Condição de Operação a_3

O fator de condição de operação a_3 é usado para compensar falhas nas condições de lubrificação devido a aumentos de temperatura, de rotação, deterioração do lubrificante ou contaminação por material externo.

Geralmente quando as condições de lubrificação são satisfatórias, o valor do fator a_3 é adotado como 1. Quando as condições de lubrificação são excepcionalmente favoráveis e todas as outras são normais, a_3 pode ter um valor maior que 1. Entretanto a_3 pode ter um valor menor que 1 nos seguintes casos:

- A viscosidade dinâmica do óleo lubrificante é muito baixa para a temperatura de operação (13 mm²/s ou menos para rolamentos de esferas, 20 mm²/s para rolamentos de rolos).
- A rotação é particularmente lenta (se a multiplicação da rotação n em rpm e o diâmetro do eixo D_{pw} em mm é $D_{pw} \cdot n < 10,000$).
- A temperatura de operação do rolamento é demasiada alta.
Se a temperatura de operação do rolamento aumenta, a dureza do material do rolamento diminui, reduzindo a vida. A vida é ajustada multiplicando-se pelos valores obtidos na **figura 3.2**. Entretanto isto não se aplica a rolamentos que foram tratados para estabilização dimensional.
- Lubrificante contaminado com material estranho ou poeira.
Em caso de condições de operação especiais, consulte a engenharia da NTN.
Usar $a_2 > 1$ Para rolamentos especiais feitos de materiais melhorados produzidos por métodos especiais de manufatura, é usado $a_2 \times a_3 < 1$ se as condições de lubrificação não forem favoráveis.

Quando uma carga muito alta é aplicada, deformação plástica pode ser produzida nas superfícies de contatos entre as pistas e os corpos rolantes. A fórmula para determinar a vida básica nominal (3.1, 3.2 e 3.6) não se aplica se P_r excede tanto C_{or} (capacidade de carga estática) como $0.5 C_r$ para rolamentos radiais, ou se P_a excede $0.5 C_a$ para rolamentos axiais.

3.4 Aplicações em máquinas e vida requerida

Quando se faz a seleção de um rolamento, é essencial que a vida requerida do rolamento seja estabelecida em relação às condições de operação. A vida requerida do rolamento é usualmente determinada pelo tipo de máquina no qual o rolamento será utilizado, a duração do serviço e a confiabilidade operacional requerida. Uma orientação geral para os requisitos do critério de vida é mostrada na **tabela 3.4**. Quando se determina o tamanho do rolamento, a fadiga do rolamento é um importante fator, entretanto, juntamente com a vida do rolamento, deve-se considerar também a rigidez e a solidez do eixo e do alojamento.

3.5 Capacidade básica de carga estática

Quando os rolamentos estacionários são submetidos a uma carga estática sofrem deformações parciais, porém permanentes nas superfícies de contato, ou seja, nos pontos de contato entre os corpos rolantes e as pistas. A magnitude da deformação aumenta na medida em que as cargas são aumentadas; se este incremento na carga excede certos limites, afeta negativamente a operação uniforme do rolamento.

Foi verificado através da experiência que uma deformação permanente de 0.0001 vezes o diâmetro do corpo rolante, no ponto de maior esforço de contato entre as pistas e o corpo rolante, é tolerável sem causar efeitos negativos para a eficiência de giro.

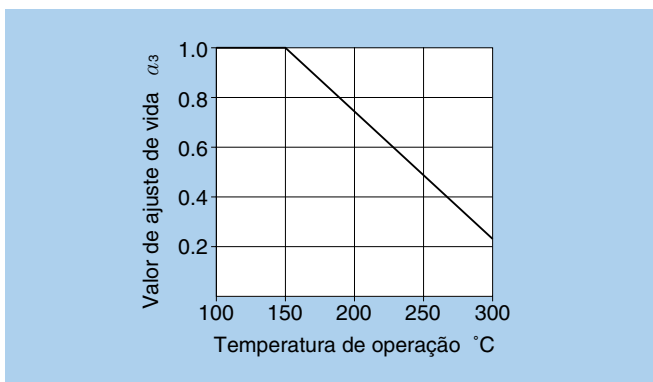


Fig. 3.2 Valor de ajuste de vida para temperatura de operação

Tabela 3.4 Aplicação em máquinas e vida requerida

Classificação do serviço	Vida requerida L_{10h} e aplicação em máquinas $\times 10^3$ h				
	~4	4~12	12~30	30~60	60~
Máquinas usadas por curtos períodos de tempo ou usadas ocasionalmente	<ul style="list-style-type: none"> • Ferramentas manuais elétricas • Eletrodomésticos 	<ul style="list-style-type: none"> • Máquinas agrícolas • Equipamentos para escritório 			
Período curto ou intermitente, mas com requerimentos de alta confiabilidade.	<ul style="list-style-type: none"> • Instrumentos de aplicação médica • Instrumentos de medição 	<ul style="list-style-type: none"> • Motores para equipamentos de ar-condicionado • Equipamentos de medição • Elevadores • Guindastes 	<ul style="list-style-type: none"> • Guindastes(talhas) 		
Máquinas de uso não constante, mas usadas por períodos longos	<ul style="list-style-type: none"> • Automóveis • Veículos de 2 rodas 	<ul style="list-style-type: none"> • Motores pequenos • Ônibus/caminhões • Impulsores • Máquinas para carpintaria 	<ul style="list-style-type: none"> • Fusos de máquinas • Motores industriais • Trituradores • Peneiras vibradoras 	<ul style="list-style-type: none"> • Redutores • Máquinas para borracha/plástico • Rolos de calandras • Máquinas de impressão 	
Máquinas de uso contínuo, mais do que 8 horas por dia		<ul style="list-style-type: none"> • Laminações • Escada rolante • Transportadores • Centrifugas 	<ul style="list-style-type: none"> • Ar-condicionado • Eixos de veículos ferroviários • Motores grandes • Bombas compressoras 	<ul style="list-style-type: none"> • Eixos para locomotivas • Motores de tração • Guindastes • Volante de prensas 	<ul style="list-style-type: none"> • Máquinas de papel • Equipamentos para propulsão marítima
Operação contínua de 24 horas, sem interrupções					<ul style="list-style-type: none"> • Máquinas para suprimentos de água • Bombas/Ventiladores para minas • Equipamentos para geração de energia

A capacidade básica de carga estática se refere a um limite fixo de carga estática na qual ocorre uma quantidade específica de deformação permanente. Se refere a cargas puramente radiais para rolamentos radiais e as cargas puramente axiais para rolamentos axiais. Os valores máximos de carga aplicada para esforços de contato que ocorrem nos pontos de contato do corpo rolante e da pista são fornecidos a seguir.

Para rolamentos de esferas	4,200 MPa {428kgf/mm ² }
Para rolamentos autocompensadores de esferas	4,600 MPa {469kgf/mm ² }
Para rolamentos de rolos	4,000 MPa {408kgf/mm ² }

Com relação à capacidade de carga estática radial para rolamentos radiais e a capacidade de carga estática axial para rolamentos axiais, são expressos por C_{or} ou C_{oa} respectivamente e constam da tabela dimensional deste catálogo.

3.6 Carga estática equivalente permissível

Geralmente, a carga estática equivalente que se pode permitir (veja página. A-25) está limitada pela capacidade básica de carga estática, como se assinalou na **seção 3.5**. Entretanto, em função dos requerimentos relacionados com o atrito e a operação uniforme, estes limites podem ser maiores ou menores que a capacidade básica de carga estática.

Geralmente é determinada pelo fator de segurança. Veja **Tabela 3.5** e fórmula (3.7)

$$S_0 = C_0 / P_0 \dots \dots \dots (3.7)$$

Onde:

- S_0 : Fator de segurança
- C_0 : Capacidade básica de carga estática, N {kgf}
(rolamentos radiais: C_{or} , rolamentos axiais: C_{oa})
- P_0 : Carga estática equivalente, N {kgf}
(radial: P_{or} , axial: C_{oa})

Tabela 3.5 Valores mínimos de segurança S_0

Condições de operação	Rolamentos de esferas	Rolamentos de rolos
Precisão rotacional alta	2	3
Precisão rotacional normal (aplicações universais)	1	1.5
Permite leve diminuição da precisão rotacional (baixas rotações, altas cargas)	0.5	1

- Nota 1: Para rolamentos axiais de rolos esféricos, o valor mínimo $S_0=4$.
 2: Para rolamentos de agulhas, o valor mínimo de $S_0=3$.
 3: Na presença de vibrações e/ou cargas com choques, é necessário incluir um fator de carga ao valor de P_0 máximo baseado na carga de choque.
 4: Se altas cargas axiais são aplicadas em rolamentos rígidos de esferas ou rolamentos de contato angular, o contato puntiforme (elíptico) pode exceder a superfície da pista. Para maiores informações contatar a Engenharia da NTN.