



Elementos de Máquinas II

Mancais de Rolamentos

Professor MSc. Diego P. A. Peña

Universidade Federal da Paraíba
João Pessoa - PB, Brasil

Sumário

Introdução

Tipos de Mancais

Seríe

Número de Identificação

Seleção do Rolamento

Vida do Mancal

Cargas Combinadas

Referências



Mancal em Caixa de redução



Mancal bipartido



Mancal inteiriço



Rolamento de esferas com fila dupla



Rolamentos

Introdução



- ▶ **Mancal de contato com rolamento**
Mancais antiatribito
Mancais de Rolamento
- ▶ A Carga principal é transferida por elementos em **contato rolante** em lugar de contato de deslizamento.

- ▶ O atrito de partida é certa de 2x o de funcionamento.
- ▶ Carga, velocidade, viscosidade de operação do lubrificante.
- ▶ O ponto importante é projetar um grupo de elementos que compõem um mancal de rolamento.

Introdução

Considerações:

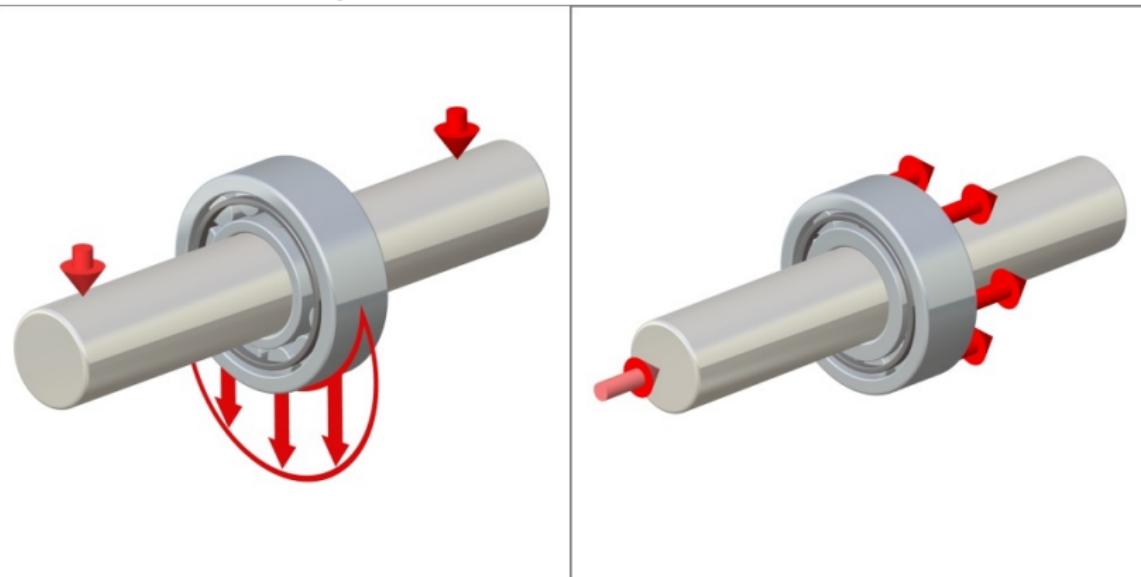
- ▶ Dimensional
- ▶ Cargas
- ▶ Vida satisfatória
- ▶ Carregamento de fadiga
- ▶ Arito
- ▶ Calor
- ▶ Resistência à corrosão
- ▶ Intempéries ambientais
- ▶ Propriedades do material
- ▶ Lubrificação
- ▶ Tolerâncias de Usinagem
- ▶ Uso
- ▶ Custo

Vantagens

- ▶ Elevada confiabilidade com o mínimo de manutenção.
- ▶ Mínima lubrificação requerida. O lubrificante pode ser vedado pela "vida útil" do mancal.
- ▶ Adequado para operação em baixa velocidade.
- ▶ Baixo atrito de partida e baixa perda de potência devido ao arraste por atrito.
- ▶ Pode suportar prontamente cargas radiais, axiais, ou a combinação destas.
- ▶ Necessita de pouco espaço axial.
- ▶ Permutabilidade quase universal entre fabricantes devido à ampla padronização de tamanhos e rígido controle de tolerâncias.
- ▶ Pode ser pré-carregado para eliminar folgas internas, melhorar a vida em fadiga ou elevar a rigidez do mancal.
- ▶ O aumento do ruído em operação alerta para falha iminente

Introdução

- ▶ **Mancais** são fabricados para receber cargas radiais puras, axiais puras ou combinação dos dois tipos.
- ▶ Transferem movimento, isto é, suportam e guiam componentes que giram um em relação ao outro;
- ▶ Transmitem forças.



Carga Radial Pura

Carga Axial Pura

Introdução: Elementos de um rolamento



- ▶ Os anéis feitos de aço devem ser temperados.
- ▶ O aço padrão para as arruelas e os anéis do rolamento é 100Cr6, o qual contém aproximadamente 1% de carbono e 1,5% de cromo.
- ▶ Podem ser empregados aços inoxidáveis ou aços para altas temperaturas.

Introdução



Elementos Rolantes

- ▶ São bolas, rolos, cones, esferas ou agulhas.
- ▶ Geralmente feitos de uma liga de aço cromado especial de alta pureza. Materiais especiais como cerâmica e plásticos também são usados.
- ▶ Os elementos rolantes rolam nas pistas de rolamento especialmente formadas por anéis ou discos e são mantidos separados e guiados pela gaiola.



Gaiola

- ▶ É responsável por manter os elementos rolantes equidistantes e guiá-los.
- ▶ Aço, latão e plástico. As de metal sólido podem ser produzidas por usinagem. As de chapa metálica são prensadas. As de Plástico podem ser usinadas a partir de plástico sólido ou moldadas por injeção.

Introdução

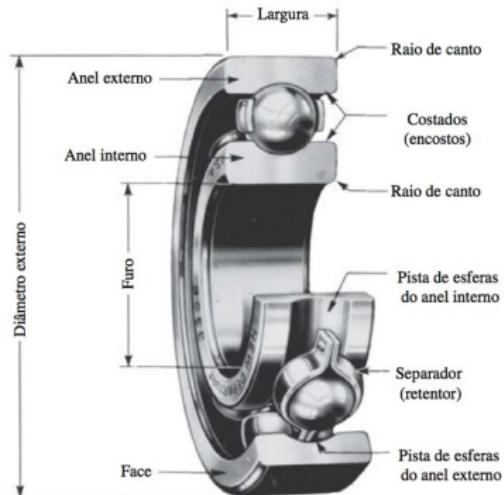


Figura 11-1 Nomenclatura de um mancal de esferas.

(General Motors Corp. Reproduzida com autorização, GM Media Archives.)

- ▶ Em mancais mais econômicos, o separador é omitido, apesar da importante função de evitar o contato por roçamento.
- ▶ Os fabricantes fornecem catálogos/manuais com todo o detalhamento dos elementos. (NSK, SKF, TIMKEN, NTN, RBC, FRM,...)

Tipos de Mancais

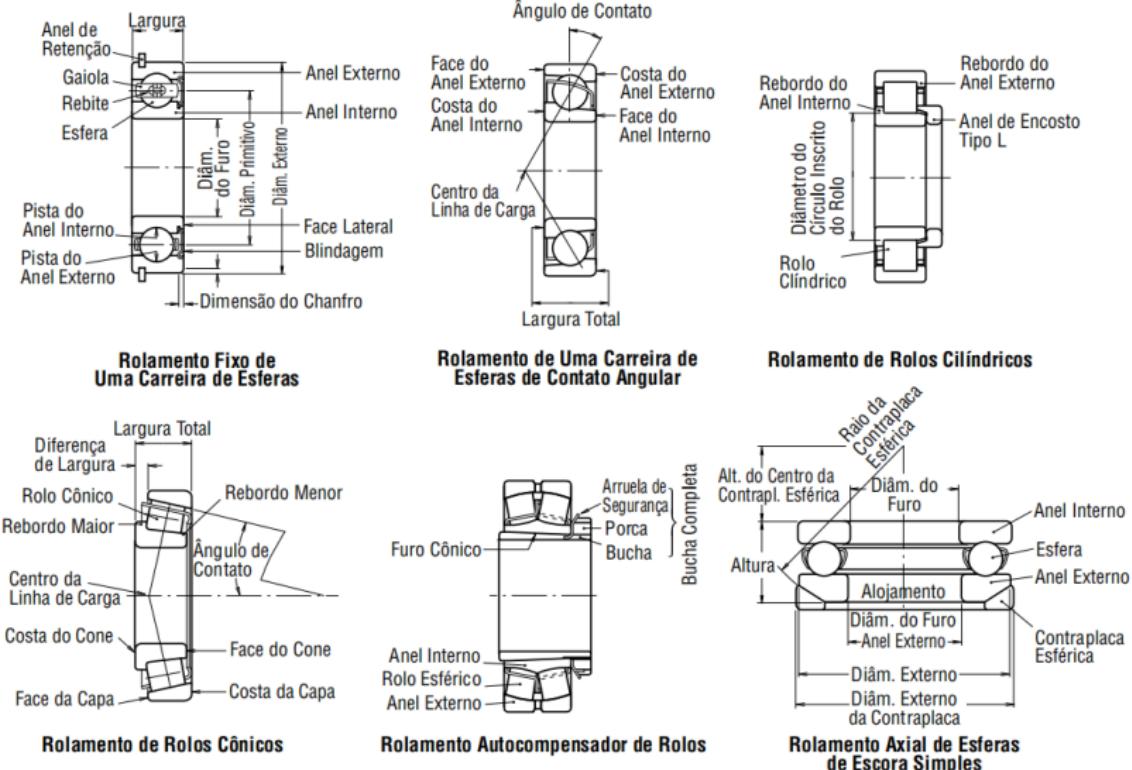


Fig. 1.1 Designação das Partes dos Rolamentos

Catálogo NSK

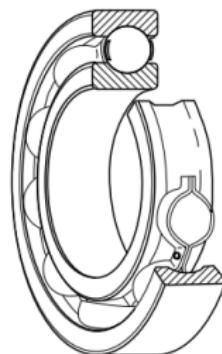
Tipos de Mancais

TABELA 11.1 Características de Mancal que Podem Influenciar a Seleção do Tipo de Mancal¹

Tipo de Mancal	Capacidade Radial	Capacidade Axial	Velocidade-Limite	Rigidez Radial	Rigidez Axial
Esferas de canal profundo	moderada	moderada — ambos os sentidos	alta	moderada	baixa
Esferas de capacidade máxima	moderada (mais)	moderada — um sentido	alta	moderada (mais)	baixa (mais)
Esferas de contato angular	moderada	moderada (mais) — um sentido	alta (menos)	moderada	moderada
Rolos cilíndricos	alta	nenhuma	moderada (mais)	alta	nenhuma
Rolos esféricos	alta	moderada — ambos os sentidos	moderada	alta (menos)	moderada
Rolos-agulha	moderada a alta	nenhuma	moderada a muito alta	moderada a alta	nenhuma
Rolos cônicos de uma carreira	alta (menos)	moderada (mais) — um sentido	moderada	alta (menos)	moderada
Rolos cônicos de duas carreiras	alta	moderada — ambos os sentidos	moderada	alta	moderada
Rolos cônicos de quatro carreiras	alta (mais)	alta — ambos os sentidos	moderada (menos)	alta (mais)	alta
Axial de esferas	nenhuma	alta — um sentido	moderada (menos)	nenhuma	alta
Axial de rolos	nenhuma	alta (mais) — um sentido	baixa	nenhuma	alta (mais)
Axial de rolos cônicos	apenas posicional	alta (mais) — um sentido	baixa	nenhuma	alta (mais)

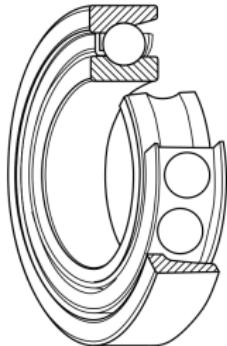
¹ Adaptado do catálogo de dados de mancais da Torrington.

Tipos de Mancais: Rolamentos Fixos de Uma Carreira de Esferas



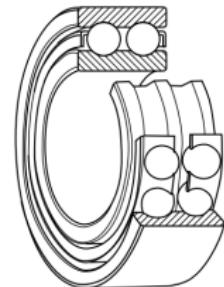
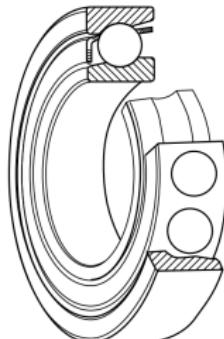
- ▶ É o tipo mais representativo e com extensa aplicação.
- ▶ Pistas com perfil lateral em arco, com raio ligeiramente maior que o raio das esferas.
- ▶ Carga radial e permite o apoio da carga axial em ambos os sentidos.
- ▶ O torque de atrito é pequeno, sendo o mais adequado para aplicações que requerem baixo ruído e vibração, e em locais de alta velocidade de rotação.
- ▶ Tipos: aberto, blindados com placas de aço, vedados com proteção de borracha, e os com anel de retenção no anel externo.
- ▶ Geralmente, as gaiolas prensadas de aço.

Tipos de Mancais: Rolamentos de Magneto



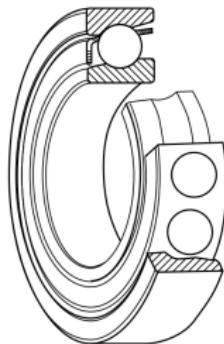
- ▶ O canal da pista do anel interno é um pouco menos profundo que o do rolamento fixo de esferas, e o anel externo apresenta rebordo em apenas um dos lados.
- ▶ Consequentemente, o anel externo é separável, sendo conveniente para a instalação do rolamento.
- ▶ Normalmente, duas peças deste rolamento são contrapostas nas aplicações. São rolamentos pequenos com diâmetro do furo de 4 a 20 mm, usados principalmente em pequenos geradores (Magneto), giroscópios e instrumentos indicadores.
- ▶ Geralmente, as gaiolas utilizadas são as prensadas de latão.

Tipos de Mancais: Rolamentos de Esferas de Contato Angular: 1 e 2 carreiras



- ▶ Carga radial e num único sentido a carga axial.
- ▶ As esferas e os anéis interno e externo formam ângulos de contato de 15°, 25°, 30° ou 40°.
- ▶ Quanto maior o ângulo de contato maior será a capacidade de carga axial, e quanto menor o ângulo de contato melhor será para altas rotações.
- ▶ Normalmente, duas peças do rolamento são contrapostas e utilizadas para o ajuste da folga.
- ▶ Geralmente, as gaiolas são prensadas de aço, mas para os rolamentos de alta precisão com ângulo de contato menor que 30° são utilizadas, principalmente, as gaiolas de poliamida.
- ▶ Os rolamentos de duas carreiras de esferas de contato angular são 2 rolamentos com combinação costa a costa e têm a capacidade de apoiar a carga axial em ambos os sentidos.

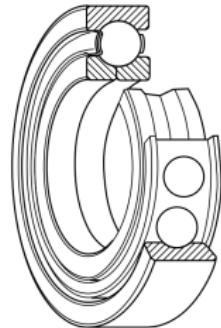
Tipos de Mancais: Rolamentos Combinados



- ▶ É a Formação do jogo de corpo único com duas ou mais peças de rolamentos radiais.
- ▶ Normalmente, entre os rolamentos de esferas de contato angular e entre os rolamentos de rolos cônicos.
- ▶ Tipos de combinação:
 - ▶ Combinação face a face (tipo DF), em que os anéis externos são unidos pelas faces;
 - ▶ Combinação costa a costa (tipo DB), em que os anéis são unidos pelas costas;
 - ▶ Combinação tandem (tipo DT), em que os anéis estão no mesmo sentido.
- ▶ Aplicação:

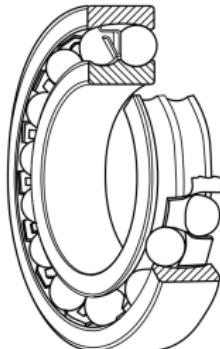
DF e DB permitem o apoio da carga radial, e em ambos os sentidos a carga axial.
DT são usados em casos de cargas axiais maiores num único sentido.

Tipos de Mancais: Rolamentos de Esferas de Quatro Pontos de Contato



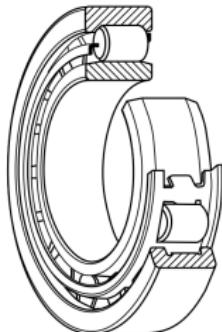
- ▶ Possuem o anel interno bipartido e são rolamentos de uma carreira de esferas de contato angular com os anéis internos e externos separáveis.
- ▶ Permitem apoiar a carga axial em ambos os sentidos com uma única peça.
- ▶ O ângulo de contato formado pela esfera e os anéis interno e externo é de 35° .
- ▶ Com uma peça deste rolamento pode-se substituir a combinação face a face ou costa a costa do rolamento de esferas de contato angular.
- ▶ Geralmente, as gaiolas utilizadas são usinadas de latão.

Tipos de Mancais: Rolamentos Autocompensadores de Esferas



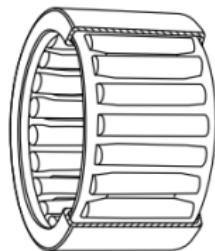
- ▶ O anel interno possui duas pistas e a pista do anel externo é esférica.
- ▶ O centro do raio que forma esta superfície esférica é coincidente ao centro do rolamento; consequentemente, o anel interno, as esferas e a gaiola inclinam-se livremente em relação ao anel externo.
- ▶ Os erros de alinhamento que ocorrem devido aos casos como o do desvio na usinagem do eixo e alojamento e as deficiências na instalação são corrigidos automaticamente.
- ▶ Além disso, existem também os rolamentos de furo cônico, que são fixados através de buchas.

Tipos de Mancais: Rolamentos de Rolos Cilíndricos



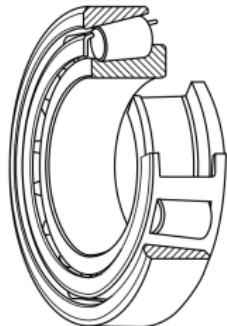
- ▶ Possuem uma grande capacidade de carga, principalmente apoiando a carga radial.
- ▶ Com atrito reduzido, são adequados para altas rotações.
- ▶ Em função da existência ou não de rebordos nos anéis, são classificados:
1c: NU, NJ, NUP, N e NF
2c: NNU e NN
- ▶ O anel interno e o anel externo são separáveis em todos os tipos.
- ▶ Os que não têm o rebordo no anel interno ou no anel externo, por permitirem o movimento relativo entre o anel interno e o anel externo na direção axial, são utilizados como rolamentos lado livre.
- ▶ Os que possuem rebordos nos dois lados de um dos anéis, interno ou externo, e um rebordo no outro anel, podem apoiar a carga axial de certo grau em um sentido.
- ▶ Os rolamentos de duas carreiras de rolos cilíndricos têm uma alta rigidez em relação à carga radial, e são usados principalmente em fusos de máquinas-ferramentas.

Tipos de Mancais: Rolamentos de Agulha



- ▶ São inseridos um grande número de rolos finos e alongados com comprimento de 3 a 10 vezes o diâmetro.
- ▶ Com a reduzida proporção do diâmetro externo em relação ao diâmetro do círculo inscrito dos rolos, possuem capacidade de carga radial comparativamente maior.
- ▶ Tipos: Anel externo estampado em chapa de aço especial, os sólidos de anéis usinados, as gaiolas com os rolos e sem anéis, os rolos comando, etc.
- ▶ Com anel interno e sem anel interno, ou com gaiola e sem gaiola.
- ▶ Nos rolamentos com gaiola são usadas, principalmente, as gaiolas prensadas de aço.

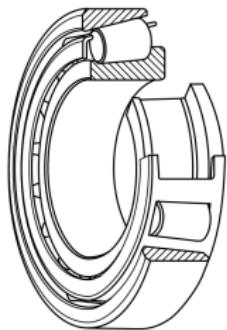
Tipos de Mancais: Rolamentos de Rolos Cônicos



- ▶ Os rolos cônicos são guiados pelo rebordo maior do anel interno.
- ▶ De grande capacidade de carga, permitem o apoio da carga radial e num único sentido a carga axial.

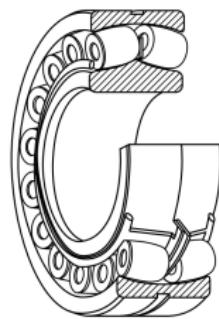
- ▶ A série HR, com os rolos numericamente e dimensionalmente aumentados, possui uma alta capacidade de carga.
- ▶ Em geral, igualmente ao rolamento de esferas de contato angular, duas peças do rolamento são usadas contrapostas.
- ▶ Neste caso, em função do ajuste do espaçamento entre os anéis internos ou entre os anéis externos na direção axial, permite-se selecionar a folga interna adequada.

Tipos de Mancais: Rolamentos de Rolos Cônicos



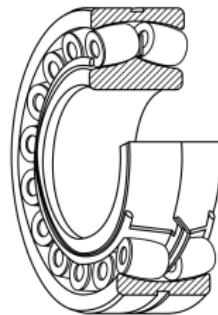
- ▶ O anel interno (cone) e o anel externo (capa) podem ser instalados independentemente por serem separáveis.
- ▶ Conforme o ângulo de contato estão classificados em: ângulo normal, ângulo intermediário e ângulo grande.
- ▶ Na classificação pelo número de carreiras, há também os rolamentos de duas e de quatro carreiras de rolos cônicos.
- ▶ Geralmente, as gaiolas utilizadas são as prensadas de aço.

Tipos de Mancais: Rolamentos Autocompensadores de Rolos



- ▶ Rolamentos formados pelo anel interno com duas pistas, anel externo com pista esférica e os rolos com a superfície de rolagem esférica. Devido ao centro da pista esférica do anel externo ser coincidente ao centro do rolamento, permite o autoalinhamento como os rolamentos autocompensadores de esferas.
- ▶ Consequentemente, quando houver erros de alinhamento em eixos e alojamentos ou flexão do eixo, são automaticamente ajustados, fazendo com que não ocorram cargas anormais no rolamento.

Tipos de Mancais: Rolamentos Autocompensadores de Rolos

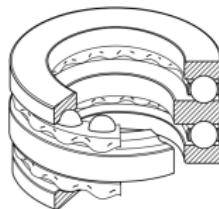


- ▶ Os rolamentos autocompensadores de rolos permitem o apoio da carga radial e em ambos os sentidos a carga axial.
- ▶ A capacidade de carga radial é grande e são adequados para aplicações com cargas pesadas e cargas de choque.
- ▶ Os rolamentos com furo cônico podem ser instalados diretamente no eixo cônico ou podem ser instalados no eixo cilíndrico pela utilização das buchas de fixação ou de desmontagem.
- ▶ As gaiolas normalmente utilizadas são as prensadas de aço e as usinadas de latão.

Tipos de Mancais: Rolamentos Axiais de Esferas de Escora Simples



Simples



Dupla

- ▶ Os rolamentos axiais de esferas são constituídos por anéis em configuração de arruelas com canal e gaiolas com as esferas embutidas.
- ▶ O anel a ser instalado no eixo é denominado anel interno, e o anel a ser instalado no alojamento é denominado de anel externo.
- ▶ Suportam a carga axial em um sentido.

-
- ▶ Nos rolamentos de escora dupla, o anel central (anel intermediário) é o instalado no eixo.
 - ▶ Suportam a carga axial em ambos os sentidos.
 - ▶ No intuito de minimizar a influência de desvios na instalação, existem também os rolamentos axiais de esferas com contraplaca esférica no anel externo.
 - ▶ Nos rolamentos pequenos são usadas, principalmente, as gaiolas prensadas de aço e nos rolamentos grandes as gaiolas usinadas.

Tipos de Mancais: Rolamentos Axiais Autocompensadores de Rolos



- ▶ Estes rolamentos têm uma pista esférica no assento do anel externo e rolos trapezoidais dispostos obliquamente na superfície de rolagem.
- ▶ O rolamento possui autoalinhamento em virtude da pista do anel externo ser esférica.
- ▶ A capacidade de carga axial é elevadíssima e quando estiver sob carga axial permite a aplicação de cargas radiais moderadas.
- ▶ As gaiolas utilizadas são as prensadas de aço ou as usinadas de latão.

Séries do mancal

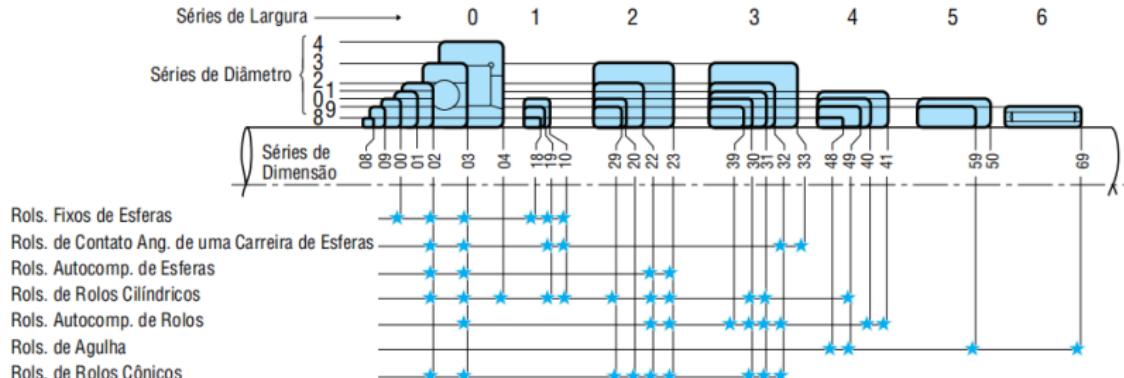


Fig. 3.1 Séries de Dimensão dos Rolamentos Radiais

Tipo de Rolamento	Cap. de Carga Radial				Cap. de Carga Axial			
	1	2	3	4	1	2	3	4
Fixo de Uma Carreira de Esferas	—	—	—	—	—	—	—	—
Contato Angular de Uma Carreira de Esferas	—	—	—	—	—	—	—	—
Rolos Cilíndricos ⁽¹⁾	—	—	—	—	—	—	—	—
Rolos Cônicos	—	—	—	—	—	—	—	—
Autocompensador de Rolos	—	—	—	—	—	—	—	—

Nota⁽¹⁾) Os rolamentos de rolos cilíndricos com rebordos possuem certo grau de capacidade de carga axial.

Fig. 3.2 Comparação das Capacidades de Cargas pelos Tipos de Rolamentos

Tipo de Rolamento	Velocidade Permissível Relativa				
	1	4	7	10	
Fixos de Esferas	—	—	—	—	—
Contato Angular de Esferas	—	—	—	—	—
Rolos Cilíndricos	—	—	—	—	—
Rolos Agulha	—	—	—	—	—
Rolos Cônicos	—	—	—	—	—
Autocompensadores de Rolos	—	—	—	—	—
Axiais de Esferas	—	—	—	—	—

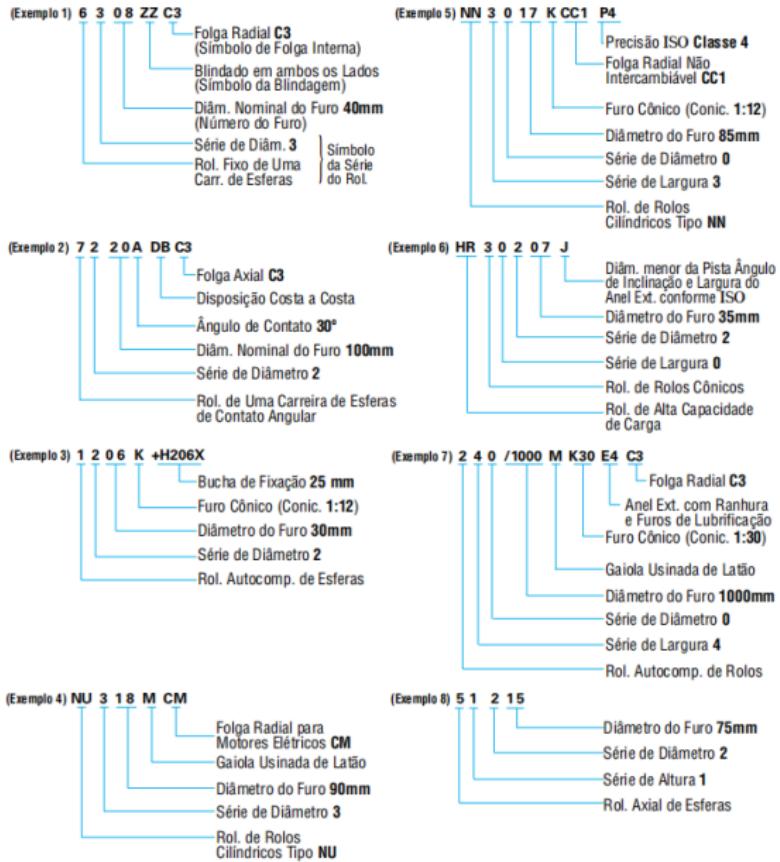
Obs. — Lubrificação em banho de óleo.
— Com providências especiais nos rolamentos e conjugados.

Fig. 3.3 Comparação do Limite de Rotação em Função dos Tipos de Rolamentos

Número de Identificação

- ▶ Designa o tipo de rolamento, dimensões principais, precisão dimensional, de giro, folgas e outras especificações.
- ▶ É constituído pelo número básico e símbolos suplementares.
- ▶ São regulamentados pela **JIS B 1513 Número de Identificação dos Rolamentos** e, eventualmente, símbolos suplementares dos fabricantes.

Número de Identificação



Número de Identificação

Tabela 7.5 Símbolos das Séries de Rolamentos

Tipos de Rolamento	Símbolos das Séries de Rolamentos	Símbolos de Tipo	Símbolos de Dimensão		Tipos de Rolamento	Símbolos das Séries de Rolamentos	Símbolos de Tipo	Símbolos de Dimensão	
			Símbolos de Largura	Símbolos de Diâmetro				Símbolos de Largura ou Altura	Símbolos de Diâmetro
Rodamientos Fixos de Uma Carreira de Esferas	68	6	(1)	8	Rodamentos de Duas Carreiras de Rolos Cilíndricos	NNU49	NNU	4	9
	69	6	(1)	9		NN30	NN	3	0
	60	6	(1)	0					
	62	6	(0)	2					
	63	6	(0)	3					
Rodamentos de Uma Carreira de Esferas de Contato Angular	79	7	(1)	9	Rodamentos de Agulha	NA48	NA	4	8
	70	7	(1)	0		NA49	NA	4	9
	72	7	(0)	2		NA59	NA	5	9
	73	7	(0)	3		NA69	NA	6	9
Rodamentos Autocompensadores de Esferas	12	1	(0)	2		329	3	2	9
	13	1	(0)	3		320	3	2	0
	22	(1)	2	2		330	3	3	0
	23	(1)	2	3		331	3	3	1
	NU10	NU	1	0		302	3	0	2
Rodamentos de Uma Carreira de Rolos Cilíndricos	NU2	NU	(0)	2		322	3	2	2
	NU22	NU	2	2		332	3	3	2
	NU3	NU	(0)	3		303	3	0	3
	NU23	NU	2	3		323	3	2	3
	NU4	NU	(0)	4					
Rodamentos de Uma Carreira de Rolos	NJ2	NJ	(0)	2	Rodamentos de Rolos Cónicos	230	2	3	0
	NJ22	NJ	2	2		231	2	3	1
	NJ3	NJ	(0)	3		222	2	2	2
	NJ23	NJ	2	3		232	2	3	2
	NJ4	NJ	(0)	4		213 ⁽ⁱ⁾	2	0	3
Rodamentos de Uma Carreira de Esferas de Assento Plano	NUP2	NUP	(0)	2		223	2	2	3
	NUP22	NUP	2	2					
	NUP3	NUP	(0)	3	Rodamentos Axiais de Esferas de Assento Plano	511	5	1	1
	NUP23	NUP	2	3		512	5	1	2
	NUP4	NUP	(0)	4		513	5	1	3
Rodamentos Axiais Auto-compensadores de Rolos	N10	N	1	0		514	5	1	4
	N2	N	(0)	2		522	5	2	2
	N3	N	(0)	3		523	5	2	3
	N4	N	(0)	4		524	5	2	4
	NF2	NF	(0)	2					
Rodamentos Axiais Auto-compensadores de Rolos	NF3	NF	(0)	3	Rodamentos Axiais Auto-compensadores de Rolos	292	2	9	2
	NF4	NF	(0)	4		293	2	9	3
						294	2	9	4

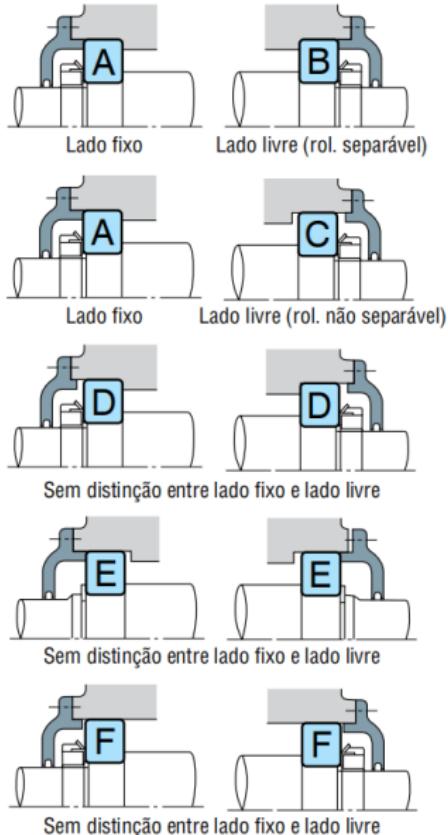
Nota ⁽ⁱ⁾ O símbolo da série de rolamento 213 deveria ser 203 pela série de largura; no entanto, o 213 é usado tradicionalmente.

Observação Os símbolos de largura entre () na coluna dos símbolos de largura são omitidos nas séries de rolamentos.

Número de Identificação

Número Básico				Símbolo de Projeto Interno		Símbolo de Material		Símbolo de Gaiola		Símbolos de Blindagem e Vedação	
Símb. das Séries de Rolamentos (¹)	Número do Furo	Símbolo do Ângulo de Contato		Símb.	Signif.	Símb.	Signif.	Símb.	Signif.	Símb.	Signif.
68	Rols. Fixos de Uma Carrinha de Esteras	1 Diam. Furo 1 mm	A Rols. de Est. de Contato Angular Ângulo de Contato 30°	A	Projeto Interno Diferente do Normal	g	Anéis e Corpos Rolantes em Aço Cementado	M	Gaiola Usinada de Latão	Z ZS	Blindagem em Um Lado
69		2		J	Diam. Menor da Pista, Ângulo de Inclinação e Largura do Anel Ext. do Rol. de Rols. Cónicos conforme ISO	h	Anéis e Corpos Rolantes em Aço Inoxidável			ZZ ZZS	Blindagem em Ambos os Lados
60		3									
:											
70	Rols. de Uma Carrinha de Esteras de Cont. Ang.	9		A5	Ângulo de Contato 25°						
72		10		B	Ângulo de Contato 40°						
73		12									
:		15									
12	Rolamentos Autoemp.	01									
13	Esteras	02									
22		03									
:		17									
NU10	Rolamentos de Rols. Cilíndricos	/22	22	C	Ângulo de Contato 15°	(Rols. de Alta Capac. de Carga.)					
NJ 2		/28	28								
N 3		/32	32								
NN 30											
:											
NA48	Rolamentos de Rols. Aguilha	04(²)	20	CA	Rolamentos de Rols. Cónicos						
NA49		05	25	CD	Omídia Ángulo de Contato < 17°						
NA69		06	30	EA	Rolamentos Autoemp. de Rols.						
:											
320	Rolamentos de Rols. Cónicos	88	440	C	Ángulo de Contato + 20°	Rolamentos de Rols. Cilíndricos					
322		92	460								
323	(¹)	96	480	D	Ángulo de Contato + 28°	Rols. Radiais e Axias Autoemp. de Rols					
:		500	500								
511	Rols. Axiais de Esteras	530	530								
512	de Assento Plano	560	560								
:											
292	Rols. Axiais Autoemp. de Rols.	/2 360	2 360								
293		/2 500	2 500								
294											
:											
HR(⁴) Alta Capacidade de Carregamento para Rolamentos de Rols. Cónicos e outros											
Os Símbolos e os Números estão conforme JIS(⁵)				Símbolo NSK		Símbolo NSK		Símbolo NSK		Símbolo NSK	
Gravado no Rolamento				Não Gravado no Rolamento		Não Gravado no Rolamento		Não Gravado no Rolamento		Não Gravado no Rolamento	

Disposição



ROLAMENTO A

- Fixos de Esferas
- Contato Angular de Esferas Combinados
- Contato Angular de Duas Carreiras de Esferas
- Autocomp. de Esferas
- Rolos Cilíndricos com Rebordos (tipos NH, NUP)
- Duas Carreiras de Rolos Cônicos
- Autocomp. de Rolos

ROLAMENTO B

- Rolos Cilíndricos (tipos NU, N)
- Agulha (tipo NA e outros)

ROLAMENTO C ⁽¹⁾

- Fixos de Esferas
- Contato Angular de Esferas Combinados (costa a costa)
- Contato Angular de Duas Carreiras de Esferas
- Autocomp. de Esferas
- Duas Carreiras de Rolos Cônicos (tipo KBE)
- Autocomp. de Rolos

ROLAMENTO D, E ⁽²⁾

- Contato Angular de Esferas
- Rolos Cônicos
- Magneto
- Rolos Cilíndricos (tipos NJ, NF)

ROLAMENTO F

- Fixos de Esferas
- Autocomp. de Esferas
- Autocomp. de Rolos

Notas: ⁽¹⁾ A fuga da dilatação ou contração do eixo na figura é indicada para ocorrer na superfície do diâmetro externo; no entanto, há casos em que a fuga ocorre na superfície do furo.

⁽²⁾ São usadas duas peças contrapostas do mesmo tipo de rolamento.

Fig. 4.1 Arranjos de Montagem e Tipo de Rolamento

Vida do Mancal

- ▶ Quando o rolamento funciona, surgem tensões tanto nos anéis quanto nos elementos rolantes (esferas e rolos).
- ▶ A curvatura dos elementos de contato na direção axial é diferente da radial, sendo tais equações bem complexas.
- ▶ Uma vez que o mancal opera em condições ideais, ou seja, é limpo, lubrificado, montado, selado e vedado, sem interferência de poeira e sujeira, operando em T ideal **falhará unicamente por fadiga**.
- ▶ Medidas de **Vida do Mancal**:
 - ▶ **Número de revoluções do anel interno (externo estacionário)** até a primeira evidência tangível de fadiga
 - ▶ **Número de horas de uso a uma velocidade angular padrão** até a primeira evidência tangível de fadiga

Vida do Mancal

- ▶ Deve-se lembrar que é uma variável estocástica, possuindo uma distribuição e parâmetros estatísticos.
- ▶ A falha por fadiga consiste em lascagem/escamamento das superfícies que suportam a carga.
- ▶ ABMA (*American Bearing Manufacturers Association*) estabelece o critério de falha como a **primeira evidência de fadiga**.
- ▶ A *Timken Company* utiliza o lascamento/escamamento ou formação de cavidades de uma área de $0,01pol^2/6,45mm^2$.



Fig. 5.1 Escamamento na Pista

Vida do Mancal

- ▶ A **vida nominal** é utilizada pela maioria dos fabricantes e pela ABMA como sendo: o número de revoluções (horas a V cte) que um lote de rolamentos com o mesmo número possa girar sem apresentar escamamento em função da fadiga em 90% destes rolamentos, ao serem girados individualmente nas mesmas condições de operação.
- ▶ **Vida nominal/Vida mínima/Vida L_{10} /Vida B_{10}**
- ▶ **Vida Mediana** é a vida do 50º percentil de um lote.
- ▶ A vida mediana está entre 4 e 5x a vida L_{10} .
- ▶ A vida nominal mais comum é 10^6 revoluções (SKF e NSK). Já a TIMKEN ($90 \cdot 10^6$)

Vida do Mancal

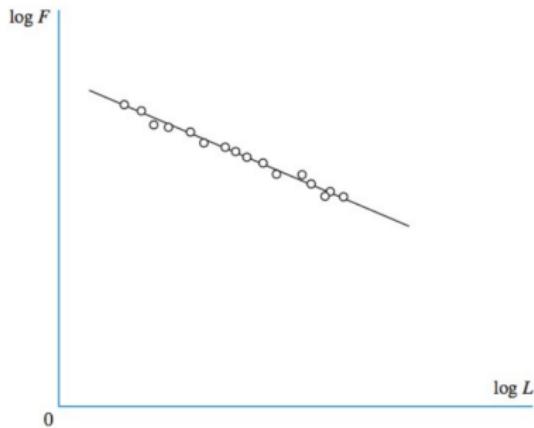


Figura 11-4 Curva log-log típica carga-vida de um mancal.

$$FL^{1/a} = \text{constante}$$

$$a = \begin{cases} \text{Esferas} & 3 \\ \text{Rolos} & 10/3 \end{cases}$$

- ▶ **Carga Estática nominal básica** é a carga que produz a deformação permanente igual a 0,00001 vezes o diâmetro do elemento rolante em qualquer ponto de contato na calha e no elemento rolante.
- ▶ Agrupando o resultado de testes de vários lotes, pode-se plotar em log-log a Carga F e a vida L_{10} .
- ▶ A **Capacidade de carga** é a carga radial que causa a falha de 10% de um lote na vida nominal (C_{10}).
- ▶ **Capacidade Básica de Carga Dinâmica** se a vida nominal é de 10^6 revoluções.
- ▶ É um valor de referência e não uma carga real a ser alcançada no rolamento.

Vida do Mancal

$$FL^{1/a} = \text{constante}$$

$$F_{Cat}L_{Cat}^{1/a} = F_{Pro}L_{Pro}^{1/a}$$

Denotando: $F_{Cat} = C$; $L_{Cat} = 10^6$; $F_{Pro} = P$ e $L_{Pro} = L$

$$C(10^6)^{1/a} = PL^{1/a} \therefore C = P \left(\frac{L}{10^6}\right)^{1/a} \text{ ou } L = 10^6 \left(\frac{C}{P}\right)^a$$

A vida pode ser expressa em horas numa velocidade constante rpm:

$$L = 60L_h n$$

$$\textbf{Carga Nominal } C = P \left(\frac{L}{10^6}\right)^{1/a} = P \left(\frac{60nL_h}{10^6}\right)^{1/a}$$

$$\textbf{Vida em Horas } L_h = \frac{10^6}{60.n} \left(\frac{C}{P}\right)^a = 500f_h^a$$

$$\textbf{Vida Nominal } L = 10^6 \left(\frac{C}{P}\right)^a$$

$$\textbf{Coeficiente de Velocidade } f_n = \left(\frac{10^6}{500.60n}\right)^{1/a} = (0,03n)^{-1/a}$$

$$\textbf{Coeficiente de Vida } f_h = f_n \frac{C}{P} = \left(\frac{L_h}{500}\right)^{1/a}$$

Vida do Mancal

Tabela 11–4 Recomendações acerca da vida de mancais para várias classes de maquinaria.

Tipo de aplicação	Vida, kh
Instrumentos e aparelhos de uso não frequente	Até 0,5
Motores de aeronaves	0,5–2
Máquinas para operação curta, ou intermitente, em que a interrupção do serviço é de importância menor	4–8
Máquinas para serviço intermitente em que a confiabilidade de operação é de grande importância	8–14
Máquinas para serviço de 8 h que não são utilizadas de maneira plena	14–20
Máquinas para serviço de 8 h que são utilizadas de maneira plena	20–30
Máquinas para serviço contínuo de 24 h	50–60
Máquinas para serviço de 24 h em que a confiabilidade é de importância extrema	100–200

Vida do Mancal

Tabela 5.1 Coeficiente de Vida f_h e exemplos de Aplicações

Condições de Trabalho	Valores de f_h e Aplicações				
	~3	2~4	3~5	4~7	6~
Uso esporádico ou curto período	<ul style="list-style-type: none">Pequenos motores para aspiradores e máquinas de lavar domésticosFerramentas elétricas	<ul style="list-style-type: none">Máquinas agrícolas			
Uso ocasional mas requer funcionamento seguro		<ul style="list-style-type: none">Motores para aparelhos de ar condicionado domésticoMáquinas de construção civil	<ul style="list-style-type: none">Roletes de correias transportadorasElevadores		
Uso intermitente mas relativamente em períodos longos	<ul style="list-style-type: none">Pescoço de cilindros de laminação	<ul style="list-style-type: none">Pequenos motoresGuindastes de convésPontes rolantesCaixas de pinhãoVeículos de passeio	<ul style="list-style-type: none">Motores industriaisMáquinas operatrizesSistemas de engrenamento em geralPeneiras vibratóriasBritadores	<ul style="list-style-type: none">Roldanas de guindastesCompressoresImportantes sistemas de engrenamento	
Uso contínuo por longos períodos ou acima de 8 horas diárias		<ul style="list-style-type: none">Escadas rolantes	<ul style="list-style-type: none">Separadores centrifugosSistemas de ar condicionadoSopradoresMáquinas de marcenariaGrandes motoresRols. para rodeiros de veículos ferroviários	<ul style="list-style-type: none">Guindastes de mineraçãoVolantes de prensasMotores de traçãoRodeiros de locomotivas	<ul style="list-style-type: none">Máquinas para indústria de papel
Uso ininterrupto de 24 horas sem admitir parada accidental					<ul style="list-style-type: none">Sist. fornec. de águaEquip. de hidrelétricasBombas de drenagem de minas

Vida do Mancal sob carga na confiabilidade indicada

- **Exemplo 11-1 Shigley 10ed.** Considere a SKF que classifica seus mancais a 1 milhão de revoluções. Se você desejar uma vida de 5000h a 1725 rev/min com uma carga de 2kN com confiabilidade de 90%, qual classificação procurar no catálogo da SKF?

Dados:

$$L_R = L_{10} = 10^6 \text{ rev}$$

$$P = 2 \text{ kN}$$

$$L_h = 5000h$$

$$L = 60.5000.1725 \text{ rpm} = 517,5 \cdot 10^6 \text{ rev}$$

$$C = F \left(\frac{L}{L_R} \right)^{1/a}$$

$$a = 3; C = 2000 \left(\frac{517,5 \cdot 10^6}{10^6} \right)^{1/3} \therefore C = 16,1 \text{ kN, Esferas}$$

$$a = 10/3; C = 2000 \left(\frac{517,5 \cdot 10^6}{10^6} \right)^{3/10} \therefore C = 13,0 \text{ kN, Rolos}$$

Correções

Temperatura

Como a dureza diminui com o aumento da temperatura isso afeta a carga básica dos rolamentos.

Além disso, em caso de uso em altas temperaturas, deve-se verificar a variação dimensional e possíveis tratamentos de estabilização.

$$C_t = f_t C$$

Tabela 5.3 Coeficiente de Temperatura f_t

Temperatura do Rolamento °C	125	150	175	200	250
Coeficiente de Temperatura, f_t	1,00	1,00	0,95	0,90	0,75

Confiabilidade

A distribuição de três parâmetros de Weibull é usada para expressar a confiabilidade dos mancais de rolamento por contato, uma vez que a distribuição é assimétrica à direita sob condições de carga constante.

$$\text{Confiabilidade } R = \exp^{-\left(\frac{x-x_0}{\theta-x_0}\right)^b}$$
$$a_1 = x_0 + \theta - x_0(\ln 1/R)^{1/b}$$

Tabela 11-6 Parâmetros de Weibull típicos para dois fabricantes.

Fabricante	Vida nominal, revoluções	Parâmetros de Weibull		
		x_0	θ	b
1	$90(10^6)$	0	4,48	1,5
2	$1(10^6)$	0,02	4,459	1,483

$$L = a_1 L_{10} \therefore L_{10} = L/a_1$$

Tabela 5.4 Coeficiente de Confiabilidade a_1

Confiabilidade (%)	90	95	96	97	98	99
a_1	1,00	0,62	0,53	0,44	0,33	0,21

Correções

Correção em função da aplicação da carga

$$P = f_w P_{teo}$$

Tabela 5.5 Valores de Coeficiente de Carga f_w

Condições de Operação	Exemplos de Aplicação	f_w
Operação suave e sem choque	Motores elétricos, máquinas operatrizes, ar condicionado	1 a 1,2
Operação normal	Sopradores, elevadores, compressores, guindastes, máquinas para indústria de papel	1,2 a 1,5
Operação com choque, vibração ou ambos	Máquinas de construção civil, britadores, peneiras vibratórias, laminadores	1,5 a 3

Tabela 11-5 Fatores de aplicação de carga.

Tipo de aplicação	Fator de carga
Engrenagens de precisão	1,0-1,1
Engrenagens comerciais	1,1-1,3
Aplicações com vedação de mancais pobre	1,2
Maquinaria sem impacto	1,0-1,2
Maquinaria com impacto leve	1,2-1,5
Maquinaria com impacto moderado	1,5-3,0

Distribuição de carga

- Quando da aplicação de cargas no eixo, deve-se calcular a carga em cada rolamento.

$$F_{CI} = \frac{b}{c}K$$

$$F_{CII} = \frac{a}{c}K$$

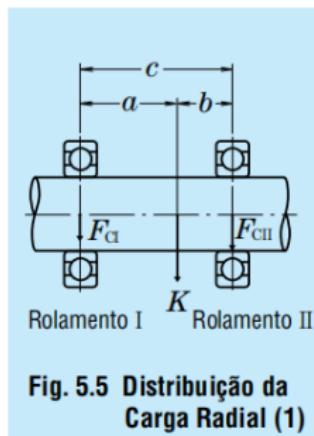


Fig. 5.5 Distribuição da Carga Radial (1)

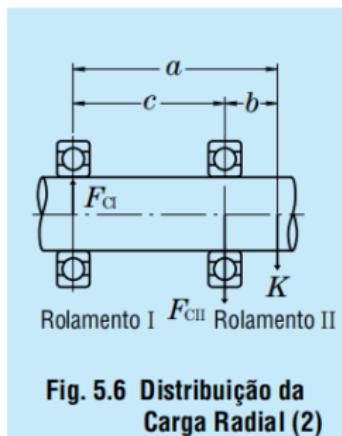


Fig. 5.6 Distribuição da Carga Radial (2)

Carga Variável

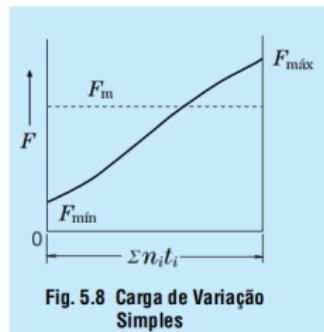
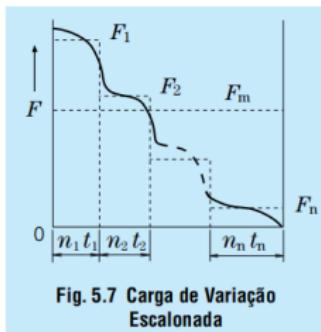
- ▶ Quando os rolamentos estão submetidos à carga variável, deve-se calcular a **Média da carga Variável**
- ▶ Quando se puder fazer uma divisão escalonada:

$$F_m = \sqrt{\frac{F_1^a n_1 t_1 + F_2^a n_2 t_2 + \dots + F_n^a n_n t_n}{n_1 t_1 + n_2 t_2 + \dots + n_n t_n}}$$

$$\text{Média da velocidade de rotação } n_m = \frac{n_1 t_1 + n_2 t_2 + \dots + n_n t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}$$

- ▶ Quando a variação for aproximadamente linear:

$$F_m = \frac{1}{3}(F_{\min} + 2F_{\max})$$



Carga Variável

- ▶ Para **curva senoidal COM ponto de inflexão.**

$$F_m = 0,65F_{max}$$

- ▶ Para **curva senoidal SEM ponto de inflexão.**

$$F_m = 0,75F_{max}$$

- ▶ Para **cargas giratórias e estacionárias:**

- ▶ Quando $F_R \geq F_S$ $F_m = F_R + 0,3F_S + 0,2\frac{F_S^2}{F_R}$

- ▶ Quando $F_R < F_S$ $F_m = F_R + 0,3F_S + 0,2\frac{F_R^2}{F_S}$

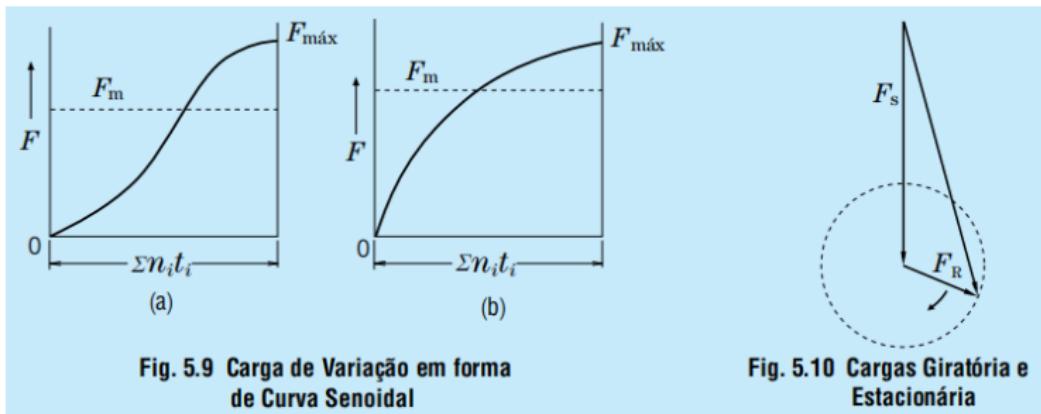


Fig. 5.9 Carga de Variação em forma de Curva Senoidal

Fig. 5.10 Cargas Giratória e Estacionária

Resumo

$$C = \frac{f_w}{f_t} P \left(\frac{60nL_h}{a_1 10^6} \right)^{1/a}$$

$$a = \begin{cases} Esferas & 3 \\ Rolos & 10/3 \end{cases}$$

$$L_h = a_1 \frac{10^6}{60.n} \left(\frac{f_t}{f_w} \frac{C}{P} \right)^a$$

$$f_n = (0,03n)^{-1/a}$$

$$a_1 = \frac{60nL_h}{10^6} \left(\frac{f_w}{f_t} \frac{P}{C} \right)^a$$

$$\text{Confiabilidade} \begin{cases} \text{Constantes de Weibull : } x_0, \theta, b \\ R = \exp^{-\left(\frac{a_1 - x_0}{\theta - x_0}\right)^b} \\ a_1 = x_0 + \theta - x_0 (\ln 1/R)^{1/b} \end{cases}$$

Exercício

- **Exemplo 11-3 Shigley 10ed.** A carga de projeto em um mancal de esferas é 1840 N e um fator de aplicação de carga 1,2 é apropriado. A velocidade do eixo deve ser de 400 rev/min e a vida deve ser de 30 kh. Calcule:
- A capacidade de carga necessária para $R = 0,9$ e $0,99$, quando se busca por um mancal de sulco profundo em catálogo de fabricante com base em 10^6 revoluções para a vida nominal. Os parâmetros de Weibull são $x_0 = 0,02$, $(\theta - x_0) = 4,439$ e $b = 1,483$.
 - Selecione os rolamentos.
 - Calcule a vida nominal.

Exercício

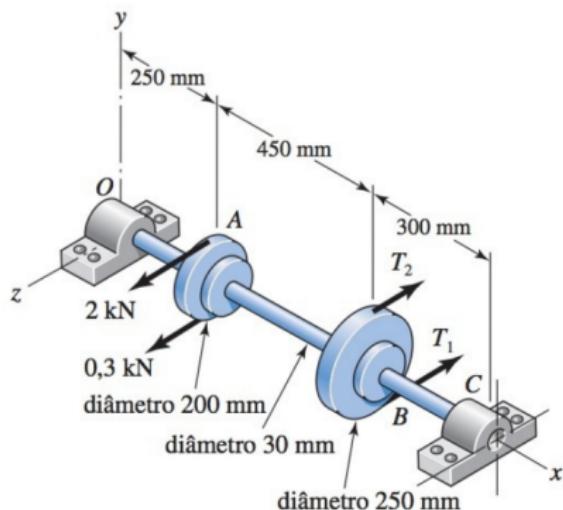
- ▶ **Exercício 11-1 Shigley 10ed.** Uma certa aplicação requer um mancal de esferas de anel interno rotativo, com vida de projeto de 25 kh a uma velocidade de 350 rev/min. A carga radial é de 2,5 kN e é apropriado um fator de aplicação de 1,2. A meta de confiabilidade é de 0,90. Encontre o múltiplo da vida nominal requerido, x_D , e a capacidade de catálogo C_{10} , para entrar em uma tabela de mancal. Escolha um mancal de esferas com sulco profundo da série 02 na Tabela 11-2, e estime a confiabilidade em uso.
- ▶ **Exercício 11-6 Shigley 10ed.** Uma mancal de rolos retos (cilíndrico) é submetido a uma carga radial de 20 kN. A vida deve ser de 8000 h a uma velocidade de 950 rev/min e exibir uma confiabilidade de 0,95.
 - a Que capacidade básica de carga deve ser utilizada?
 - b Selecione um rolamento.

Exercício

- **Exercício 11-2a5 Shigley 10ed.** Um mancal de esferas de contato angular, com rotação do anel interno, série 02 se faz necessário em uma aplicação na qual o requerimento de vida é de 50 kh a 480 rev/min. A carga radial de projeto é de 2745 N. O fator de aplicação é de 1,4. A meta de confiabilidade é de 0,90.
- a Escolha um mancal.
 - b O outro mancal no eixo deve ser um mancal cilíndrico de rolos da série 03, com anel interno rotativo. Para uma carga radial de 7342 N. Escolha um mancal e estime a sua confiabilidade em uso.
 - c Qual a confiabilidade do conjunto?
 - d Visando uma confiabilidade total de 90%, reajuste o projeto.

Exercício

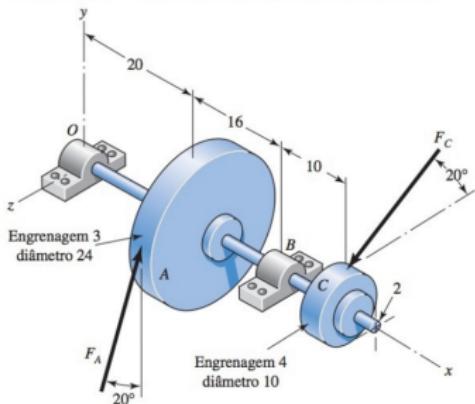
► **Exercício 11-14 Shigley 10ed.** Um contraeixo com duas polias para correias em V é ilustrado na figura. A polia A é acionada por um motor por meio de uma correia com as tensões de correia mostradas. A potência é transmitida através do eixo e é aplicada à correia na polia B. Considere que a tensão na correia do lado frouxo em B é igual a 15% da tensão do lado apertado.



- Calcule as reações nos mancais.
- Considerando que o eixo rotacionará a 1200 rev/min uma vida útil de 15 kh, 95% de confiabilidade e um fator de aplicação de carga de 1,2, calcule a capacidade de carga.
- Selecione os rolamentos em O e C.

Exercício

► **Exercício 11-32 Shigley 10ed.** No conjunto abaixo, a força na engrenagem A é $F_A = 2670\text{N}$ e o eixo deve rodar a uma velocidade de 480 rpm. A solução do problema estático dá a força do mancal contra o eixo em O como sendo $R_O = -1722\mathbf{j} + 2078\mathbf{k}\text{N}$ e em B igual a $R_B = 1406\mathbf{j} - 7187\mathbf{k}\text{N}$. Especifique os mancais necessários, use um fator de aplicação de carga de 1,4, uma vida desejada de 50 000 h e uma meta de confiabilidade combinada de 0,90. Selecione os mancais:



- a De esferas de contato angular para O
- b De rolos retos para B.

Cargas Combinadas

- ▶ A maioria das aplicações apresenta as cargas **Radiais e Axiais** de forma combinada.
- ▶ Assim, é necessário quantificar a combinação das forças em uma única variável.

Carga dinâmica equivalente $P = XF_R + YF_a$

Coeficientes de carga X e Y

- ▶ Os rolamentos axiais de esferas normais não podem receber cargas radiais. $P = F_a$
- ▶ Já os rolamentos axiais autocompensadores de rolos permitem carga radial.
- ▶ **Consultar Catálogo para demais tipos de projeto.**

Referências

1. Budynas, R. G. e Nisbett, J.K. Elementos de Máquinas de Shigley 10. ed. Porto Alegre. 2016.
2. Collins,J.A.,. Projeto Mecânico de Elementos de Máquinas. 2. LTC. 2019.
3. Fazekas, G.A. On Circular Spot Brakes, Trans. ASME, J. Engineering for Industry, v. 94, Série B, n.3, 1972, p 859-863.
4. Juvinall, R. C. e Marshek, K. M.. Projeto de Componentes de Máquinas. 4. LTC. 2008.
5. Norton, R. L. Projeto de Máquinas. 4. ed. 2013.
6. NSK. Catálogos e Website: www.nsk.com.br
7. SKF. Catálogos e Website: www.skf.com.br